

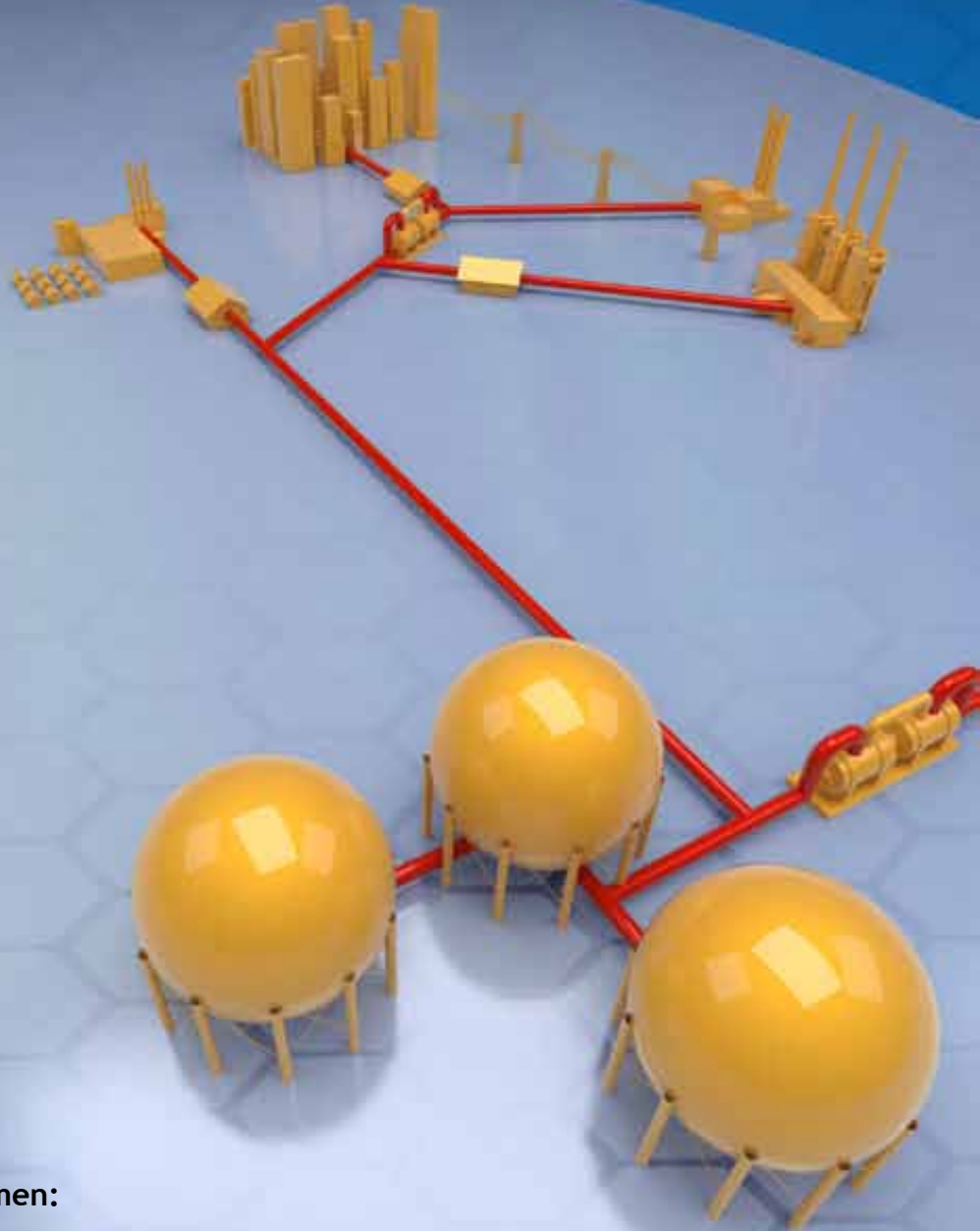
La ciencia no es sino una perversión de sí misma, a menos que tenga como objetivo final, el mejoramiento de la humanidad. Nicola Tesla, Inventor Austro-hungaro.

