

Traducción de herramientas enfocadas a la estimación de la incertidumbre de medición de hidrocarburos elaboradas en Excel al lenguaje de programación C# en la Corporación de Desarrollo Tecnológico del Gas.

Brisa Alejandra Silva Acosta

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Químico

Modalidad práctica empresarial

Director

Carlos Eduardo García Sánchez

Ingeniero Químico, PhD

Tutor

José Augusto Fuentes Osorio

Ingeniero Químico, Magister

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2023

Tabla de contenido

Introducción 9

1. Objetivos..... 11

1.1. Objetivo general..... 11

1.2. Objetivos específicos 11

2. Marco conceptual 11

2.1. Descripción de la actualización implementada por el CDT de Gas en los modelos creados para la estimación de incertidumbre de hidrocarburos 11

2.2. Metrología..... 12

2.3. Método GUM..... 12

2.4. Modelo de estimación de incertidumbre..... 15

2.5. Sistema de medición por placa de orificio..... 16

2.6. Normativa utilizada para evaluar los sistemas que implementan placa de orificio 19

2.7. Implementación de herramientas computacionales en la metodología de estimación de incertidumbre 20

3. Metodología..... 23

3.1. Descripción de las etapas secuenciales realizadas durante la práctica 23

3.1.1. Identificación de las oportunidades de mejora de los modelos desarrollados en Excel y Visual Basic23

3.1.2. Construcción del código C# a partir de las plantillas desarrolladas en Microsoft Excel y Visual Basic24

3.1.3. Validación y verificación de los archivos traducidos a C# 24

3.2. Descripción de las actividades requeridas para iniciar el proceso de formulación del plan de trabajo de grado26

3.3. Descripción de la capacitación recibida del CDT de Gas durante la práctica empresarial...26

4. Resultados27

4.1. Primera etapa metodológica..... 27

4.1.1. Modelo de estimación de incertidumbre para la medición de volumen de gas natural implementando la tecnología placa de orificio27

4.1.2. Fuentes de variabilidad asociadas al modelo de estimación de incertidumbre 28

4.1.3. Evaluación de posibles ajustes a la versión original del modelo de incertidumbre desarrollado en Excel para la tecnología placa de orificio.....30

4.1.4. Implementación de los ajustes aprobados por parte del área de Desarrollo Tecnológico e

Innovación	31
4.1.5. Validación de los ajustes implementados.....	33
4.2. Segunda etapa metodológica.....	35
4.2.1. Código desarrollado en el lenguaje de programación C# del modelo de estimación de incertidumbre.....	35
4.3. Tercera etapa metodológica	40
4.3.1. Validación y verificación del código C# elaborado a partir del archivo Excel diseñado para el modelo de estimación de incertidumbre.....	40
5. Conclusiones.....	42
Referencias bibliográficas.....	44
Apéndices.....	47

Lista de tablas

Tabla 1 Descripción de las tareas y funciones realizadas durante la práctica empresarial	25
Tabla 2 Fuentes de variabilidad para la presión, temperatura y diferencial de presión	29
Tabla 3 Fuentes de variabilidad del coeficiente de descarga	31
Tabla 4 Incertidumbre expandida porcentual de las fuentes de variabilidad del coeficiente de descarga	32

Lista de figuras

Figura 1 Sistema de medición.....	16
Figura 2 Placa de orificio.....	17
Figura 3 Elemento primario del sistema de medición	18
Figura 4 Diagrama de flujo de las etapas establecidas para la práctica empresarial	23
Figura 5 Fuentes de variabilidad y magnitudes de entrada del modelo de estimación de incertidumbre.....	28
Figura 6 Actualizaciones realizadas en Microsoft Excel del modelo de estimación de incertidumbre.....	30
Figura 7 Especificaciones del coeficiente de descarga.....	30
Figura 8 Código Visual Basic con los componentes de incertidumbre expandida porcentuales calculados para la ecuación de Reader-Harris/Gallagher (1998).....	33
Figura 9 Actualización de las especificaciones del coeficiente de descarga	34
Figura 10 Resultados de las magnitudes de entrada y fuentes de variabilidad del modelo de estimación de incertidumbre para placa de orificio diseñado en Microsoft Excel.....	37
Figura 11 Resultados del volumen de gas por día en condiciones base del modelo de estimación de incertidumbre para placa de orificio diseñado en Microsoft Excel.....	37
Figura 12 Resultados del modelo de estimación de incertidumbre para placa de orificio realizando la traducción de la herramienta Microsoft Excel a C#.....	39
Figura 13 Validación de los resultados obtenidos en Microsoft Excel y C#.....	41

Lista de apéndices

Apéndice A. Certificados recibidos en los cursos titulados “Fundamentos de Metrología” y “Estimación de la Incertidumbre de Medición” 47

Apéndice B. Certificado recibido en el curso denominado “Medición de Cantidad y Calidad de Gas Natural”.48

Apéndice C. Resultados del procedimiento realizado en C# para estimar la incertidumbre estándar de la temperatura49

Apéndice D. Resultados del procedimiento realizado en C# para estimar la incertidumbre estándar de la presión estática50

Apéndice E. Resultados del procedimiento realizado en C# para estimar la incertidumbre estándar del diferencial de presión51

Apéndice F. Resultados del procedimiento realizado en C# para estimar la incertidumbre estándar del coeficiente de descarga52

Apéndice G. Resultados del procedimiento realizado en C# para estimar la incertidumbre estándar del factor de compresibilidad53

Apéndice H. Resultados del procedimiento realizado en C# para estimar la incertidumbre estándar de la gravedad específica59

Resumen

Título: Traducción de herramientas enfocadas a la estimación de la incertidumbre de medición de hidrocarburos elaboradas en Excel al lenguaje de programación C# en la Corporación de Desarrollo Tecnológico del Gas.*

Autor: Brisa Alejandra Silva Acosta.**

Palabras Clave: Microsoft Excel, Visual Basic, C#, estimación de incertidumbre, método GUM, placa de orificio, volumen, coeficiente de descarga.

Descripción: La práctica empresarial realizada en la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas se desarrolló con el fin de traducir un modelo de estimación de incertidumbre, diseñado por la empresa, al lenguaje de programación C#. La herramienta computacional está enfocada en la estimación de la incertidumbre de medición del volumen de gas por día en condiciones base de gas natural, utilizando la tecnología placa de orificio e implementando la metodología GUM para el proceso de cálculo basado en la normativa ISO 5167-2, el reporte AGA 3 y las bases de datos de la corporación. Los pasos seguidos para cumplir el objetivo general fueron tres: la identificación de oportunidades de mejora del modelo de estimación de incertidumbre; la creación del código C# a partir del modelo diseñado por la empresa en Microsoft Excel y Visual Basic; y finalmente la verificación y validación de los resultados obtenidos en ambos lenguajes de programación, cumpliendo los requisitos para que sea integrado a un software ya existente. El código programado en C# se ejecuta en la plataforma .NET, motivo por el que tiene la capacidad de operar con diversos lenguajes de programación, también se utiliza para la creación de aplicaciones de escritorio, y permite una adecuada trazabilidad de la metrología realizada por la empresa y sus actualizaciones.

* Práctica empresarial.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Ingeniería Química. Director: Carlos Eduardo García Sánchez. Ingeniero Químico, PhD. Tutor: José Augusto Fuentes Osorio. Ingeniero Químico, Magister.

Abstract

Title: Translation of measurement uncertainty estimation tools for hydrocarbons developed in Excel to the C# programming language at the Corporación de Desarrollo Tecnológico del Gas.*

Author: Brisa Alejandra Silva Acosta.**

Key Words: Microsoft Excel, Visual Basic, C#, estimation of the uncertainty, GUM method, orifice plate, volumen, discharge coefficient.

Description: The business practice carried out at the Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas was aimed at translating a model for estimating uncertainty, designed by the company, into the C# programming language. The computational tool is focused on estimating the measurement uncertainty of gas volume per day under natural gas base conditions, using the orifice plate technology and implementing the GUM methodology for the calculation process based on ISO 5167-2 regulations, AGA 3 report, and the corporation's databases. The steps taken to achieve the overall goal were threefold: identifying opportunities to improve the uncertainty estimation model, creating the C# code based on the model designed by the company in Microsoft Excel and Visual Basic, and finally, verifying and validating the results obtained in both programming languages to meet the requirements for integration into an existing software. The C# code is executed on the .NET platform, which allows it to operate with various programming languages, is also used for desktop application development, and allows for proper traceability of the metrology carried out by the company and its updates.

* Business Practice

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Chemical Engineer. Director: Carlos Eduardo García Sánchez. Chemical Engineer, PhD. Tutor: José Augusto Fuentes Osorio. Chemical Engineer, Magister.

Introducción

La Corporación de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT de Gas) pertenece al Sistema Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación (SNCTI), con reconocimiento vigente del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación. La organización se enfoca en el sector gas e implementa la metrología de fluidos mediante el desarrollo de proyectos de investigación, el diseño de tecnología propia y la elaboración de actividades de transferencia, con el fin de participar en la transición energética y la inmersión en la cuarta revolución industrial (Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, s.f.).

Entre los servicios que se ofrecen se encuentran: soluciones tecnológicas, investigación, desarrollo de software, metrología física y química, laboratorio de ensayos, capacitaciones y responsabilidad ambiental en las operaciones. Su desempeño le ha permitido ser líder en el sector gas y abarcar diversos sectores como la producción, refinación, procesamiento, transporte y distribución de gas e hidrocarburos; termoeléctricas y petroquímicas; sector del gas licuado del petróleo; entes del sistema nacional de calidad; laboratorios de investigación, calidad y ensayos; sector académico; entre otros (Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, s.f.).

El trabajo de grado planteado se basa en la estimación de la incertidumbre asociada a sistemas de medición de volumen de gas natural que utilizan la tecnología placa de orificio, realizado en el área de Desarrollo Tecnológico e Innovación en conjunto con el Grupo de Investigación en Fluidos y Energía (GIFE) perteneciente al CDT de Gas. Desde 2014 la corporación elaboró en Excel y Visual Basic varios modelos de estimación de incertidumbre para mediciones de hidrocarburos, basados en la metodología GUM. Estas herramientas computacionales permiten que las industrias del sector Oil&Gas lleven a cabo un control más

riguroso en los métodos implementados de medición para sus operaciones de producción y/o transporte de fluidos valiosos, a la vez que les facilita el cumplimiento de la Resolución 4 0236 de 2022 del Ministerio de Minas y Energía emitida para reglamentar la medición del volumen y la determinación de la calidad de los hidrocarburos producidos en Colombia, con el objetivo final de asegurar la correcta liquidación de las regalías y contraprestaciones económicas a favor del estado (Ministerio de Minas y Energía, 2016). Sin embargo, al aplicar el método desarrollado en Microsoft Excel no se logró obtener una adecuada trazabilidad y seguridad del proceso de cálculo.

Para solucionar los obstáculos que se presentaron, el área de Desarrollo Tecnológico e Innovación del CDT de Gas está llevando a cabo una actualización de la metodología de desarrollo, que consiste en traducir los modelos de estimación de incertidumbre diseñados en Excel al lenguaje de programación de alto nivel C# para su implementación y validación. C# hace posible tener una base de datos de información que proporcione históricos, reduzca la cantidad de información ingresada por el usuario y permita crear aplicaciones de escritorio, logrando incrementar la productividad, calidad y agilidad en la ejecución y toma de decisiones que deba realizar la empresa.

Del proyecto surge una pregunta importante ¿Es posible obtener un adecuado desempeño en la estimación de la incertidumbre asociada a sistemas de medición de volumen de gas natural mediante la actualización de Excel al lenguaje de programación C#?

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Realizar la traducción de herramientas de estimación de la incertidumbre de medición de hidrocarburos elaboradas en Excel al lenguaje de programación C#.

1.2. Objetivos específicos

Identificar oportunidades de mejora para las herramientas de estimación de la incertidumbre de medición de hidrocarburos elaboradas en Microsoft Excel y el lenguaje de programación Visual Basic basadas en la metodología GUM.

Crear a partir de las plantillas desarrolladas en Excel un código en C# que permita la transición de lenguaje de programación.

Verificar que los archivos traducidos a C# cumplen las convenciones solicitadas por la empresa de software de manera que pueda ser integrado a un software de gestión de balances ya existente.

2. Marco conceptual

2.1. Descripción de la actualización implementada por el CDT de Gas en los modelos creados para la estimación de incertidumbre de hidrocarburos

El área de Desarrollo Tecnológico e Innovación, perteneciente a la Corporación de Desarrollo Tecnológico del Gas, en el año 2014 comenzó un proyecto enfocado en la creación de modelos de estimación de incertidumbre de hidrocarburos gaseosos, cuyo diseño fue creado en la herramienta Microsoft Excel para diversas tecnologías de medición de gas natural como placa de orificio, medidor tipo turbina, medidor ultrasónico y medidor másico Coriolis. Excel presentó

dificultades en la coordinación de operaciones, control y trazabilidad, motivo por el cual el CDT de Gas en 2021 inició la actualización de la metodología del proyecto mediante la traducción de los modelos elaborados en Excel al lenguaje de programación C#.