La actividad científica está orientada a satisfacer la curiosidad, y a resolver las dudas, acerca de cuáles son y cómo están organizadas las leyes de la naturaleza.

Seguros de que la comunidad científica nacional e internacional, utilizará la Revista MET&FLU como un medio para compartir los hallazgos de alta relevancia, cada semestre nuestros lectores encontrarán un tema de su agrado que facilitará la transferencia del conocimiento al ritmo que nuestra sociedad, nos lo exige.

Aplicación de BRAM como Modelo para el Análisis de una Red de Gas Natural Mediante Reconciliación de Datos

Diana Marcela Castillo (dcastillo@cdtdegas.com)
René Gamboa Jaimes (rgamboa@cdtdegas.com)



Resumen:

El presente artículo explica, en primer lugar, la importancia económica y legal de mantener un adecuado control de los balances en las redes de gas natural (extensible a otros fluidos que se manejan en una sola fase), así como los cálculos matemáticos para efectuar los balances de masa y energía. Posteriormente, a partir de un estudio del estado del arte de las distintas metodologías desarrolladas a nivel internacional, se explica un proceso implementado dentro del CDT de GAS, que se propone como un modelo (BRAM: Balance y Reconciliación Aplicado a las Mediciones), que se fundamenta en la reconciliación de datos, y que podría ser completamente aplicable a nuestro entorno. Se considera que este proceso es replicable indistintamente en el transporte y distribución de agua, en los procesos de refinación del petróleo y a otros fluidos monofásicos.

1 INTRODUCCIÓN

En todo proceso productivo se requiere realizar cálculos de balance de volumen, masa y/o energía; el caso de los procesos de comercialización del gas natural, no es la excepción. Para que el gas natural llegue al usuario final deben realizarse distintos procesos de transferencia de custodia, en los cuales un agente entrega a otro, una cantidad determinada del energético con el fin de que éste sea transportado y posteriormente distribuido a los consumidores. Durante este proceso es posible que el gas cambie sus propiedades como consecuencia de las mezclas y las variaciones en las condiciones de operación que se presentan, sin embargo estas condiciones siempre deben cumplir con los límites establecidos por la Comisión de Regulación de Energía y Gas -CREG, como caso específico para Colombia.

En este sentido, los diversos agentes de la cadena requieren realizar los balances de masa y/o de energía (los cuales se basan en las leyes de conservación) dando, en primer lugar, cumplimiento a los requisitos regulatorios establecidos para garantizar la confianza en el mercado y en segundo lugar, conociendo con veracidad la rentabilidad de su negocio desde la óptica comercial. Sin embargo, al realizar los respectivos cálculos de los balances, se encuentran diferencias considerables (en ocasiones mayores a las permitidas por la regulación) entre el gas entregado y el gas recibido. Estas diferencias se denominan comúnmente como «desbalances» y pueden ocasionar pérdidas considerables de dinero, si el desbalance es desfavorable; también casos en los cuales el balance es favorable (sobrantes de gas), aspecto que no se contempla en la regulación nacional y que pueden ocasionar dificultades al momento de realizar la facturación del consumo, llegando inclusive a generar desconfianza por parte de los usuarios.

En este sentido, dos razones fundamentales vienen siendo evidenciadas: primero, las desviaciones producidas por equipos que presentan errores (sistemáticos y aleatorios) derivados de la ausencia de control metrológico, sobre los cuales no se ha realizado una estimación de la incertidumbre asociada a las mediciones; y segundo, la ausencia total de datos en ciertos puntos de la red donde se presentan inconvenientes con los sistemas de medición (ausencia de equipos por mantenimiento, fallas, indisponibilidad de energía, etc). Una alternativa para mitigar este problema, realizando previamente la caracterización metrológica, es la reconciliación de datos, una técnica que a partir de cálculos estadísticos, y un conjunto de situaciones de carácter físico,

permite evaluar y confirmar la confiabilidad y calidad de los datos obtenidos (los resultados de las mediciones), encontrando resultados representativos o mejores estimados, que cumplan con los balances de masa y energía.

A nivel internacional, han sido desarrolladas una gran cantidad de metodologías para la implementación de esta técnica, por lo tanto fue necesario llevar a cabo un estudio de las mismas con el fin de identificar la más apropiada para los procesos de transferencia de gas natural en Colombia. El objetivo principal de dicho estudio era obtener un modelo válido que facilite el probable ajuste de las mediciones en las redes de gas, e identificar técnicas para la detección de errores gruesos (definidos en la literatura como errores sistemáticos muy significativos) en sistemas de medición que puedan llegar a afectar de forma severa los cálculos del balance.

El presente artículo muestra el proceso implementado y los resultados obtenidos en la generación de un modelo, alineado con las técnicas de reconciliación de datos disponibles, útil para su aplicación en la detección de errores gruesos y validación de balances en redes de transporte y distribución de gas natural. Para su mejor comprensión, se invita a revisar previamente el artículo “Aplicación de Análisis de Incertidumbre a la Optimización de Balances en Redes de Flujo de Fluidos” [1] el cual fue publicado en la primera edición de la Revista MET&FLU (Año 2009 - N° 01), que hacía referencia a una estrategia para la optimización de los balances, la cual viene siendo aplicada en la red de transporte de la empresa TGI S.A. ESP (Transportadora de Gas Internacional).

2 IMPORTANCIA DEL CONTROL DE LOS BALANCES EN LAS REDES DE GAS NATURAL

La cadena del gas natural comprende varios eslabones a saber: exploración, producción, transporte, distribución y uso final. Para mejor comprensión de este artículo, sólo nos referiremos a producción, transporte y distribución por tratarse de aquellos eslabones principales donde existe transferencia de custodia física real. Las empresas que hacen parte de los eslabones anteriormente mencionados realizan procesos de facturación y para ello es necesario conocer el volumen de gas que fluye por las tuberías, por lo que se cuenta con sistemas de medición que dan una indicación del caudal volumétrico de gas que pasa a través de un sistema de medición. En estos puntos se realiza la denominada transferencia de custodia del gas.

	TRANSPORTE	DISTRIBUCIÓN
Documento que establece la regulación	RUT—Reglamento Único de Transporte Resolución CREG 071 de 1999	Código de Distribución Resolución CREG-057
Cálculo de pérdidas de gas	$Pérdidas = C_e + (C_{ai} - C_{af}) - C_t - C_{op}$ (Ec.1)	$Pérdidas = V_t - V_f$ (Ec.2) ó $Pérdidas = \frac{(V_t - V_f)}{V_t} * 100$ (Ec.3)
Límite establecido para las pérdidas	Uno por ciento (1%)	Cuatro por ciento (4%)

Tabla 1. Reglamentación para el control de los balances en las redes de gas

Si hacemos referencia al Vocabulario Internacional de Metrología, VIM[2] encontramos que toda medición tiene error como se aprecia en la Figura 1, por lo tanto, como Exactitud de la Medida (VIM 2.13) entenderemos la proximidad entre un valor medido y un valor verdadero de un mensurando; por Error de Medida (VIM 2.16) la diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia; como Error Aleatorio de Medida (VIM 3.13) el componente del error de medida que, en mediciones repetidas, varía de manera impredecible y como Error Sistemático de Medida (VIM 2.17) al componente del error de medida que, en mediciones repetidas, permanece constante o varía de manera predecible. Como se dijo anteriormente, para este documento nos referiremos también a Errores Gruesos entendiéndolos como errores sistemáticos muy significativos, causados por eventos no aleatorios.

Al respecto, como generalidad, se conoce que los errores aleatorios siguen una distribución normal, con media cero y siempre están presentes en las mediciones; que los errores sistemáticos, por su parte, permanecen constantes en mediciones repetidas y que pueden ocasionarse por instalaciones incorrectas y/o por carencia de calibración de los instrumentos, asociados entre otros. Igualmente ya se conoce que estos errores se corrigen realizando un adecuado programa de aseguramiento metrológico (inspección, calibración, etc.) a los sistemas de medición.