2.2. Metrología

La metrología es la ciencia de las mediciones y sus aplicaciones (Joint Committee for Guides in Metrology, 2012). La estimación de la incertidumbre de medida y su documentación ha adquirido cada vez más influencia en la ciencia, industria y normativa aplicada por entes gubernamentales, la incertidumbre reporta el nivel de duda sobre una medición, de manera que una incertidumbre baja aumenta la credibilidad del ente que lo reporta.

Actualmente la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) es la organización que reúne a los estados miembro para efectuar acciones relacionadas con la ciencia y normas de medición (BIPM, 2022). Su misión está enfocada en trabajar con los Institutos Nacionales de Metrología de sus estados miembro, las Organizaciones Regionales de Metrología y los asociados estratégicos del mundo, con el fin de promover la comparabilidad y trazabilidad de las mediciones, permitir la innovación y el descubrimiento científico, la fabricación industrial, el comercio internacional, la mejora de la calidad de vida y la sostenibilidad ambiental (Bureau International des Poids et Mesures, s.f.). El BIPM edita la GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement), considerada como una de las referencias principales para el proceso de estimación de la incertidumbre en la medición de cualquier mensurando (García & Dueñas, 2014).

2.3. Método GUM

El método GUM aprovecha simplificaciones para poder aproximar la distribución de probabilidad del mensurando mediante una representación del modelo de medición por series de

Taylor y el teorema del límite central. Funciona adecuadamente en problemas donde la linealización es una buena alternativa de representación del modelo, y donde no hay fuentes de variabilidad con distribuciones diferentes a la normal que dominen el aporte a la incertidumbre total del mensurando (Capacitaciones virtuales Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas., 2019). La incertidumbre estándar $u_c(y)$ del mensurando Y representa la desviación estándar de la distribución de probabilidad del resultado de medición y se estima a partir de las incertidumbres $u(x_i)$ de las magnitudes de entrada X_i y del modelo de medición $f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ con la siguiente expresión:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)} \quad (\text{Ec.1})$$

A las derivadas parciales se les conoce como coeficientes de sensibilidad. Representan la tasa de cambio del mensurando respecto a un cambio unitario en la magnitud de entrada y se tiene la opción de resolverlas de forma analítica o numérica.

También se realiza la estimación de la incertidumbre estándar combinada del resultado de medición a partir de las incertidumbre estándar de cada una de las magnitudes de entrada en un modelo de medición (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 2012). El cálculo del aporte de cada magnitud de entrada se realiza mediante el coeficiente de sensibilidad, finalmente se combina con las demás variables para calcular la incertidumbre combinada del mensurando (Joint Committee for Guides in Metrology, 2008).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2 \equiv \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (\text{Ec.2})$$

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}, u_i(y) \equiv |c_i|u(x_i) \tag{Ec.3}$$

Donde c_i representa los coeficientes de sensibilidad y $u(x_i)$ las incertidumbres estándar de las magnitudes de entrada.

También se suele calcular la incertidumbre expandida y la incertidumbre relativa. La incertidumbre expandida (Ec.4) representa la mitad de la longitud de un intervalo de cobertura con un porcentaje de cobertura determinado. El intervalo de cobertura es un rango de valores en el que se establece un nivel de confianza determinado, indicando que es posible encontrar el valor del mensurando (Capacitaciones virtuales Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas., 2019). La incertidumbre relativa (Ec.5) es el cociente entre la incertidumbre absoluta y el valor de medición, informa la precisión de la medida y suele expresarse como porcentaje (Universidad Autónoma de Madrid).

$$U = k * u_c(y) \tag{Ec.4}$$

Donde k representa el factor de cobertura y depende de la distribución de probabilidad del resultado de medición.

$$u_r = \frac{u_c(y)}{y} \tag{Ec.5}$$

GUM se puede implementar con términos de orden superior si el modelo de medición es considerablemente no lineal, al conservar más términos en la aproximación por serie de Taylor se pueden evitar resultados erróneos mediante la siguiente ecuación (Joint Committee for Guides in Metrology, 2008, pág. 19):

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j}\right)^2 + \frac{\partial f}{\partial x_i} * \frac{\partial^3 f}{\partial x_i \partial x_j^2} \right] u^2(x_i)u^2(x_j)} \tag{Ec.6}$$

Cuando se desea tener en cuenta la posible correlación entre magnitudes de entrada se incluye el termino de covarianza $u(x_i, x_j)$ estimada entre las magnitudes x_i y x_j mediante la siguiente ecuación (Joint Committee for Guides in Metrology, 2008, pág. 21):

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} * \frac{\partial f}{\partial x_j}\right] u(x_i, x_j)} \quad (\text{Ec.7})$$

La covarianza se puede calcular a partir de n pares independientes de observaciones simultáneas $x_{i,k}$ y $x_{j,k}$ de las magnitudes x_i y x_j con la siguiente expresión (Joint Committee for Guides in Metrology, 2008, pág. 22):

$$u(x_i, x_j) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_{i,k} - \bar{x}_i)(x_{j,k} - \bar{x}_j) \quad (\text{Ec.8})$$

2.4. Modelo de estimación de incertidumbre

El modelo de estimación de incertidumbre se compone por tres tipos de variables: mensurando, magnitudes de entrada y fuentes de variabilidad. El mensurando define la magnitud que se busca cuantificar, las magnitudes de entrada son aquellas variables de las cuales depende el mensurando y las fuentes de variabilidad representan las posibles causas que pueden generar variaciones en el valor medido de las magnitudes de entrada.

Las fuentes de variabilidad se pueden clasificar en tres grupos para la mayoría de las magnitudes de entrada. El primer grupo se define como “Desempeño metrológico”, e incluye los efectos de actividades de calibración, verificación o medición en campo relacionadas con la desviación respecto a un valor de referencia, repetibilidad y reproducibilidad del medidor. El segundo grupo se denomina como “Características técnicas” y contiene los factores que pueden generar dispersión en la medición, suelen ser intrínsecos o reportados por el fabricante. El tercer

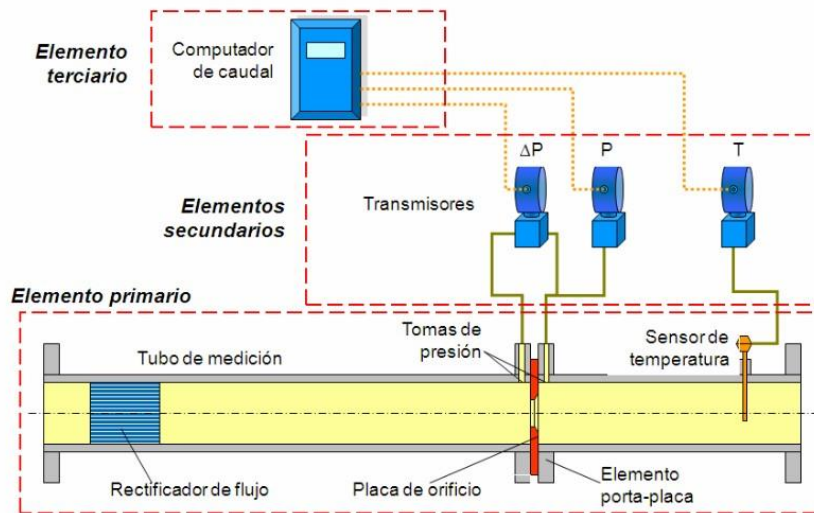
grupo se define “Condiciones de operación/instalación” corresponde a las fuentes de distorsión causadas por el entorno donde se realiza el proceso y que se evidencian en el modelo de medición implementado (Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas – CDT de Gas, 2018).

2.5. Sistema de medición por placa de orificio

Los sistemas de medición con placa de orificio son un tipo de medidores de caudal por presión diferencial. La operación de esta herramienta se basa en producir una restricción en la corriente de flujo de tal forma que se genere un diferencial de presión a través de la restricción, existiendo una relación funcional entre el diferencial de presión y el caudal (Capacitaciones virtuales Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, 2022, pág. 1). La Figura 1 evidencia a modo de ejemplo el diseño del sistema de medición.

Figura 1

Sistema de medición



Nota. Adaptado de (Capacitaciones virtuales Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, 2022)

- Placa de orificio: lámina delgada y plana que presenta un orificio circular concéntrico con borde recto y afilado. Esta sección se ubica en forma concéntrica y perpendicular a la

corriente del fluido (Capacitaciones virtuales Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, 2022, págs. 10-11).

Figura 2

Placa de orificio



Nota. Adaptado de (DKD & Associates, s.f.)

- Porta – placas: es un accesorio conformado por un par de bridas, tomas de presión radiales al cuerpo y pernos para sujeción. Su función se basa en posicionar adecuadamente la placa y medir, mediante las tomas de presión, el diferencial de presión entre las posiciones aguas arriba y aguas debajo de la placa (Capacitaciones virtuales Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, 2022, pág. 15).
- Tubo de medición: representa la longitud en secciones de tubería recta, incluyendo los segmentos aguas arriba y aguas abajo de la placa de orificio (Capacitaciones virtuales Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, 2022, pág. 16).

El diseño más básico del sistema de medición que implementa la tecnología placa de orificio se compone por los equipos del elemento primario: placa de orificio, porta – placas y tubo de medición, como se muestra en la Figura 3.

Figura 3

Elemento primario del sistema de medición



Nota. Adaptado de (TM TECNOMATIC, 2017, pág. 15)

- Rectificador de flujo: es un dispositivo que cumple la función de generar condiciones apropiadas del perfil de velocidad que presenta el flujo aguas arriba de la placa de orificio. Esta herramienta permite que el flujo tenga las mismas condiciones que se implementaron experimentalmente para desarrollar la base de datos del coeficiente de descarga, buscando obtener un flujo completamente desarrollado en una longitud de tubería más corta lo que ahorra espacio y costos (Capacitaciones virtuales Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, 2022, pág. 18).
- Tomas de presión: son agujeros taladrados radialmente sobre la pared del tubo de medición o del dispositivo porta-placa con el objetivo de captar el diferencial de presión que es proporcional al cuadrado de la velocidad del flujo (Almaraz Gómez, 2007). Las indicaciones para las tomas son las siguientes: el centro de la primera toma de presión aguas arriba debe estar a 1 pulgada de la cara aguas arriba de la placa de orificio; el centro de la segunda toma de presión aguas abajo debe estar a 1 pulgada de la cara aguas abajo de la placa de orificio (Capacitaciones virtuales Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, 2022, pág. 20).
- Sensor de temperatura: se ubica para medir la temperatura del fluido aguas arriba o aguas abajo. Un factor importante es la instalación de un pozo termométrico que aloja el sensor

esto permite una transferencia de calor efectiva y brinda protección frente a la corriente directa del flujo (Capacitaciones virtuales Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, 2022, pág. 21).

- Transmisores: elementos implementados para la medición de variables diferentes al caudal volumétrico y que hacen parte del modelo matemático del mensurando. Para el caso de la tecnología placa de orificio, en la que se maneja gas natural, es fundamental conocer la temperatura, la presión y la composición (Capacitaciones virtuales Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, 2022, pág. 4).
- Computador de caudal o computador de flujo: equipo electrónico utilizado para el cálculo de la cantidad total de gas. Mediante la recepción, conversión y procesamiento de señales análogas o digitales provenientes del elemento primario y secundario se obtiene el volumen a condiciones de flujo o a condiciones base establecidas previamente. El dispositivo mide el volumen con alta exactitud cuando se aplica transferencia de custodia y realiza funciones adicionales como el almacenamiento de históricos de las condiciones del flujo, volumen y caudal; el registro de calibraciones realizadas anteriormente al elemento secundario; el reporte de las diferentes condiciones de operación en tiempo real, entre otras (Capacitaciones virtuales Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, 2022, pág. 4).

2.6. Normativa utilizada para evaluar los sistemas que implementan placa de orificio

Las normas utilizadas para evaluar los sistemas de medición que implementan placa de orificio son API MPMS 14.3 y el reporte AGA 3. El reporte AGA 3 se divide en cuatro partes principales, la primera abarca las ecuaciones básicas y la incertidumbre establecida para cuantificar el caudal volumétrico mediante la tecnología de placa de orificio; la segunda parte provee las especificaciones y requisitos de instalación; la tercera parte es una guía para que el

usuario aplique el cálculo de caudal de gas natural empleando placas de orificio; y la tercera parte contiene los fundamentos y la metodología para calcular el coeficiente de descarga (American Gas Association and American Petroleum Institute, 2003).

La norma se aplica para placas de orificio concéntricas, de borde recto y con tomas de presión sobre las bridas. También requiere del uso de fluidos en estado estacionario considerados limpios, monofásicos, homogéneos y newtonianos, con Reynolds de tubería mayores o iguales a 4000 (American Gas Association and American Petroleum Institute, 2003).

Otra norma importante es la ISO 5167-2, titulada “Medición del flujo de fluidos mediante dispositivos diferenciales de presión insertados en conductos circulares de sección transversal que funcionan a pleno rendimiento”, específicamente la parte 2 que abarca las placas de orificio. La ISO 5167-2 presenta la geometría, las condiciones de instalación y el funcionamiento de las placas de orificio que se introducen en un conducto con el fin de determinar el caudal de fluido (International Organization for Standardization, 2003).

Se aplica la norma ISO 5167-2 a flujos que permanecen subsónicos en toda la sección de medición y que se pueden considerar monofásicos. No se puede aplicar a la medición de flujos pulsantes ni con Reynolds inferiores a 5000, y no cubre el uso de placas de orificio en tamaños de tubería inferiores a 50 mm o superiores a 1000 mm (International Organization for Standardization, 2003).

2.7. Implementación de herramientas computacionales en la metodología de estimación de incertidumbre

El uso de software se ha convertido en un complemento para la estimación de incertidumbre en la ciencia e industria. Las herramientas computacionales permiten de forma ágil

y eficaz el análisis y simulación de datos, la aplicación de métodos numéricos a diversos problemas físicos, matemáticos o económicos, y el almacenamiento de información. En la aplicación de métodos numéricos se ha popularizado y extendido el uso de Excel debido a su disponibilidad al formar parte del paquete básico de Microsoft Office (Constantino, 2013).

MS Excel es un software para el manejo de hojas electrónicas agrupadas en libros. Entre sus aplicaciones más destacadas se encuentra el tratamiento estadístico de datos y la presentación gráfica de los mismos (Mora & Espinoza, 2005). Adicionalmente cuenta con VBA (Visual Basic for Applications) un lenguaje de programación que permite al usuario automatizar tareas que se presentan de forma continua y reiterativa, además que facilita el intercambio de datos entre los programas de Microsoft Office (Digital Guide IONOS, 2020).

La aplicación de MS Excel presenta algunas desventajas como la dificultad de mantener un control y trazabilidad al no poder llevar históricos de los cambios y actualizaciones realizadas; a diferencia de un software empresarial, el usuario puede individualizar la hoja de cálculo y exponer los datos a errores, adicionalmente la posibilidad de modificar los archivos impide mantener información uniforme cuando uno o más usuarios requieran trabajar sobre el archivo de MS Excel; no se presenta la coordinación del flujo de datos entre los procesos de la empresa, motivo por el que puede haber más de una fuente de información y se disminuya la agilidad de las operaciones; también es importante resaltar que no es posible escalar las hojas de cálculo y convertirlas en un aplicativo web en el que todos los usuarios de la empresa puedan participar simultáneamente.

El Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas seleccionó el lenguaje de programación C# para realizar la actualización de la metodología de desarrollo. C# es un lenguaje de programación moderno, basado en objetos y con seguridad de tipos que hace parte del paquete de Visual Studio. Su implementación permite a los usuarios crear diversas aplicaciones que se ejecutan en .NET, el cual cuenta con un sistema de ejecución virtual llamado Common Language Runtime (CLR) y un conjunto de bibliotecas de clases que admiten gran cantidad de cargas diferentes de trabajo, llevan a cabo la entrada y salida de archivos, la manipulación de cadenas, el análisis de XML, los marcos de aplicaciones web y los controles de Windows Forms (Microsoft, 2022).

CLR es la implementación de Microsoft del estándar internacional Common Language Infrastructure (CLI) el cual permite la ejecución y desarrollo de ambientes donde los lenguajes y las bibliotecas puedan funcionar simultáneamente. El código escrito en C# se compila en un lenguaje intermedio (IL) de acuerdo a las especificaciones de CLI y también a la especificación de tipo común (CTS) permitiendo la operación entre lenguajes, de esta forma, el código IL generado desde C# puede interactuar con otros códigos generados en versiones .NET (Microsoft, 2022).

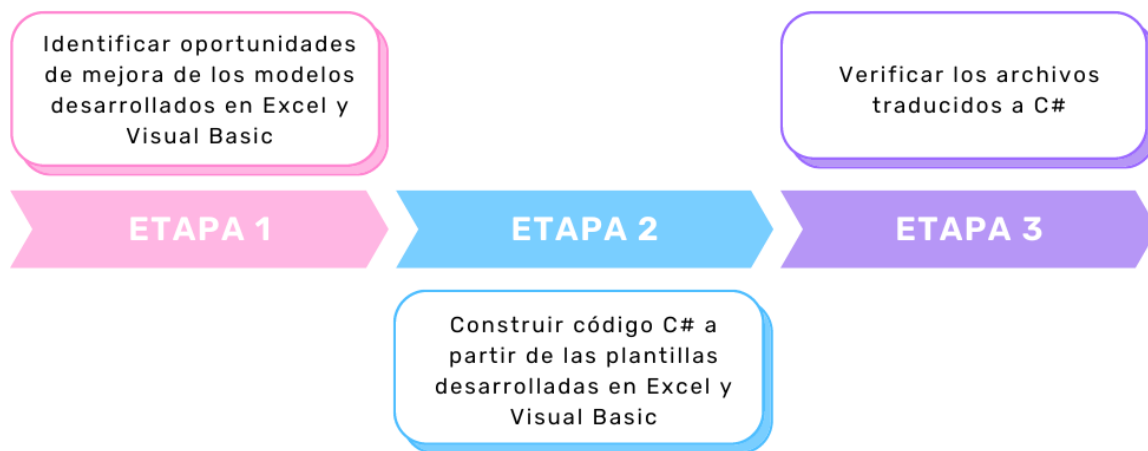
Adicionalmente el lenguaje de programación C# cuenta con otras ventajas entre las que se destacan: la creación de sesiones de colaboración en tiempo real con controles de acceso y la configuración personalizada del editor garantizando que todos los participantes mantengan coherencia con el código; facilita la implementación en la nube al proporcionar las plantillas necesarias para los tipos de aplicación comunes y emuladores locales; utiliza ASP.NET como marco de trabajo web de código abierto para crear grandes aplicaciones y servicios web; y también permite crear aplicaciones nativas enriquecidas para iOS, Android, macOS y Windows con C# en Visual Studio (Microsoft, s.f.).

3. Metodología

Con el fin de garantizar los objetivos de la práctica empresarial se establecieron tres etapas metodológicas secuenciales representadas mediante el siguiente diagrama de flujo:

Figura 4

Diagrama de flujo de las etapas establecidas para la práctica empresarial



3.1. Descripción de las etapas secuenciales realizadas durante la práctica

3.1.1. *Identificación de las oportunidades de mejora de los modelos desarrollados en Excel y Visual Basic*

El modelo creado previamente por el CDT de Gas en Excel para el sistema de medición de volumen de gas natural con tecnología placa de orificio reporta una última actualización realizada en el año 2014, por lo tanto, mediante la revisión e identificación de oportunidades de mejora se evidenció que las fuentes de variabilidad del coeficiente de descarga únicamente dependían de la variable β y el número de Reynolds, motivo por el cual se requería nuevamente de una actualización.

Se creó una nueva versión donde se actualizan las fuentes de variabilidad del coeficiente de descarga con base en el artículo titulado “The calculation of the uncertainty of the orifice-plate discharge coefficient” que presenta el cálculo de la incertidumbre del coeficiente de descarga a partir de la norma ISO 5167-2, considerando la incertidumbre que generan las condiciones de la placa sobre esta variable (Reader-Harris, Forsyth, & Boussouara, 2021).

3.1.2. Construcción del código C# a partir de las plantillas desarrolladas en Microsoft Excel y Visual Basic

El área de Desarrollo Tecnológico e Innovación del CDT de Gas diseñó y creó el modelo de estimación de incertidumbre para el sistema de medición de volumen con la tecnología de placa de orificio utilizando la herramienta de Microsoft Excel. Con el objetivo de actualizar la metodología de desarrollo se ejecutó la traducción al lenguaje de programación C#.

3.1.3. Validación y verificación de los archivos traducidos a C#

La actividad de validación y verificación se llevó a cabo mediante la comparación de los resultados obtenidos en el modelo de estimación de incertidumbre creado en Excel y los resultados generados en C# que son reportados en la consola de depuración de Microsoft Visual Studio. En esta etapa los resultados más relevantes abarcan el valor de la variable, la incertidumbre estándar, la incertidumbre expandida absoluta y relativa, y el coeficiente de sensibilidad; las diferencias se expresan como error porcentual.

Para cada una de las etapas se han planteado las actividades que se evidencian en la Tabla 1 como parte de la descripción metodológica implementada en la práctica empresarial.

Tabla 1

Descripción de las tareas y funciones realizadas durante la práctica empresarial

Etapa 1	
Actividades	Entregables
<p>Capacitación en la metodología utilizada para la creación de la plantilla en Excel y Visual Basic, su aplicación y la obtención de resultados.</p> <p>Selección y asignación del modelo de mensurando por parte del CDT de Gas que será el material de trabajo.</p> <p>Estudio de las fuentes de variabilidad.</p> <p>Evaluación de posibles ajustes a la versión inicial 1.0.</p>	<p>Informe en formato PDF al área de desarrollo tecnológico e innovación con la propuesta de ajustes que se pueden realizar a la versión 1.0.</p>
<p>Revisión de ajustes por parte del área de Desarrollo Tecnológico e Innovación.</p> <p>Implementación de ajustes aprobados y creación de una nueva versión 2.0.</p> <p>Validación de la versión 2.0.</p>	<p>Archivo Excel con la herramienta de estimación de incertidumbre actualizada.</p>
Etapa 2	
Actividades	Entregables
<p>Capacitación enfocada al funcionamiento del lenguaje de programación C# y la metodología de desarrollo implementada en la traducción del código Excel a C#.</p> <p>Desarrollo del modelo de estimación de incertidumbre en el código C# en base al realizado en Excel.</p> <p>Evaluación de la correcta ejecución del código C# por parte del área de Desarrollo Tecnológico e Innovación.</p>	<p>Código desarrollado en el lenguaje de programación C# del modelo de estimación de incertidumbre del mensurando asignado por el área de Desarrollo Tecnológico e Innovación.</p>
Etapa 3	
Actividades	Entregables
<p>Capacitación en la validación y verificación que se realiza a los códigos desarrollados en C#.</p> <p>Verificación preliminar del código C# mediante la comparación de resultados con la plantilla de Excel.</p> <p>Validación de los resultados a través de la variación de condiciones de entrada y fuentes de variabilidad de forma paralela en C# y Excel.</p> <p>Elaboración de un archivo Excel donde se reportan los errores que se obtienen en %.</p> <p>Si el error supera el criterio porcentual se considera que las diferencias entre el Excel y C# son significativas por lo que el código debe proceder a ajustes y corrección.</p>	<p>Archivo Excel con el reporte de los errores que se obtuvieron después de la validación y verificación elaborada mediante la comparación entre las herramientas de estimación de incertidumbre desarrolladas en Excel y las presentadas en el código C#.</p> <p>Nueva versión del código C# validado y verificado que cumple el criterio de error en el % establecido.</p>

3.2. Descripción de las actividades requeridas para iniciar el proceso de formulación del plan de trabajo de grado

Además de la práctica empresarial, se llevaron a cabo previamente actividades guiadas por el Grupo de Investigación en Fluidos y Energía (GIFE), en modalidad virtual a través del sitio web de capacitaciones virtuales del CDT de Gas, con el objetivo de brindar los conocimientos necesarios para la implementación de los conceptos teóricos y prácticos relacionados con la metrología y el procedimiento para la estimación de incertidumbre. Se ofrecieron dos cursos virtuales: el primero denominado “Fundamentos de Metrología” y el segundo “Estimación de la Incertidumbre de Medición”.

El primer curso denominado “Fundamentos de Metrología”, con una intensidad de seis horas, se enfocó en las definiciones básicas de la metrología, las organizaciones metrológicas, la infraestructura nacional de calidad, el sistema internacional de unidades, y generalidades de medición e incertidumbre. El segundo curso titulado “Estimación de la Incertidumbre de Medición”, con una intensidad de 40 horas, abarcó los fundamentos de estadística e incertidumbre, y los métodos GUM y Monte Carlo para estimar la incertidumbre. Como evidencia se adjuntan en el apéndice A los certificados correspondientes a cada curso.

3.3. Descripción de la capacitación recibida del CDT de Gas durante la práctica empresarial

La capacitación recibida del CDT de Gas se planeó con el fin de abarcar dos ámbitos fundamentales para desempeñar de forma correcta la práctica empresarial. El primer ámbito, dirigido por el Grupo de Investigación en Fluidos y Energía, se basa en la enseñanza de los conceptos teórico-prácticos respecto a la medición de hidrocarburos gaseosos el cual se llevó a cabo mediante el curso denominado “Medición de Cantidad y Calidad de Gas Natural”. Como

evidencia se adjunta en el apéndice B el certificado correspondiente del curso.

El segundo ámbito se realizó con la orientación de un profesional en especialidades técnicas del área de Desarrollo Tecnológico e Innovación. Se brindó la información necesaria sobre la metodología de desarrollo que la organización ha venido implementando para la actualización del modelo de estimación de incertidumbre en la medición de hidrocarburos gaseosos, enfocados a sistemas de medición por placa de orificio. La capacitación se realizó mediante sesiones virtuales semanales de cuatro horas durante el primer mes de práctica empresarial en la plataforma Google Meet.