Dichos errores aleatorios y sistemáticos generan, que en los cálculos de los balances de redes, se presenten diferencias entre la cantidad de gas recibida y la entregada, aspecto que origina los desbalances, es por tanto un deber de las empre-



Figura 1. Diagrama del concepto de Error

sas contar con un adecuado control de las redes de gas, garantizando que dichos desbalances se mantengan dentro de un valor mínimo, establecido por las reglamentaciones legales, las cuales se mencionan a continuación.

2.1 Reglamentación Nacional en Materia de Control de Balances en Redes de Transporte y Distribución de Gas Natural

La CREG –Comisión de Regulación de Energía y Gas– es la entidad que se encarga de regular los servicios de energía y gas en Colombia, por tanto establece entre otros, los límites permitidos para las pérdidas (desbalances) en las redes de gas natural. En www.creg.gov.co se encuentra: *Somos una entidad eminentemente técnica y nuestro objetivo es lograr que los servicios de energía eléctrica, gas natural y gas licuado de petróleo (GLP) se presten al mayor número posible de personas, al menor costo posible para los usuarios y con una remuneración adecuada para las empresas que permita garantizar calidad, cobertura y expansión.*

La Tabla 1 muestra una comparación de la reglamentación para el control de los balances en las operaciones de transporte y distribución.

Dónde:

- C_e Sumatoria de la cantidad de energía entregada en todos los puntos de entrada del sistema de transporte, durante el período de análisis.
- C_{ai} Cantidad de energía almacenada en el sistema de transporte al inicio del período de análisis.
- C_{af} Cantidad de energía almacenada en el sistema de transporte al final del período de análisis.
- C_t Sumatoria de la cantidad de energía tomada en todos los puntos de salida del sistema de transporte durante el período de análisis.
- C_{op} Sumatoria de la cantidad de energía utilizada por el transportador para el funcionamiento del sistema de transporte, durante el período de análisis.
- V_t Es el gas natural comprado (recibido) en puerta de ciudad, es decir, el volumen medido en el city gate.

V_f Es el volumen de gas facturado a los usuarios finales

Se establece que las pérdidas menores al límite permitido, serán distribuidas entre los remitentes; por el contrario si las pérdidas son mayores a dicho límite, este excedente deberá ser asumido por la empresa transportadora o distribuidora. Como se observa en la Tabla 1, para el caso del transportador es necesario garantizar que las pérdidas sean menores del 1% de la energía transportada, mientras que, para el distribuidor, es del 4% del volumen distribuido. Esta diferencia se debe, principalmente, a las limitantes tecnológicas y logísticas en la red de distribución (los denominados comúnmente contadores de gas domiciliarios).

Teniendo en cuenta este panorama, se evidencia claramente la necesidad (económica) de controlar adecuadamente los balances en las redes de gas y para lograrlo se debe (de forma permanente) evaluar y controlar la infraestructura, los datos obtenidos y los procesos que intervienen en este cálculo.

2.2 Cálculo de los Balances de Masa y Energía

En todo proceso que se realice y, en general, en cualquier operación que se lleve a cabo, debe cumplirse con las leyes de conservación; tales como la ley de conservación de la masa, que establece que “La materia no se crea ni se destruye sólo se transforma”, y la primera ley de la termodinámica, la cual expresa que: “La energía no se crea ni se destruye sólo se transforma”. En términos matemáticos estas leyes se pueden representar por medio de la siguiente ecuación:

$$\sum \text{Entradas} - \sum \text{Salidas} + \text{Generación} - \text{Consumo} - \text{Acumulación} = 0 \quad (\text{Ec.4})$$

Debido a que en las redes de tuberías de gas natural no se presentan reacciones químicas los términos de generación y consumo se eliminan de la ecuación de balance. Por su parte, la acumulación, consiste en la cantidad de gas que se encuentra almacenada o empaquetada en la tubería y que en la práctica se conoce también como “inventario de gas”.