4. Resultados

4.1. Primera etapa metodológica

4.1.1. *Modelo de estimación de incertidumbre para la medición de volumen de gas natural implementando la tecnología placa de orificio*

Para este caso el mensurando es el volumen de gas por día en condiciones base. El siguiente modelo matemático basado en la norma AGA 3.1 permite determinar el caudal cuando se utiliza la tecnología placa de orificio e identificar las magnitudes de entrada. La ecuación se reporta en condiciones estándar como condiciones base de referencia para la gravedad específica del gas real, e incorpora 14.65 psi y 60 °F en su constante numérica (American Gas Association and American Petroleum Institute, 2003, pág. 6):

$$V_b = 24 * 7751,709 * C_d(FT) * E_v * Y * d^2 \sqrt{\frac{P_f * Z_b * h_w}{G_r * Z_f * T_f}} \quad (\text{Ec.9})$$

Donde V_b es el volumen de gas por día en condiciones base, $C_d(FT)$ es el coeficiente de descarga, E_v es el factor de velocidad de aproximación, Y es el factor de expansión, d es el

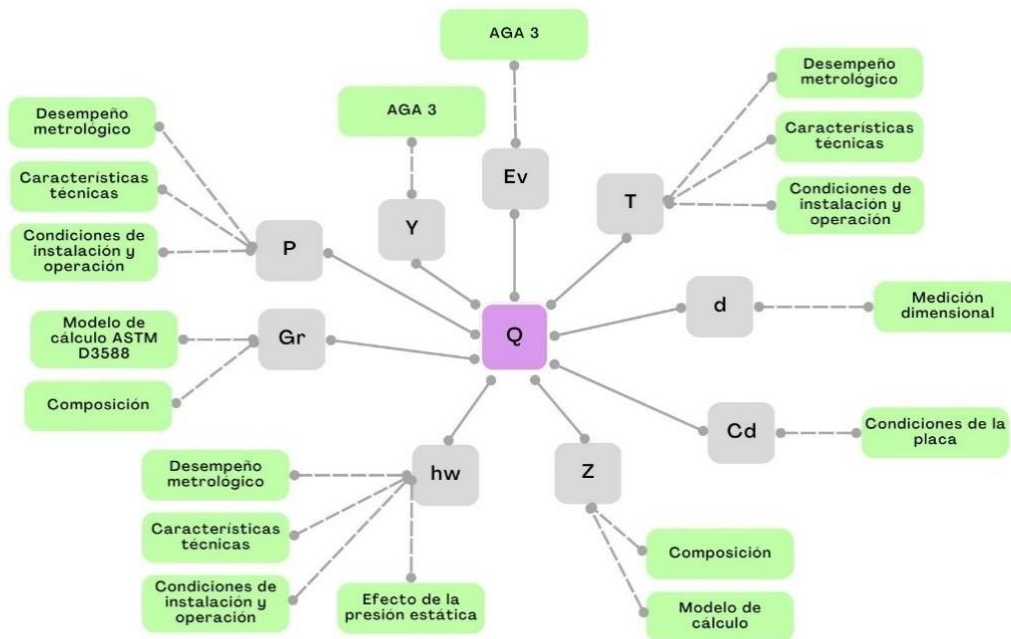
diámetro del orificio de la placa calculado a la temperatura de flujo, P_f es la presión del flujo, Z_b es la compresibilidad a condiciones base, h_w es la presión diferencial del orificio, G_r es la gravedad específica del gas real, Z_f es la compresibilidad en las condiciones de flujo y T_f es la temperatura de flujo.

4.1.2. Fuentes de variabilidad asociadas al modelo de estimación de incertidumbre

A continuación se observa un diagrama de árbol con la estructura del modelo de estimación de incertidumbre. Iniciando de lo general (fuentes de variabilidad) a lo más específico (mensurando).

Figura 5

Fuentes de variabilidad y magnitudes de entrada del modelo de estimación de incertidumbre



Nota. Adaptado de la base de datos del Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas.

A continuación en la Tabla 2 y 3 se detallan las fuentes de variabilidad correspondientes a las magnitudes de entrada presión (P_f), temperatura (T_f), diferencial de presión (h_w) y el coeficiente de descarga (C_d).

Tabla 2

Fuentes de variabilidad para la presión, temperatura y diferencial de presión

Presión	
Desempeño metrológico	Calibración del transmisor Desviación por carencia de ajuste Presión atmosférica
Características técnicas	Estabilidad del transmisor Efectos de interferencia radio frecuencia Efectos de temperatura ambiente Efectos de vibración en el transmisor de presión Efectos de suministro de energía en el transmisor de presión
Condiciones de instalación y operación	Longitud y trazados de la línea manométrica Condensados en la línea de presión Variación de la presión del fluido Técnica de promediación de presión
Temperatura	
Desempeño metrológico	Calibración del sensor/transmisor Desviación por carencia de ajuste
Características técnicas	Estabilidad en el tiempo del transmisor de temperatura Efectos de radio frecuencia en el transmisor de temperatura Efecto de temperatura ambiente Efectos de vibración en el transmisor de temperatura Efectos de suministro de energía en el transmisor de temperatura
Condiciones de instalación y operación	Estabilidad del sensor de temperatura Variación de la temperatura del fluido Técnica de promediación de temperatura Efectos de instalación (termo pozo)
Diferencial de presión	
Desempeño metrológico	Calibración del transmisor Desviación por carencia de ajuste Presión atmosférica
Características técnicas	Estabilidad del transmisor Efectos de interferencia radio frecuencia Efectos de temperatura ambiente Efectos de vibración en el transmisor de presión Efectos de suministro de energía en el transmisor de presión Efecto de la presión estática
Condiciones de instalación y operación	Longitud y trazados de la línea manométrica Condensados en la línea de presión Variación de la presión del fluido Técnica de promediación de presión

Nota. Adaptado de la base de datos del Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas.

4.1.3. Evaluación de posibles ajustes a la versión original del modelo de incertidumbre desarrollado en Excel para la tecnología placa de orificio

El modelo creado previamente por el CDT de Gas en Excel para el sistema de medición de volumen de gas natural con tecnología placa de orificio reporta una última actualización realizada en el año 2014.

Figura 6

Actualizaciones realizadas en Microsoft Excel del modelo de estimación de incertidumbre

Fecha	Descripción de la Actualización	Versión	Actualización	Vigencia	Ejecutó	Aprobó
14/11/2014	Elaboración e implementación de plantilla de cálculo.	8.1.1	0	Actual	Odair Contreras	Henry Abril

Nota. Adaptado del documento Excel elaborado por el Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas.

Mediante la revisión e identificación de oportunidades de mejora se evidenció el reporte de dos fuentes de variabilidad del coeficiente de descarga que dependían de la variable β y el número de Reynolds. Se observó que no especificaban características o condiciones de la placa de orificio y tampoco la fuente de información, motivo por el cual se realizó la propuesta de actualización.

Figura 7

Especificaciones del coeficiente de descarga

	Magnitud	Símbolo	Fuente de información	Valor	Inc. Original	
1.2.1	Coeficiente de descarga	Cd	-	6.027403969E-01	0.22%	-
	Dependiente de B (B>0,175)			0.00235	0.2200%	-
	Dependiente de Re			1.00995	1.004	-

	Magnitud	Tipo Distribución	Inc. Estándar	Coef. Sensibilidad	Contribución	Cuadrado de la contribución	Porcentaje de contribución
1.2.1	Coeficiente de descarga	Normal	0.0013	1.37E+07	1.82E+04	3.32E+08	25.24
	Dependiente de B (B>0,175)	-	-	-	-	-	-
	Dependiente de Re	-	-	-	-	-	-

Nota. Adaptado del documento Excel elaborado por el Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas.

4.1.4. Implementación de los ajustes aprobados por parte del área de Desarrollo Tecnológico e Innovación

Se creó una nueva versión donde se actualizan las fuentes de variabilidad del coeficiente de descarga con base en el artículo titulado “The calculation of the uncertainty of the orifice-plate discharge coefficient” que presenta el cálculo de la incertidumbre del coeficiente de descarga a partir de la norma ISO 5167-2, y reporta la incertidumbre que generan las condiciones de la placa sobre esta variable (Reader-Harris, Forsyth, & Boussouara, 2021). Las fuentes de variabilidad que exponen en el artículo son las siguientes:

Tabla 3

Fuentes de variabilidad del coeficiente de descarga

Coeficiente de descarga	
Condiciones de la placa	Incertidumbre de base para calcular la rugosidad de la tubería y la nitidez del borde
	Rugosidad de la tubería
	Efectos de instalación
	Filo de la placa
	Flexión de placas en la fabricación
	Flexión de placas debido a la presión diferencial
	Excentricidad de la placa
	Pasos en el tamaño de la tubería

Nota. Adaptado de (Reader-Harris, Forsyth, & Boussouara, 2021).

En la Tabla 4 del artículo se presenta el valor porcentual de la incertidumbre expandida de cada una de las fuentes de variabilidad cuyo valor depende del valor de la variable β . Los valores de incertidumbre expandida porcentuales calculados para la ecuación de Reader-Harris/Gallagher(1998) se reportan a continuación en la Tabla 4.

Tabla 4

Incertidumbre expandida porcentual de las fuentes de variabilidad del coeficiente de descarga

Fuentes de variabilidad	Distribución	Variable β					
		0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.67
Incertidumbre de base para calcular la rugosidad de la tubería y la nitidez del borde	Normal	0.261	0.261	0.261	0.261	0.261	0.315
Rugosidad de la tubería	Rectangular	0.1	0.15	0.2	0.25	0.25	0.31
Efectos de instalación	Rectangular	0.255	0.24	0.23	0.127	0.127	0.136
Filo de la placa	Rectangular	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Flexión de placas en la fabricación	Rectangular	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Flexión de placas debido a la presión diferencial	Rectangular	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Excentricidad de la placa	Rectangular	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
Pasos en el tamaño de la tubería	Rectangular	0.003	0.007	0.018	0.039	0.068	0.1

Nota. Adaptado de (Reader-Harris, Forsyth, & Boussouara, 2021)

La actualización consiste en cambiar las fuentes de variabilidad dependientes de β y Reynolds por las condiciones de la placa especificadas en el artículo. Para incluir las nuevas fuentes de variabilidad se eliminaron las anteriores, se incluyeron las nuevas celdas en Excel y se realizó en Visual Basic el código respectivo para que, cuando se calcule la incertidumbre, se ingresen los valores de forma automática en la hoja Excel dependiendo el valor de β que se presente.

Figura 8

Código Visual Basic con los componentes de incertidumbre expandida porcentuales calculados para la ecuación de Reader-Harris/Gallagher (1998)

```

If Sheets("Inc_V_dia").Range("H112").Value >= 0.2 And Sheets("Inc_V_dia").Range("H112").Value < 0.3 Then
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H26").Value = 0.261 'Incertidumbre base para calcular la rugosidad de la tubería y la nitidez del borde'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H27").Value = 0.1 'Rugosidad de la tubería'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H28").Value = 0.255 'Efectos de instalación'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H29").Value = 0.15 'Filo de la placa'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H30").Value = 0.1 'Flexión de placas en la fabricación'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H31").Value = 0.1 'Flexión de placas debido a la presión diferencial'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H32").Value = 0.09 'Excentricidad de la placa'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H33").Value = 0.003 'Pasos en el tamaño de la tubería'

ElseIf Sheets("Inc_V_dia").Range("H112").Value >= 0.3 And Sheets("Inc_V_dia").Range("H112").Value < 0.4 Then
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H26").Value = 0.261 'Incertidumbre base para calcular la rugosidad de la tubería y la nitidez del borde'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H27").Value = 0.15 'Rugosidad de la tubería'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H28").Value = 0.24 'Efectos de instalación'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H29").Value = 0.15 'Filo de la placa'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H30").Value = 0.1 'Flexión de placas en la fabricación'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H31").Value = 0.1 'Flexión de placas debido a la presión diferencial'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H32").Value = 0.09 'Excentricidad de la placa'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H33").Value = 0.007 'Pasos en el tamaño de la tubería'

ElseIf Sheets("Inc_V_dia").Range("H112").Value >= 0.4 And Sheets("Inc_V_dia").Range("H112").Value < 0.5 Then
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H26").Value = 0.261 'Incertidumbre base para calcular la rugosidad de la tubería y la nitidez del borde'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H27").Value = 0.2 'Rugosidad de la tubería'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H28").Value = 0.23 'Efectos de instalación'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H29").Value = 0.15 'Filo de la placa'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H30").Value = 0.1 'Flexión de placas en la fabricación'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H31").Value = 0.1 'Flexión de placas debido a la presión diferencial'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H32").Value = 0.09 'Excentricidad de la placa'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H33").Value = 0.0018 'Pasos en el tamaño de la tubería'

ElseIf Sheets("Inc_V_dia").Range("H112").Value >= 0.5 And Sheets("Inc_V_dia").Range("H112").Value < 0.6 Then
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H26").Value = 0.261 'Incertidumbre base para calcular la rugosidad de la tubería y la nitidez del borde'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H27").Value = 0.25 'Rugosidad de la tubería'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H28").Value = 0.22 'Efectos de instalación'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H29").Value = 0.15 'Filo de la placa'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H30").Value = 0.1 'Flexión de placas en la fabricación'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H31").Value = 0.1 'Flexión de placas debido a la presión diferencial'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H32").Value = 0.09 'Excentricidad de la placa'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H33").Value = 0.039 'Pasos en el tamaño de la tubería'

ElseIf Sheets("Inc_V_dia").Range("H112").Value >= 0.6 And Sheets("Inc_V_dia").Range("H112").Value < 0.67 Then
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H26").Value = 0.261 'Incertidumbre base para calcular la rugosidad de la tubería y la nitidez del borde'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H27").Value = 0.25 'Rugosidad de la tubería'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H28").Value = 0.22 'Efectos de instalación'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H29").Value = 0.15 'Filo de la placa'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H30").Value = 0.1 'Flexión de placas en la fabricación'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H31").Value = 0.1 'Flexión de placas debido a la presión diferencial'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H32").Value = 0.09 'Excentricidad de la placa'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H33").Value = 0.068 'Pasos en el tamaño de la tubería'

ElseIf Sheets("Inc_V_dia").Range("H112").Value = 0.67 Then
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H26").Value = 0.315 'Incertidumbre base para calcular la rugosidad de la tubería y la nitidez del borde'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H27").Value = 0.31 'Rugosidad de la tubería'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H28").Value = 0.235 'Efectos de instalación'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H29").Value = 0.15 'Filo de la placa'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H30").Value = 0.1 'Flexión de placas en la fabricación'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H31").Value = 0.1 'Flexión de placas debido a la presión diferencial'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H32").Value = 0.09 'Excentricidad de la placa'
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H33").Value = 0.1 'Pasos en el tamaño de la tubería'

Else
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H26").Value = "El rango establecido para Betha es de 0.2 a 0.67"
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H27").Value = "El rango establecido para Betha es de 0.2 a 0.67"
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H28").Value = "El rango establecido para Betha es de 0.2 a 0.67"
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H29").Value = "El rango establecido para Betha es de 0.2 a 0.67"
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H30").Value = "El rango establecido para Betha es de 0.2 a 0.67"
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H31").Value = "El rango establecido para Betha es de 0.2 a 0.67"
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H32").Value = "El rango establecido para Betha es de 0.2 a 0.67"
    Sheets("Inc_V_dia").Range("H33").Value = "El rango establecido para Betha es de 0.2 a 0.67"

End If
    
```

Nota. Adaptado de documento Excel elaborado por el Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas.

4.1.5. Validación de los ajustes implementados

A continuación podemos observar el resultado final que se obtuvo mediante la actualización de las fuentes de variabilidad del coeficiente de descarga para un valor de β igual a

0.500012, un diámetro de orificio de la placa igual a 2.000148 y un diámetro de tubo equivalente a 4.000198.

Figura 9

Actualización de las especificaciones del coeficiente de descarga

	Magnitud	Símbolo	Fuente de información	Valor	Inc. Original	
1.2.1	Coeficiente de descarga	Cd	-	6.027403969E-01	-	-
1.2.1.1	Incertidumbre de base para calcular la rugosidad de la tubería y la nitidez del borde	UBase-Cd	Art. The calculation of the uncertainty of the orifice-plate discharge coefficient Tabla 4		0.261	%
1.2.1.2	Rugosidad de la tubería	URugTub-Cd	Art. The calculation of the uncertainty of the orifice-plate discharge coefficient Tabla 4		0.25	%
1.2.1.3	Efectos de instalación	UEfectInst-Cd	Art. The calculation of the uncertainty of the orifice-plate discharge coefficient Tabla 4		0.22	%
1.2.1.4	Filo de la placa	UFiloPla-Cd	Art. The calculation of the uncertainty of the orifice-plate discharge coefficient Tabla 4		0.15	%

	Magnitud	Tipo Distribución	Inc. Estándar	Coef. Sensibilidad	Contribución	Cuadrado de la contribución	Porcentaje de contribución	
1.2.1	Coeficiente de descarga	Normal	0.0016	-	1.37E+07	2.20E+04	4.86E+08	41.20
1.2.1.1	Incertidumbre de base para calcular la rugosidad de la tubería y la nitidez del borde	Normal (k = 2)	0.000787	-		1.08E+04	1.16E+08	23.86
1.2.1.2	Rugosidad de la tubería	Rectangular	0.000870	-		1.19E+04	1.42E+08	29.19
1.2.1.3	Efectos de instalación	Rectangular	0.000766	-		1.05E+04	1.10E+08	22.61
1.2.1.4	Filo de la placa	Rectangular	0.000522	-		7.15E+03	5.11E+07	10.51

	Magnitud	Símbolo	Fuente de información	Valor	Inc. Original	
1.2.1.5	Flexión de placas en la fabricación	UFlexFab-Cd	Art. The calculation of the uncertainty of the orifice-plate discharge coefficient Tabla 4		0.10	%
1.2.1.6	Flexión de placas debido a la presión diferencial	UFlexPreDif-Cd	Art. The calculation of the uncertainty of the orifice-plate discharge coefficient Tabla 4		0.10	%
1.2.1.7	Excentricidad de la placa	Uexc-Cd	Art. The calculation of the uncertainty of the orifice-plate discharge coefficient Tabla 4		0.09	%
1.2.1.8	Pasos en el tamaño de la tubería	Upasos-Cd	Art. The calculation of the uncertainty of the orifice-plate discharge coefficient Tabla 4		0.039	%

	Magnitud	Tipo Distribución	Inc. Estándar	Coef. Sensibilidad	Contribución	Cuadrado de la contribución	Porcentaje de contribución	
1.2.1.5	Flexión de placas en la fabricación	Rectangular	0.000348	-		4.76E+03	2.27E+07	4.67
1.2.1.6	Flexión de placas debido a la presión diferencial	Rectangular	0.000348	-		4.76E+03	2.27E+07	4.67
1.2.1.7	Excentricidad de la placa	Rectangular	0.000313	-		4.29E+03	1.84E+07	3.78
1.2.1.8	Pasos en el tamaño de la tubería	Rectangular	0.000136	-		1.86E+03	3.45E+06	0.71

Nota. Adaptado de documento Excel elaborado por el Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas.

Adicionalmente se calculó la incertidumbre estándar, la contribución, el cuadrado de la contribución y el porcentaje de contribución de la siguiente forma:

$$Inc. Est\acute{a}ndar = RAIZ[SUMA.CUADRADOS(FI)] \quad (Ec.10)$$

$$Inc. Est\acute{a}ndar (FIN) = \frac{\left(\frac{Inc. Original (FIN) * Cd}{100}\right)}{2} \quad (Ec.11)$$

$$Inc. Est\acute{a}ndar (FIR) = \frac{\left(\frac{Inc. Original (FIR) * Cd}{100}\right)}{\sqrt{3}} \quad (Ec.12)$$

$$Contribuci\acute{o}n = Inc. Est\acute{a}ndar (FI) * Coeficiente de sensibilidad \quad (Ec.13)$$

$$Cuadrado de la contribuci\acute{o}n = (Contribuci\acute{o}n)^2 \quad (Ec.14)$$

$$Porcentaje de la contribuci\acute{o}n = \frac{FI}{\sum(FI)} * 100 \quad (Ec.15)$$

Donde *FI* hace referencia a las fuentes de variabilidad, *FIN* representa las fuentes de variabilidad con distribuci\acute{o}n normal ($k = 2$), *FIR* son las fuentes de variabilidad con distribuci\acute{o}n rectangular ($k = \sqrt{3}$), $\sum(FI)$ indica la suma de las fuentes de variabilidad y *Cd* el valor del coeficiente de descarga.

4.2. Segunda etapa metodol\ogica

4.2.1. C\odigo desarrollado en el lenguaje de programaci\on C# del modelo de estimaci\on de incertidumbre

Teniendo como base de informaci\on el modelo de estimaci\on de incertidumbre, desarrollado en Microsoft Excel por el CDT de Gas, para la medici\on de volumen de gas natural implementando la tecnolog\ia placa de orificio, se realiz\o la traducci\on de la hoja de c\alculo y el lenguaje de programaci\on Visual Basic al lenguaje de programaci\on C#.

Por motivos de confidencialidad no es posible divulgar en este trabajo de grado, bajo la modalidad de pr\actica empresarial, el modelo de estimaci\on de incertidumbre desarrollado por la empresa en Microsoft Excel y el c\odigo realizado en C# que contiene la traducci\on del modelo de

estimación de incertidumbre para placa de orificio. Estos códigos fuente son considerados información confidencial por la Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas, motivo por el cual bajo la supervisión del área de Desarrollo Tecnológico e Innovación fueron seleccionados algunos fragmentos que pueden ser evidenciados en este documento.

El modelo diseñado previamente por el CDT de Gas en Microsoft Excel consiste en el desarrollo del procedimiento de cálculo de la incertidumbre estándar, la incertidumbre expandida y la incertidumbre relativa del volumen de gas por día en condiciones base [$ft^3/día$] a partir de la determinación de las magnitudes de entrada y fuentes de variabilidad mencionadas en la Tabla 2 y Tabla 3.

El CDT de Gas contiene una base de datos con la incertidumbre original de cada una de las fuentes de variabilidad donde se clasifica este valor como Bueno, Regular o Malo dependiendo las condiciones de aplicación de la placa de orificio, a partir de este valor se calcula la incertidumbre estándar para cada fuente de variabilidad dependiendo el tipo de distribución. Posteriormente se aplica la ecuación del método GUM (Ec.1) para determinar la incertidumbre estándar de las magnitudes de entrada a partir de las incertidumbres estándar de las fuentes de variabilidad, también se calcula el coeficiente de sensibilidad y el porcentaje de contribución. Finalmente se estima la incertidumbre estándar del volumen de gas por día en condiciones base mediante la expresión del método GUM (Ec.1) a partir de las incertidumbres de las magnitudes de entrada y el modelo de medición (Ec.9).

Figura 10

Resultados de las magnitudes de entrada y fuentes de variabilidad del modelo de estimación de incertidumbre para placa de orificio diseñado en Microsoft Excel

ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE ASOCIADA AL SISTEMA DE MEDICIÓN DE ENTREGA DE GAS									
	Magnitud	Símbolo	Valor	Inc. Original	Tipo Distribución	Inc. Estándar	Coef. Sensibilidad	Aporte $u_i(y) \equiv c_i u(x_i)$	Porcentaje de contribución
1	Coeficiente de descarga	Cd	0.6027404 °F	0.00161	Normal	0.0016102	13688511	22041.7537	41.197%
2	Diametro del orificio	d	2.0001480 Psig	0.00010	Normal	0.0001000	8250008	825.0008	0.058%
3	Factor de velocidad de aproximación	Ev	1.0327989 --	0.00000	Normal	0.0000033	7988601	26.6288	0.00006%
4	Coeficiente de expansión	Y	0.9987149 --	0.00015	Normal	0.0001545	8261236	1276.6603	0.138%
5	Temperatura del fluido	Tf	76 --	0.36010	Normal	0.3601042	-7701	2773.2392	0.652%
6	Presión estática	Pf	933 --	3.37378	Normal	3.3737821	4422	14917.3581	18.869%
ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE ASOCIADA AL SISTEMA DE MEDICIÓN DE ENTREGA DE GAS									
	Magnitud	Símbolo	Valor	Inc. Original	Tipo Distribución	Inc. Estándar	Coef. Sensibilidad	Aporte $u_i(y) \equiv c_i u(x_i)$	Porcentaje de contribución
7	Diferencial de presión	Dp	100 --	0.09975	Normal	0.0997497	41253	4114.9832	1.436%
8	Factor de compresibilidad a condiciones de flujo	Zf	0.8582623 --	0.00153	Normal	0.0015262	-4806583	7335.7431	4.563%
9	Factor de compresibilidad a condiciones base	Zb	0.9974471 --	0.00050	Normal	0.0004987	4135868	2062.6547	0.361%
10	Gravedad específica	Gr	0.6366815 --	0.00303	Normal	0.0030320	-6479393	19645.2636	32.726%
11	Computador de flujo	-	- --	30.55050	Normal	30.5505046	1	30.5505	0.00008%

Nota. Adaptado del documento Excel elaborado por el Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas.

Figura 11

Resultados del volumen de gas por día en condiciones base del modelo de estimación de incertidumbre para placa de orificio diseñado en Microsoft Excel

Descripción	Valor	Unid
Incertidumbre Combinada	34341.034	ft ³ /día
Factor de Cobertura	1.964	-
Resultado de la medición	8250618.811	ft ³ /día
Incertidumbre Expandida	67435.7235	ft ³ /día
Incertidumbre Relativa	0.817	%

Nota. Adaptado del documento Excel elaborado por el Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas.

La traducción a C# inicia estableciendo los espacios de nombres que representan un método de jerarquía para organizar las bibliotecas y los programas de C#, a la vez que se crea un espacio de nombre para controlar los nombres de clase y métodos. Las clases que se crean en la programación del modelo de estimación de incertidumbre se clasifican en datos de entrada y el tipo de fuente de variabilidad como: desempeño metrológico, características técnicas, condiciones de operación e instalación y condiciones de la placa. En cada una de las clases se declaran las variables para poder realizar el cálculo de la metodología GUM, incluyendo: fuentes de variabilidad con su respectivo valor dependiendo la clasificación establecida por el CDT de Gas (Bueno, Regular o Malo); magnitudes de entrada con sus respectivas fórmulas de cálculo basadas en la normativa AGA 3; el mensurando con su ecuación basada en la normativa AGA 3; las constantes presentes en las ecuaciones; la composición del gas natural; y las variables que representan la incertidumbre que será estimada.