³ Es conveniente aclarar que en las redes también se presentan pérdidas de gas de carácter operacional, tales como venteos, shut downs, roturas, etc., las cuales no representan una entrega de gas, pero que si se estiman para considerarlas dentro de los balances. También, se resalta el hecho de que pueden existir fugas, hurtos y otros aspectos de “gas no contabilizado”, los cuales favorecen la generación de faltantes de gas (en lugar de sobrantes) y que la reconciliación de datos parte de una base “ideal”, es decir que se tienen controladas estas situaciones. En todo caso, la importancia del control metrológico es preponderante para poder implementar la técnica de reconciliación.

Adicionalmente a la determinación del inventario, también debe efectuarse la medición del volumen de gas en cada uno de los puntos donde se tengan recibos (entradas) y entregas (salidas) del energético, así como del poder calorífico superior, el cual permite determinar la energía que -hipotéticamente- el gas liberará en la combustión. Con esta información, es posible expresar la ecuación básica para el cálculo del balance de masa y energía en las redes de gas natural de la siguiente forma:

$$\sum \text{Recibos} - \sum \text{Entregas} + \Delta \text{Inventario de gas} = 0 \quad (\text{Ec.5})$$

Donde:

$$\Delta \text{Inventario de gas} = \text{Inventario inicial} - \text{Inventario final} \quad (\text{Ec.6})$$

Como se mencionó anteriormente, la Ecuación 5 se obtiene a partir de la ley de conservación y por tanto es una restricción del proceso, es decir que siempre debe garantizarse su cumplimiento.

A partir de lo anterior, es posible concluir que para realizar los cálculos de balance, es necesario definir el período de tiempo sobre el cual se efectuará el mismo, requiriéndose conocer el inventario y las mediciones de los volúmenes de gas recibido y entregado (al inicio y al final del período de balance), así como el poder calorífico del gas en cada punto de entrada y de salida. Estas variables que permiten efectuar los balances, se dividen en observables y redundantes; dicha clasificación será explicada a continuación.

2.3 Observabilidad y Redundancia

Teniendo en cuenta la Ecuación 5, determinar el valor de un caudal volumétrico en algún punto de la red donde no se tenga un medidor, es posible, si se conocen las mediciones de los demás caudales volumétricos. Estas variables, que se pueden determinar a partir de los valores de otras, se denominan «observables».

Por su parte, las variables «redundantes», son aquellas variables medidas que son observables aun cuando su medición es removida. Con base en lo anterior, se puede afirmar que una variable medida es observable, ya que su medición proporciona un estimado de dicha variable. Sin embargo, una variable no medida, es observable, sólo si puede ser indirectamente estimada mediante la utilización de las restricciones y las mediciones de otras variables [3]. Este concepto se constituyó en clave para el método implementado, el cual se explica más adelante.

3 RECONCILIACIÓN DE DATOS

En el entorno internacional, una solución evidente para lograr balances confiables es la utilización de sistemas de medición más exactos, que permitan obtener mediciones con incertidumbres muy bajas. Generalmente los proveedores de equipos recomiendan, en su contexto, el cambio de los sistemas de medición por otros de «última tecnología» inclusive redundantes, sin embargo esta solución requeriría de inversiones cuantiosas de dinero, por parte de las empresas del sector.

Conscientes de dicha problemática, y muy particularmente, defendiendo el concepto de que no solamente con inversiones cuantiosas se mejora la calidad de las mediciones, la Corporación CDT de GAS pensó en desarrollar, a través de este estudio, un modelo, que aprovechando los grandes avances en metrología aplicada al desarrollo industrial, permitiera realizar la detección de errores gruesos en dichos sistemas de medición, de tal forma que se obtengan balances perfectos, es decir en cero. El modelo resultante, de todas formas, correspondería a un método totalmente alineado con la reconciliación de datos, técnica que permite identificar los errores gruesos, focalizando los recursos económicos invertidos para mejorar la calidad de las mediciones, utilizando mediciones redundantes para ajustar los valores medidos, de forma que se obtenga el mejor estimado del valor convencionalmente verdadero, minimizando por tanto su incertidumbre en la estimación del balance de gas.