Posteriormente se validan los datos de entrada estableciendo dos condiciones: los datos de entrada no pueden ser negativos y la composición no puede ser negativa. Al cumplir las condiciones es posible iniciar el cálculo de la metodología GUM, para esto se crean métodos que son un bloque de código que contiene una serie de instrucciones (Microsoft, 2022) y permite establecer funciones que dependen de las variables declaradas.

Cada método que se crea busca representar las ecuaciones presentes en la metodología GUM permitiendo calcular: incertidumbre estándar de cada una de las fuentes de variabilidad (Ec.1); coeficientes de sensibilidad de las magnitudes de entrada; incertidumbre estándar de las magnitudes de entrada (Ec.1); valor de contribución de las magnitudes de entrada (Ec.13); incertidumbre del mensurando (Ec.1) y la incertidumbre combinada del mensurando (Ec.2).

Finalmente se establece la estructura en que se desean presentar y el programa muestra los resultados en la consola de depuración de Microsoft Visual Studio.

Figura 12

Resultados del modelo de estimación de incertidumbre para placa de orificio realizando la traducción de la herramienta Microsoft Excel a C#

```
GAS VOLUME PER DAY AT BASE CONDITIONS:
Model: Natural Gas measurement with orifice plate meter
Calculated Vb: 8250618,5 ft3/day
Combined Relative Uncertainty Value: 27976,81 ft3/day
Expanded Absolute Uncertainty Value: 54989,406 ft3/day
Expanded Relative Uncertainty Value: 0,6664883 %

Tf Ustd:0,36010417 Ci: -7701,214 U(y): 2773,2393 ft3/day Contribution: 0,98260343 %
Contributions to Tf Uncertainty:
  uTf Ustd: 0,36010417 U(y): -2773,2393 ft3/day Contribution: 100 %

Pf Ustd:3,3737822 Ci: 4421,5537 U(y): 14917,359 ft3/day Contribution: 28,430696 %
Contributions to Pf Uncertainty:
  uPf Ustd: 3,3737822 U(y): 14917,359 ft3/day Contribution: 100 %

DP Ustd:0,09974969 Ci: 41253,098 U(y): 4114,984 ft3/day Contribution: 2,163415 %
Contributions to DP Uncertainty:
  uDP Ustd: 0,09974969 U(y): 4114,984 ft3/day Contribution: 100 %

G Ustd:0,0008076042 Ci: -6479393 U(y): 5232,785 ft3/day Contribution: 3,4983993 %
Contributions to G Uncertainty:
  uG Ustd: 0,0008076042 U(y): -5232,785 ft3/day Contribution: 100 %

Microsoft Visual Studio Debug Console

Dplate Ustd:0,0001 Ci: 8250008 U(y): 825,0008 ft3/day Contribution: 0,08695856 %
Contributions to Dplate Uncertainty:
  uDplate Ustd: 0,0001 U(y): 825,0008 ft3/day Contribution: 100 %

Y Ustd:0,00015453625 Ci: 8261235,5 U(y): 1276,6603 ft3/day Contribution: 0,20823528 %
Contributions to Y Uncertainty:
  uY Ustd: 0,00015453625 U(y): 1276,6603 ft3/day Contribution: 100 %

Ev Ustd:3,3333529E-06 Ci: 7988601,5 U(y): 26,628828 ft3/day Contribution: 9,059572E-05 %
Contributions to Ev Uncertainty:
  uEv Ustd: 3,3333529E-06 U(y): 26,628828 ft3/day Contribution: 100 %

CD Ustd:0,0016102374 Ci: 13688511 U(y): 22041,752 ft3/day Contribution: 62,07201 %
Contributions to CD Uncertainty:
  uCD Ustd: 0,0016102374 U(y): 22041,752 ft3/day Contribution: 100 %

Zf Ustd:0,0008260009 Ci: -4806584 U(y): 3970,2427 ft3/day Contribution: 2,013899 %
Contributions to Zf Uncertainty:
  uZf Ustd: 0,0008260009 U(y): -3970,2427 ft3/day Contribution: 100 %

Zb Ustd:0,0004987236 Ci: 4135868,2 U(y): 2062,655 ft3/day Contribution: 0,5435717 %
Contributions to Zb Uncertainty:
  uZb Ustd: 0,0004987236 U(y): 2062,655 ft3/day Contribution: 100 %

FC Ustd:30,550505 Ci: 1 U(y): 30,550505 ft3/day Contribution: 0,00011924504 %
Contributions to FC Uncertainty:
  AlgAccFC Ustd: 20 U(y): 20 ft3/day Contribution: 42,85714 %
  DevFC Ustd: 23,094011 U(y): 23,094011 ft3/day Contribution: 57,14286 %
  PulsRegFC Ustd: 0 U(y): 0 ft3/day Contribution: 0 %
```

Del apéndice C al H se evidencian los resultados del procedimiento realizado en C# para estimar la incertidumbre de cada una de las magnitudes de entrada.

4.3. Tercera etapa metodológica

4.3.1. Validación y verificación del código C# elaborado a partir del archivo Excel diseñado para el modelo de estimación de incertidumbre

Con base en los resultados obtenidos en Microsoft Excel y el código C# se realiza la validación y verificación, expuesta en la Figura 13, en el programa Microsoft Excel. El procedimiento consta en comparar las variables calculadas más relevantes de cada una de las fuentes de variabilidad y magnitudes de entrada, incluidas en el modelo de estimación de incertidumbre implementado para el volumen de gas natural a condiciones base que se mide por día (mensurando). Las variables seleccionadas para la comparación de magnitudes de entrada fueron las siguientes: valor, incertidumbre estándar, aporte a la incertidumbre combinada del mensurando, coeficiente de sensibilidad y contribución; para la comparación del mensurando se consideraron: incertidumbre combinada (Ec.2), incertidumbre expandida (Ec.4), incertidumbre relativa (Ec.5) y el resultado de medición (Ec.9).

Las casillas resaltadas en verde reportan las variables que cumplieron el criterio porcentual establecido para el error que podía presentar la traducción del lenguaje de programación, aquellas casillas resaltadas en rojo no cumplen el criterio porcentual. Se hace énfasis en la gravedad específica y el factor de compresibilidad a condiciones de flujo, variables que presentan una diferencia considerable en la estimación de incertidumbre estándar y por ende en el aporte a la incertidumbre combinada del mensurando y la contribución. Es importante resaltar que debido a la diferencia de las dos magnitudes de entrada mencionadas anteriormente, las contribuciones de

todas las magnitudes de entrada y el resultado del volumen de gas por día no cumplen el criterio porcentual.

Figura 13

Validación de los resultados obtenidos en Microsoft Excel y C#

Validación de la incertidumbre del volumen del gas por día en condiciones base					
Validación mensurando					
Caudal volumétrico del gas por día en condiciones base					
Método	U combinada [ft ³ /día]	U expandida [ft ³ /día]	U relativa [%]	Resultado de medición [ft ³ /día]	
Excel	34341.034	67435.72354	0.817	8250618.811	
C#	27976.810	54989.406	0.666	8250618.500	
%Error	18.532%	18.4566%	18.457%	0.311%	
Validación magnitud de entrada					
Temperatura					
Método	Valor [°F]	U estándar [°F]	Aporte [ft3/día]	Coefficiente de sensibilidad	Contribución [%]
Excel	76	0.3601042	2773.239	-7701.214	0.6521506
C#	76	0.3601042	2773.239	-7701.214	0.98260
%Error	0.00000%	-0.00001%	0.00000%	0.00000%	-0.33045%
Validación magnitud de entrada					
Factor de compresibilidad a condiciones de flujo					
Método	Valor	U estándar	Aporte [ft3/día]	Coefficiente de sensibilidad	Contribución [%]
Excel	0.8582623	0.0015262	7335.743	-4806583	4.5631159
C#	0.8582622	0.0008260	3970.243	-4806584	2.0138990
%Error	0.00001%	45.87812%	45.87811%	-0.00001%	2.54922%
Validación magnitud de entrada					
Factor de compresibilidad a condiciones base					
Método	Valor	U estándar	Aporte [ft3/día]	Coefficiente de sensibilidad	Contribución [%]
Excel	0.9974471	0.0004987	2062.655	4135868	0.3607666
C#	0.9974471	0.0004987	2062.655	4135868	0.5435717
%Error	0.00000%	-0.00001%	0.00000%	-0.00001%	-0.18281%
Validación magnitud de entrada					
Presión estática					
Método	Valor [psig]	U estándar [psig]	Aporte [ft3/día]	Coefficiente de sensibilidad	Contribución [%]
Excel	933	3.3737821	14917.358	4421.5535	18.8693569
C#	933	3.3737822	14917.359	4421.5537	28.430610
%Error	0.00000%	0.00000%	-0.00001%	0.00000%	-9.56125%
Validación magnitud de entrada					
Presión diferencial					
Método	Valor [inH2O]	U estándar [inH2O]	Aporte [ft3/día]	Coefficiente de sensibilidad	Contribución [%]
Excel	100	0.0997497	4114.983	41253.094	1.4358511
C#	100	0.0997497	4114.984	41253.098	2.1634150
%Error	0.00000%	0.00000%	-0.00002%	-0.00001%	-0.72756%
Validación magnitud de entrada					
Densidad relativa					
Método	Valor	U estándar	Aporte [ft3/día]	Coefficiente de sensibilidad	Contribución [%]
Excel	0.6366815	0.0030320	19645.264	-6479393	32.7257034
C#	0.6366815	0.0008076	5232.785	-6479393	3.4983993
%Error	0.00000%	73.36363%	73.36363%	0.00000%	29.22730%
Validación magnitud de entrada					
Coefficiente de descarga					
Método	Valor	U estándar	Aporte [ft3/día]	Coefficiente de sensibilidad	Contribución [%]
Excel	0.6027404	0.0016102	22041.754	13688511	41.1969971
C#	0.6027404	0.0016102	22041.752	13688511	62.072010
%Error	0.00000%	0.00000%	0.00001%	0.00000%	-20.87501%
Validación magnitud de entrada					
Coefficiente de expansión					
Método	Valor	U estándar	Aporte [ft3/día]	Coefficiente de sensibilidad	Contribución [%]
Excel	0.9987149	0.0001545	1276.660	8261236	0.1382051
C#	0.9987149	0.0001545	1276.660	8261236	0.2082353
%Error	0.00000%	0.00000%	0.00000%	0.00000%	-0.07003%
Validación magnitud de entrada					
Computador de flujo					
Método	U estándar [ft ³]	Coef. de sensibilidad	Aporte [ft3/día]	Contribución [%]	
Excel	30.5505046	1.0000000	30.551	0.0000791	
C#	30.5505050	1.0000000	30.551		
%Error	0.00000%	0.00000%	0.00000%	0.00008%	

Mediante una revisión con el área de Desarrollo Tecnológico e Innovación se observó que en la herramienta Microsoft Excel no se consideró la variabilidad en la composición como fuente de incertidumbre y los coeficientes de sensibilidad de los componentes del gas natural presentaban un valor de 1, esto es un error debido a que los coeficientes representan el cambio del factor de compresibilidad o la gravedad específica (dependiendo el caso) al cambiar la composición.

5. Conclusiones

Se realizó una evaluación detallada del procedimiento diseñado en Microsoft Excel y Visual Basic para el modelo de estimación de incertidumbre, enfocado en la medición del volumen de gas por día en condiciones base de gas natural utilizando placa de orificio, junto con una investigación bibliográfica, que permitió identificar oportunidades de mejora y elaborar un procedimiento más riguroso en la estimación de la incertidumbre del coeficiente de descarga basado en la norma ISO 5167-2.

Se culminó la traducción del modelo de estimación de incertidumbre asociado a sistemas de medición de volumen de gas por día en condiciones base de gas natural utilizando la tecnología placa de orificio, cumpliendo los requisitos para que sea integrado a un software de gestión de balances ya existente o a una nueva aplicación web.

La validación y verificación permitió identificar las diferencias significativas que existen entre el diseño realizado en Microsoft Excel y el lenguaje de programación C#. Se concluyó que los errores se presentaban en la herramienta Microsoft Excel, diseñada con anterioridad por la empresa, específicamente en la estimación de incertidumbre de la gravedad específica y el factor de compresibilidad, por este motivo los cambios se deben realizar en Microsoft Excel y no en el código C#.

Es posible obtener un adecuado desempeño de la estimación de la incertidumbre asociada a sistemas de medición del volumen de gas natural mediante la actualización de Microsoft Excel al lenguaje de programación C#, sin embargo se deben tener en cuenta factores como el diseño del algoritmo de estimación de incertidumbre, la implementación específica del sistema y la calidad de datos de entrada. C# se caracteriza por ser un lenguaje de programación más potente que Microsoft Excel, proporciona mejores herramientas para el cálculo y gestión de datos, trazabilidad y la posibilidad de escalarlo como aplicativo web, lo que permite mejorar la precisión y eficiencia del sistema.