3.1 Selección de Métodos de Reconciliación Aplicables

Función de Minimización	Ecuación
MÍNIMOS CUADRADOS	$\rho_i = \varepsilon_i^2$ (Ec.7)
NORMAL CONTAMINADA	$\rho_i = -\ln \left\{ 0,765e^{\left(-\frac{\varepsilon_i^2}{2}\right)} + 0,0235e^{\left(-\frac{\varepsilon_i^2}{200}\right)} \right\}$ (Ec.8)
CAUCHY	$\rho_i = \ln \left(1 + \frac{\varepsilon_i^2}{2,3849^2} \right)$ (Ec.9)
LORENTZIAN	$\rho_i = -\frac{1}{1+(\varepsilon_i^2/13,52)}$ (Ec.10)
FAIR	$\rho_i = \left[\frac{ \varepsilon_i }{1,3998} - \ln \left(1 + \frac{ \varepsilon_i }{1,3998} \right) \right]$ (Ec.11)

Tabla 2. Funciones objetivo para el método de minimización

Para desarrollar la metodología de reconciliación de datos que permitiera realizar un correcto control de los balances (detección de errores), se efectuó por parte del CDT de GAS, en primer lugar, un barrido de las técnicas desarrolladas a nivel internacional; en este estudio se encontró una gran variedad de metodologías que realizan la reconciliación de datos utilizando desde sencillas fórmulas y operaciones entre matrices, hasta sofisticados algoritmos de computación como se expresa en [4][5][6][7]. Una vez se estudiaron y comprendieron, se seleccionaron, las que probablemente, podrían adaptarse mejor a la realidad y las necesidades particulares, enfocadas principalmente al control de los balances en las redes de Gas Natural.

Se encontró entonces que las ecuaciones que representan estos balances de gas natural, como se mostró en el capítulo anterior, son siempre lineales ya que no se presentan reacciones químicas, lo que permitió descartar aquellos métodos enfocados al desarrollo de la reconciliación de datos en procesos no lineales. De los métodos estudiados se seleccionaron como aplicables los siguientes:

- Método de Minimización de Funciones [8]: Consiste en la minimización de una función de la forma $\sum W_i \rho(\varepsilon)$ donde ε es el error, ρ es una función objetivo y W es un factor de ponderación (la incertidumbre de medición en este caso) que permite minimizar los errores de las mediciones. Este método ajusta las mediciones de forma que los errores se reduzcan y que las restricciones impuestas por las leyes de conservación de la naturaleza sean obedecidas. En la literatura se encuentran distintas funciones objetivo que se pueden utilizar para realizar la minimización de los errores; algunas de estas se muestran en la Tabla 2. El método de minimización utiliza un factor de ponderación (W) y tiene la ventaja de poder utilizarse, tanto para el control de los balances, como para hallar el valor representativo de una variable a partir de distintos valores de la misma.
- Método de Incertidumbre [9]: Este método permite encontrar el valor conciliado de una variable, a partir de dos o más mediciones redundantes de esa misma variable, por

	Minimización de Funciones	Incertidumbre
Limitación	Requiere de un valor de ponderación (incertidumbre), el cual por lo general no se conoce.	Sólo permite realizar la reconciliación de datos a una variable, por lo que no es posible hacer el control de los balances
Ventaja	Permite realizar la reconciliación de datos, con distintas variables al tiempo.	Tiene en cuenta la incertidumbre en la reconciliación y permite encontrar la incertidumbre del valor conciliado