Referencias bibliográficas

- Almaraz Gómez, A. (2007). *ANÁLISIS DE FLUJO EN UN SENSOR DE PLACA DE ORIFICIO*. Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México.
- American Gas Association and American Petroleum Institute. (2003). AGA Report No. 3. Washington, Estados Unidos.
- American Gas Association and American Petroleum Institute. (2003). AGA Report No.3 PART 3. *ORIFICE METERING OF NATURAL GAS AND OTHER RELATED HYDROCARBON FLUIDS*. Washington, Estados Unidos.
- BIPM. (15 de Noviembre de 2022). *Bureau International des Poids et Mesures*. Obtenido de The BIPM is...: <https://www.bipm.org/en/>
- BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML. (2012). *Vocabulario Internacional de Metrología*. JCGM. Obtenido de Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados.
- Bureau International des Poids et Mesures. (s.f.). *BIPM*. Recuperado el Junio de 2022, de <https://www.bipm.org/en/home>
- Capacitaciones virtuales Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas. (2022). Computadores de flujo [MOOC]. Bucaramanga, Santander, Colombia. Obtenido de <https://capacitacion.cdtdegas.com/>
- Capacitaciones virtuales Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas. (2022). Placas de orificio [MOOC]. Bucaramanga, Santander, Colombia. Obtenido de <https://capacitacion.cdtdegas.com/>
- Capacitaciones virtuales Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas. (2019). Capacitaciones virtuales Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas. *Estimación de la incertidumbre de la medición [MOOC]*. Bucaramanga, Santander, Colombia. Obtenido de <https://capacitacion.cdtdegas.com/>
- Ceballos, J. (2011). *Microsoft C#*. Madrid, España: RA-MA Editorial.
- Constantino, P. (2013). Aspectos computacionales en la estimación de incertidumbre de ensayo por el método de Monte Carlo. *INNOTEC LATU(8)*, 13-22. Recuperado el Junio de 2022
- Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas – CDT de Gas. (2018). **INCERTIDUMBRE ASOCIADA AL RESULTADO DE MEDICIÓN EN SISTEMAS DE MEDICIÓN DE LIQUIDOS CON TECNOLOGÍA PLACA DE ORIFICIO PARA GAS NATURAL**. Piedecuesta, Santander, Colombia.
- Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas. (s.f.). *Corporación CDT de Gas*. Recuperado el 16 de Junio de 2022, de <https://cdtdegas.com/index.php/nosotros/quienes-somos>

- Digital Guide IONOS. (29 de Octubre de 2020). *¿Qué es VBA?* Recuperado el Junio de 2022, de <https://www.ionos.es/digitalguide/online-marketing/vender-en-internet/excel-vba/>
- DKD & Associates. (s.f.). *DKD & Associates*. Obtenido de Orifice Plates: <https://dkd-associates.com/orifice-plates/>
- García, C., & Dueñas, D. (2014). VALIDACIÓN DE LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE EN EL PATRÓN PRIMARIO CAMPANA GASOMÉTRICA DEL CDT DE GAS, USANDO MÉTODO MONTE CARLO. Piedecuesta, Santander, Colombia. Recuperado el Junio de 2022
- International Organization for Standardization. (Marzo de 2003). *ISO 5167-2:2003*. Obtenido de Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full — Part 2: Orifice plates: <https://www.iso.org/standard/30190.html>
- Joint Committee for Guides in Metrology. (Septiembre de 2008). *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement*. Recuperado el Mayo de 2022, de <https://www.bipm.org/en/committees/jc/jcgm/publications>
- Joint Committee for Guides in Metrology. (2012). *Vocabulario Internacional de Metrología*. Centro Español de Metrología. Recuperado el Junio de 2022
- Microsoft. (05 de Octubre de 2022). *Métodos (Guía de programación de C#)*. Obtenido de <https://learn.microsoft.com/es-es/dotnet/csharp/programming-guide/classes-and-structs/methods>
- Microsoft. (22 de Septiembre de 2022). *Paseo por el lenguaje C#*. Obtenido de <https://learn.microsoft.com/es-MX/dotnet/csharp/tour-of-csharp/>
- Microsoft. (2022). *Visual Studio 2022*. (Microsoft 2022) Recuperado el Junio de 2022, de Diseño el futuro con Visual Studio 2022: <https://visualstudio.microsoft.com/es/vs/>
- Microsoft. (s.f.). *Desarrollo de aplicaciones .NET*. (Microsoft 2022) Recuperado el Junio de 2022, de <https://visualstudio.microsoft.com/es/vs/features/net-development/>
- Ministerio de Minas y Energía. (23 de Diciembre de 2016). Resolución número 41251. Colombia.
- Mora, W., & Espinoza, J. L. (Octubre de 2005). Programación Visual Basic (VBA) para Excel y Análisis Numérico. Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica. Recuperado el Junio de 2022
- Reader-Harris, M., Forsyth, C., & Boussouara, T. (Diciembre de 2021). The calculation of the uncertainty of the orifice-plate discharge coefficient. *Flow Measurement and Instrumentation*, 82.
- TM TECNOMATIC. (2017). Orifice Plate Assembly. Italia.

Universidad Autónoma de Madrid. (s.f.). *INCERTIDUMBRES DE MEDIDA Y TRATAMIENTO DE DATOS EXPERIMENTALES*. Obtenido de Página de Docencia de Química Física Teórica: <http://www.qfa.uam.es/labqui/practicadas/incertidumbres.pdf>

Apéndices

Apéndice A. Certificados recibidos en los cursos titulados “Fundamentos de Metrología” y “Estimación de la Incertidumbre de Medición”.



Apéndice B. Certificado recibido en el curso denominado “Medición de Cantidad y Calidad de Gas Natural”.



Apéndice C. Resultados del procedimiento realizado en C# para estimar la incertidumbre estándar de la temperatura

```
TEMPERATURE UNCERTAINTY:

Tf: 76 °F
Standard Uncertainty Value: 0,36010417 °F

TechInstFeatures Ustd:0,063 Ci: 1 U(y): 0,063 °F Contribution: 3,0607285 %
Contributions to TechInstFeatures Uncertainty:
DrTf Ustd: 0,027 U(y): 0,027 °F Contribution: 18,367348 %
RFTf Ustd: 0,054 U(y): 0,054 °F Contribution: 73,46939 %
TaTf Ustd: 0,018 U(y): 0,018 °F Contribution: 8,163263 %
VibTf Ustd: 0 U(y): 0 °F Contribution: 0 %
PowTf Ustd: 0 U(y): 0 °F Contribution: 0 %

MetPerformance Ustd:0,3544362 Ci: 1 U(y): 0,3544362 °F Contribution: 96,87681 %
Contributions to MetPerformance Uncertainty:
UcalTf Ustd: 0,075 U(y): 0,075 °F Contribution: 4,4776115 %
ErrTf Ustd: 0,34641019 U(y): 0,34641019 °F Contribution: 95,52239 %

InstOperationCond Ustd:0,009 Ci: 1 U(y): 0,009 °F Contribution: 0,06246384 %
Contributions to InstOperationCond Uncertainty:
StabTf Ustd: 0,009 U(y): 0,009 °F Contribution: 100 %
VarTf Ustd: 0 U(y): 0 °F Contribution: 0 %
AvTechTf Ustd: 0 U(y): 0 °F Contribution: 0 %
ThermInstTf Ustd: 0 U(y): 0 °F Contribution: 0 %
```

Apéndice D. Resultados del procedimiento realizado en C# para estimar la incertidumbre estándar de la presión estática

```
ABSOLUTE PRESSURE UNCERTAINTY:
Pf: 933 psia
Standard Uncertainty Value: 3,3737822 psia

TechInstFeatures Ustd:0,4802343 Ci: 1 U(y): 0,4802343 psia Contribution: 2,026153 %
Contributions to TechInstFeatures Uncertainty:
DrPf Ustd: 0 U(y): 0 psia Contribution: 0 %
RFPf Ustd: 0,45 U(y): 0,45 psia Contribution: 87,80488 %
TaPf Ustd: 0,14999999 U(y): 0,14999999 psia Contribution: 9,756097 %
VibPf Ustd: 0 U(y): 0 psia Contribution: 0 %
PowPf Ustd: 0,074999996 U(y): 0,074999996 psia Contribution: 2,4390242 %

MetPerformance Ustd:3,3394282 Ci: 1 U(y): 3,3394282 psia Contribution: 97,97385 %
Contributions to MetPerformance Uncertainty:
UcalPf Ustd: 0,83970004 U(y): 0,83970004 psia Contribution: 6,322723 %
ErrPf Ustd: 3,2320068 U(y): 3,2320068 psia Contribution: 93,66996 %
VarPatm Ustd: 0,02857738 U(y): 0,02857738 psia Contribution: 0,007323195 %

InstOperationCond Ustd:0 Ci: 1 U(y): 0 psia Contribution: 0 %
Contributions to InstOperationCond Uncertainty:
LengPf Ustd: 0 U(y): 0 psia Contribution: 0 %
CondPf Ustd: 0 U(y): 0 psia Contribution: 0 %
VarPf Ustd: 0 U(y): 0 psia Contribution: 0 %
AvTechPf Ustd: 0 U(y): 0 psia Contribution: 0 %
```

Apéndice E. Resultados del procedimiento realizado en C# para estimar la incertidumbre estándar del diferencial de presión

```
DIFFERENTIAL PRESSURE UNCERTAINTY:

DP: 100 inH2O
Standard Uncertainty Value: 0,09974969 inH2O

TechInstFeatures Ustd:0,06403124 Ci: 1 U(y): 0,06403124 inH2O Contribution: 41,206024 %
Contributions to TechInstFeatures Uncertainty:
DrDP Ustd: 0 U(y): 0 inH2O Contribution: 0 %
RFDP Ustd: 0,06 U(y): 0,06 inH2O Contribution: 87,80488 %
TaDP Ustd: 0,02 U(y): 0,02 inH2O Contribution: 9,756097 %
VibDP Ustd: 0 U(y): 0 inH2O Contribution: 0 %
PowDP Ustd: 0,01 U(y): 0,01 inH2O Contribution: 2,4390242 %
StaticDP Ustd: 0 U(y): 0 inH2O Contribution: 0 %

MetPerformance Ustd:0,0764853 Ci: 1 U(y): 0,0764853 inH2O Contribution: 58,793976 %
Contributions to MetPerformance Uncertainty:
UcalDP Ustd: 0,05 U(y): 0,05 inH2O Contribution: 42,735043 %
ErrDP Ustd: 0,05773503 U(y): 0,05773503 inH2O Contribution: 56,98006 %
VarPatmDP Ustd: 0,004082483 U(y): 0,004082483 inH2O Contribution: 0,28490025 %

InstOperationCond Ustd:0 Ci: 1 U(y): 0 inH2O Contribution: 0 %
Contributions to InstOperationCond Uncertainty:
LengDP Ustd: 0 U(y): 0 inH2O Contribution: 0 %
CondDP Ustd: 0 U(y): 0 inH2O Contribution: 0 %
VarDP Ustd: 0 U(y): 0 inH2O Contribution: 0 %
AvTechDP Ustd: 0 U(y): 0 inH2O Contribution: 0 %
```

Apéndice F. Resultados del procedimiento realizado en C# para estimar la incertidumbre estándar del coeficiente de descarga

```
DISCHARGE COEFFICIENT
```

```
CD: 0,6027404
```

```
Standard Uncertainty Value: 0,0016102374
```

```
PlateConditions Ustd:0,0016102374 Ci: 1 U(y): 0,0016102374 Contribution: 100 %
```

```
Contributions to PlateConditions Uncertainty:
```

```
uBaseCd Ustd: 0,00078657625 U(y): 0,00078657625 Contribution: 23,861725 %
```

```
RugTubCd Ustd: 0,0008699808 U(y): 0,0008699808 Contribution: 29,190361 %
```

```
EfectInstCd Ustd: 0,0007655831 U(y): 0,0007655831 Contribution: 22,60502 %
```

```
FiloPlacaCd Ustd: 0,0005219885 U(y): 0,0005219885 Contribution: 10,508532 %
```

```
FlexFabCd Ustd: 0,00034799235 U(y): 0,00034799235 Contribution: 4,670459 %
```

```
FlexPreDifCd Ustd: 0,00034799235 U(y): 0,00034799235 Contribution: 4,670459 %
```

```
ExcentCd Ustd: 0,00031319313 U(y): 0,00031319313 Contribution: 3,7830722 %
```

```
PasosTubCd Ustd: 0,00013571701 U(y): 0,00013571701 Contribution: 0,7103768 %
```

Apéndice G. Resultados del procedimiento realizado en C# para estimar la incertidumbre estándar del factor de compresibilidad

```

COMPRESSIBILITY FACTOR UNCERTAINTY AT FLOW CONDITIONS:
Zf: 0,85826224
Zb: 0,9974471
Standard Uncertainty Value: 0,0008260009

Methane Ustd:0,0069439057 Ci: -0,04038328 U(y): 0,00028041768 Contribution: 11,525234 %
Contributions to Methane Uncertainty:
GenValueComp Ustd: 0,0052908347 U(y): -0,00021366126 Contribution: 58,055157 %
RefValueComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
DevFactorComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
RepComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
ReproComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
LinearComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
VarComp Ustd: 0,0044972096 U(y): -0,00018161206 Contribution: 41,94485 %

Nitrogen Ustd:9,251488E-05 Ci: -0,21425009 U(y): 1,9821322E-05 Contribution: 0,057584316 %
Contributions to Nitrogen Uncertainty:
GenValueComp Ustd: 6,991249E-05 U(y): -1,4978757E-05 Contribution: 57,1066 %
RefValueComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
DevFactorComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
RepComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
ReproComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
LinearComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
VarComp Ustd: 6,0590817E-05 U(y): -1,2981588E-05 Contribution: 42,8934 %

CarbonDioxide Ustd:0,0001249317 Ci: 0,110714436 U(y): 1,3831744E-05 Contribution: 0,028040955 %
Contributions to CarbonDioxide Uncertainty:
GenValueComp Ustd: 9,440953E-05 U(y): 1,0452498E-05 Contribution: 57,1066 %
RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
VarComp Ustd: 8,1821585E-05 U(y): 9,058831E-06 Contribution: 42,8934 %
    
```

```

Etahne Ustd:0,0006602571 Ci: 0,27683255 U(y): 0,00018278067 Contribution: 4,896655 %
Contributions to Etahne Uncertainty:
GenValueComp Ustd: 0,00049566396 U(y): 0,00013721592 Contribution: 56,357075 %
RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
VarComp Ustd: 0,0004361843 U(y): 0,00012075001 Contribution: 43,64292 %

Propane Ustd:0,00022572977 Ci: 0,5346283 U(y): 0,000120681514 Contribution: 2,1346197 %
Contributions to Propane Uncertainty:
GenValueComp Ustd: 0,00017058152 U(y): 9,1197704E-05 Contribution: 57,1066 %
RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
VarComp Ustd: 0,00014783732 U(y): 7,903801E-05 Contribution: 42,893402 %

iButane Ustd:3,1687065E-05 Ci: 0,783578 U(y): 2,4829287E-05 Contribution: 0,09035818 %
Contributions to iButane Uncertainty:
GenValueComp Ustd: 2,394557E-05 U(y): 1,8763221E-05 Contribution: 57,1066 %
RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
VarComp Ustd: 2,0752826E-05 U(y): 1,6261458E-05 Contribution: 42,8934 %

nButane Ustd:3,2701028E-05 Ci: 0,75938386 U(y): 2,4832634E-05 Contribution: 0,090382546 %
Contributions to nButane Uncertainty:
GenValueComp Ustd: 2,4711811E-05 U(y): 1,8765752E-05 Contribution: 57,1066 %
RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
VarComp Ustd: 2,1416901E-05 U(y): 1,626365E-05 Contribution: 42,8934 %
    
```

```

iPentane Ustd:5,5240444E-06 Ci: 0,99516076 U(y): 5,497312E-06 Contribution: 0,004429348 %
Contributions to iPentane Uncertainty:
GenValueComp Ustd: 4,17446E-06 U(y): 4,154259E-06 Contribution: 57,1066 %
RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
VarComp Ustd: 3,6178653E-06 U(y): 3,6003576E-06 Contribution: 42,893402 %

nPentane Ustd:2,960153E-06 Ci: 1,0381992 U(y): 3,0732285E-06 Contribution: 0,001384295 %
Contributions to nPentane Uncertainty:
GenValueComp Ustd: 2,2369554E-06 U(y): 2,3224054E-06 Contribution: 57,10661 %
RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
VarComp Ustd: 1,9386946E-06 U(y): 2,012751E-06 Contribution: 42,8934 %

nHexane Ustd:1,0854769E-06 Ci: 1,4550287 U(y): 1,5794001E-06 Contribution: 0,0003656144 %
Contributions to nHexane Uncertainty:
GenValueComp Ustd: 8,2028305E-07 U(y): 1,1935354E-06 Contribution: 57,106598 %
RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
VarComp Ustd: 7,10912E-07 U(y): 1,0343973E-06 Contribution: 42,893402 %

nHeptane Ustd:0 Ci: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
Contributions to nHeptane Uncertainty:
GenValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
VarComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
    
```

```
nOctane Ustd:0 Ci: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
Contributions to nOctane Uncertainty:  
GenValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
VarComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
  
nNonane Ustd:0 Ci: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
Contributions to nNonane Uncertainty:  
GenValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
VarComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
  
nDecane Ustd:0 Ci: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
Contributions to nDecane Uncertainty:  
GenValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
VarComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
  
Hydrogen Ustd:0 Ci: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
Contributions to Hydrogen Uncertainty:  
GenValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %  
VarComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
```

```
Oxygen Ustd:0 Ci: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  Contributions to Oxygen Uncertainty:
  GenValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  VarComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %

CarbonMonoxide Ustd:0 Ci: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  Contributions to CarbonMonoxide Uncertainty:
  GenValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  VarComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %

Water Ustd:0 Ci: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  Contributions to Water Uncertainty:
  GenValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  VarComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %

HydrogenSulfide Ustd:0 Ci: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  Contributions to HydrogenSulfide Uncertainty:
  GenValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  VarComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
```

```
Helium Ustd:0 Ci: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  Contributions to Helium Uncertainty:
  GenValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  VarComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %

Argon Ustd:0 Ci: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  Contributions to Argon Uncertainty:
  GenValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  VarComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %

MethZ Ustd:0,00042913112 Ci: 1 U(y): 0,00042913112 Contribution: 26,991001 %
  Contributions to MethZ Uncertainty:
  uMethZ Ustd: 0,00042913112 U(y): 0,00042913112 Contribution: 100 %

Tf Ustd:0,36010417 Ci: -0,001072772 U(y): 0,00038630966 Contribution: 21,873089 %
  Contributions to Tf Uncertainty:
  uTf Ustd: 0,36010417 U(y): -0,00038630966 Contribution: 100 %

Pf Ustd:3,3737822 Ci: 0,00013915884 U(y): 0,0004694916 Contribution: 32,306854 %
  Contributions to Pf Uncertainty:
  uPf Ustd: 3,3737822 U(y): 0,0004694916 Contribution: 100 %
```

Apéndice H. Resultados del procedimiento realizado en C# para estimar la incertidumbre estándar de la gravedad específica

```

SPECIFIC GRAVITY
G: 0,6366815
Standard Uncertainty Value: 0,0008076042

Methane Ustd:0,0069439057 Ci: 0,08140814 U(y): 0,00056529045 Contribution: 48,99436 %
Contributions to Methane Uncertainty:
GenValueComp Ustd: 0,0052908347 U(y): 0,00043071702 Contribution: 58,05515 %
RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
VarComp Ustd: 0,0044972096 U(y): 0,00036610948 Contribution: 41,94485 %

Nitrogen Ustd:9,251488E-05 Ci: -0,33051097 U(y): 3,0577183E-05 Contribution: 0,14335002 %
Contributions to Nitrogen Uncertainty:
GenValueComp Ustd: 6,991249E-05 U(y): -2,3106844E-05 Contribution: 57,1066 %
RefValueComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
DevFactorComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
RepComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
ReproComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
LinearComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
VarComp Ustd: 6,0590817E-05 U(y): -2,002593E-05 Contribution: 42,893394 %

CarbonDioxide Ustd:0,0001249317 Ci: -0,8869249 U(y): 0,00011080504 Contribution: 1,8824431 %
Contributions to CarbonDioxide Uncertainty:
GenValueComp Ustd: 9,440953E-05 U(y): -8,3734165E-05 Contribution: 57,10661 %
RefValueComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
DevFactorComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
RepComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
ReproComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
LinearComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
VarComp Ustd: 8,1821585E-05 U(y): -7,25696E-05 Contribution: 42,893394 %
    
```

```
Ethane Ustd:0,0006602571 Ci: -0,40623704 U(y): 0,0002682209 Contribution: 11,030318 %
Contributions to Ethane Uncertainty:
GenValueComp Ustd: 0,00049566396 U(y): -0,00020135706 Contribution: 56,357075 %
RefValueComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
DevFactorComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
RepComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
ReproComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
LinearComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
VarComp Ustd: 0,0004361843 U(y): -0,00017719422 Contribution: 43,64292 %

Propane Ustd:0,00022572977 Ci: -0,89408374 U(y): 0,00020182133 Contribution: 6,2450643 %
Contributions to Propane Uncertainty:
GenValueComp Ustd: 0,00017058152 U(y): -0,00015251417 Contribution: 57,106598 %
RefValueComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
DevFactorComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
RepComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
ReproComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
LinearComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
VarComp Ustd: 0,00014783732 U(y): -0,00013217895 Contribution: 42,8934 %

iButane Ustd:3,1687065E-05 Ci: -1,3825645 U(y): 4,3809414E-05 Contribution: 0,29426438 %
Contributions to iButane Uncertainty:
GenValueComp Ustd: 2,394557E-05 U(y): -3,3106295E-05 Contribution: 57,1066 %
RefValueComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
DevFactorComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
RepComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
ReproComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
LinearComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
VarComp Ustd: 2,0752826E-05 U(y): -2,8692122E-05 Contribution: 42,893402 %

nButane Ustd:3,2701028E-05 Ci: -1,3816178 U(y): 4,5180324E-05 Contribution: 0,31296912 %
Contributions to nButane Uncertainty:
GenValueComp Ustd: 2,4711811E-05 U(y): -3,414228E-05 Contribution: 57,10661 %
RefValueComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
DevFactorComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
RepComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
ReproComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
LinearComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
VarComp Ustd: 2,1416901E-05 U(y): -2,9589972E-05 Contribution: 42,8934 %
```

```

iPentane Ustd:5,5240444E-06 Ci: -1,8558865 U(y): 1,0252E-05 Contribution: 0,016114619 %
Contributions to iPentane Uncertainty:
GenValueComp Ustd: 4,17446E-06 U(y): -7,747324E-06 Contribution: 57,106598 %
RefValueComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
DevFactorComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
RepComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
ReproComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
LinearComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
VarComp Ustd: 3,6178653E-06 U(y): -6,7143474E-06 Contribution: 42,893402 %

nPentane Ustd:2,960153E-06 Ci: -1,8726166 U(y): 5,543232E-06 Contribution: 0,0047111716 %
Contributions to nPentane Uncertainty:
GenValueComp Ustd: 2,2369554E-06 U(y): -4,18896E-06 Contribution: 57,106598 %
RefValueComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
DevFactorComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
RepComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
ReproComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
LinearComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
VarComp Ustd: 1,9386946E-06 U(y): -3,6304318E-06 Contribution: 42,8934 %

nHexane Ustd:1,0854769E-06 Ci: -2,3062627 U(y): 2,5033949E-06 Contribution: 0,0009608631 %
Contributions to nHexane Uncertainty:
GenValueComp Ustd: 8,2028305E-07 U(y): -1,8917882E-06 Contribution: 57,106598 %
RefValueComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
DevFactorComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
RepComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
ReproComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
LinearComp Ustd: 0 U(y): -0 Contribution: 0 %
VarComp Ustd: 7,10912E-07 U(y): -1,6395499E-06 Contribution: 42,893402 %

nHeptane Ustd:0 Ci: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
Contributions to nHeptane Uncertainty:
GenValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
VarComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
    
```

```
nOctane Ustd:0 Ci: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
Contributions to nOctane Uncertainty:
GenValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
VarComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %

nNonane Ustd:0 Ci: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
Contributions to nNonane Uncertainty:
GenValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
VarComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %

nDecane Ustd:0 Ci: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
Contributions to nDecane Uncertainty:
GenValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
VarComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %

Hydrogen Ustd:0 Ci: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
Contributions to Hydrogen Uncertainty:
GenValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
VarComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
```

```
Oxygen Ustd:0 Ci: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  Contributions to Oxygen Uncertainty:
  GenValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  VarComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %

CarbonMonoxide Ustd:0 Ci: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  Contributions to CarbonMonoxide Uncertainty:
  GenValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  VarComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %

Water Ustd:0 Ci: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  Contributions to Water Uncertainty:
  GenValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  VarComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %

HydrogenSulfide Ustd:0 Ci: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  Contributions to HydrogenSulfide Uncertainty:
  GenValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  VarComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
```

```
Helium Ustd:0 Ci: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  Contributions to Helium Uncertainty:
  GenValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  VarComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %

Argon Ustd:0 Ci: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  Contributions to Argon Uncertainty:
  GenValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  RefValueComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  DevFactorComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  RepComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  ReproComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  LinearComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %
  VarComp Ustd: 0 U(y): 0 Contribution: 0 %

GPA Ustd:0,00031834075 Ci: 1 U(y): 0,00031834075 Contribution: 15,537721 %
  Contributions to GPA Uncertainty:
  uGPA Ustd: 0,00031834075 U(y): 0,00031834075 Contribution: 100 %

Zb Ustd:0,0004987236 Ci: 0,6383111 U(y): 0,00031834078 Contribution: 15,537723 %
  Contributions to Zb Uncertainty:
  uZb Ustd: 0,0004987236 U(y): 0,00031834078 Contribution: 100 %
```