Tabla 3. Comparación entre los métodos seleccionados

medio de una ecuación proveniente de un modelo multidimensional. Adicionalmente, basándose en la Guía para la Expresión de la Incertidumbre en las Mediciones—GUM, es posible encontrar la incertidumbre estándar del valor conciliado. Por medio de este método es posible realizar estudios de homogeneidad, solución de disputas y diagnósticos de equipos, pero no permite efectuar el control de los balances. Las ecuaciones que permiten determinar el valor conciliado de las mediciones y el respectivo valor de la incertidumbre se muestran a continuación:

$$m^c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (\text{Ec. 12})$$

$$U_{m^c} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}}} \quad (\text{Ec. 13})$$

Dónde:

m^c	Valor conciliado
m_i	Mediciones
σ_i	Incertidumbre de las mediciones
$U_{(m^c)}$	Incertidumbre del valor conciliado

3.2 Método de Reconciliación Seleccionado

De los métodos estudiados, se seleccionaron dos como los más indicados para realizar la reconciliación de datos en las redes de gas natural. Dentro del marco de los análisis realizados se efectuó una comparación y se determinaron las limitaciones y las ventajas de cada uno, con el fin de encontrar el más indicado. La Tabla 3 muestra los resultados alcanzados al realizar la comparación.

Con base en lo anterior, y de forma general en los análisis realizados, se determinó que el modelo apropiado para la reconciliación era la com-

binación de los dos métodos seleccionados (Método de Minimización de Funciones + Método de Incertidumbre), de forma tal, que el método de incertidumbre proporcionara el valor de la incertidumbre utilizado como factor de ponderación en el modelo de minimización de funciones, y éste último, finalmente, realizara la reconciliación de las mediciones, efectuando de esta forma el control de los balances.

4 «BRAM» (Balance y Reconciliación Aplicado a las Mediciones), MODELO IMPLEMENTADO PARA RECONCILIACIÓN DE DATOS EN REDES DE GAS NATURAL

4.1 Estructura del Modelo

La Figura 2 muestra la estructura del modelo «BRAM» implementado en el CDT de GAS para llevar a cabo la reconciliación de datos y la detección de errores gruesos en procesos aplicables a redes de gas natural.

4.1.1 Confirmación Metroológica de la Red

El primer paso consiste en verificar que la infraestructura, comprendida por la red propiamente dicha y por cada uno de los sistemas de medición que forman el sistema de transporte, se encuentre controlada mediante la ejecución de programas de inspecciones y calibraciones periódicas, dentro de periodos razonables, de manera que permitan mantener en óptimas condiciones físicas y metroológicas cada uno de los elementos utilizados para la cuantificación del volumen y/o la energía del gas. Por su parte, los datos obtenidos (siendo la información que se utiliza para



Figura 2. Proceso implementado para la reconciliación de datos en redes de gas natural

el cálculo del balance) deben ser validados y analizados, verificando que las fuentes sean confiables y en caso de ser datos obtenidos por medio de cálculos, los algoritmos usados deben ser técnica y numéricamente correctos. Finalmente, los procesos (modelos matemáticos) deben controlarse y en lo posible sistematizarse, para disminuir errores en el balance por manipulación inadecuada de la información o en los algoritmos utilizados.

Con respecto a la medición redundante, es necesario evaluar igualmente, que la red tenga esta propiedad, dado que es un requisito de las técnicas de reconciliación de datos. De lo contrario, debe evaluarse si es posible su implementación. Desde luego, éste es un requisito para la aplicación del modelo BRAM.

4.1.2 Evaluación y Selección de la Función de Minimización

Habiendo concebido claramente el modelo, e identificado que la red en estudio cumple, como se explicó en 2.1 y en 4.1.1, con las exigencias mínimas para llevar a cabo procesos de reconciliación de datos en redes de gas natural, se hace necesario encontrar la función de minimización que garantice un mayor rendimiento para el proceso, y por lo tanto, que permita obtener los mejores resultados. (El CDT de GAS trabajó con las cinco funciones indicadas en la Tabla 2, sin embargo las funciones Lorentzian y Normal Contaminada, se descartaron ya que presentaron problemas de convergencia para aplicaciones en redes de gas natural). Para determinar entonces la función de minimización, que obtenga el mayor rendimiento, se calculan los factores OP (Overall Power) que mide la eficiencia del modelo para detectar correctamente los errores; también el AVTI (Average number Type I Errors) que cuantifica los errores gruesos “incorrectamente detectados” y el factor de Selectividad que representa la capacidad para detectar los “errores reales”. Dichos criterios se calculan para un número “n” (mayor a 1) de simulaciones, por medio de las siguientes ecuaciones:

$$OP = \frac{\text{Número de errores gruesos correctamente identificados}}{\text{Número de errores gruesos simulados}} \quad (\text{Ec. 14})$$

$$AVTI = \frac{\text{Número de errores gruesos erróneamente identificados}}{\text{Número de simulaciones realizadas}} \quad (\text{Ec. 15})$$

$$\text{Selectividad} = \frac{\text{Número de errores gruesos correctamente identificados}}{\text{Número de errores gruesos detectados}} \quad (\text{Ec. 16})$$

Por su parte, el promedio y la mediana de la Reducción Total de Errores-TER (Ecuación 17) son

usados para comparar el rendimiento de la reconciliación de datos.

$$TER = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i^*)^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i^* - x_i^t)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i^t)^2}} \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde:

- y_i : Valor con error aleatorio
- x_i^* : Valor conciliado
- x_i^t : Valor considerado como convencionalmente verdadero

En este sentido, los siguientes pasos deben ser ejecutados para la determinación de la mejor función de minimización:

1. Se determina el número de simulaciones que se desean realizar; se recomienda realizar un mínimo de 500 simulaciones.
2. Se adicionan errores gruesos de forma aleatoria a los valores convencionalmente verdaderos de las variables involucradas en el proceso.
3. Se realiza la reconciliación de datos con cada una de las funciones de minimización, y para cada uno de los casos simulados.
4. Se detectan los errores gruesos [10].
5. Se calcula el rendimiento de cada una de las funciones de minimización por medio del cálculo de los factores OP, AVTI y la Selectividad.
6. Se calcula el promedio y la mediana de la reducción total de errores TER.

Para seleccionar la función de minimización que debe utilizarse en la reconciliación de datos de las mediciones [11], se analizan los valores obtenidos para el promedio y la mediana del TER y se descarta, la función (o las funciones), que tenían los valores más bajos; posteriormente se observan los factores OP, AVTI y la Selectividad, y con base en los resultados, se encuentra la función con el mayor rendimiento para el proceso a conciliar. Una vez identificada dicha función es posible realizar el ajuste de las mediciones por medio de la reconciliación de datos, lo cual se explica a continuación.

4.1.3 Reconciliación de la Red con Todas las Mediciones

Una vez determinada la función de minimización a utilizar, es posible realizar el control de los balances mediante la reconciliación de datos. Para desarrollar la minimización se utiliza el Solver GRG *Non linear*⁴, el cual encuentra los valores ajustados cumpliendo con las restricciones (balances de masa) y minimizando los errores de acuerdo a la función seleccionada. Se escogió

⁴ GRG (Generalized Reduced Gradient) Non linear: Algoritmo que permite encontrar un valor óptimo (mínimo o máximo) para una fórmula objetivo, sujeta a restricciones o limitaciones.

esta herramienta ya que el algoritmo que utiliza ha sido validado y se ha comprobado que arroja resultados aceptables [12]. (El algoritmo manejado por Solver, se programó en el CDT de GAS en una macro de Visual Basic, lo cual automatiza y facilita los cálculos).

4.1.4 Identificación de Errores Gruesos

El siguiente paso es la identificación del sistema (o sistemas) de medición en la red, que presentan fallas y que poseen errores gruesos con el fin de realizar las respectivas operaciones de inspección y calibración. Para la identificación de los errores gruesos se lleva a cabo la reconciliación de datos con los valores indicados en las mediciones; posteriormente se elimina la primera medición y se realiza la reconciliación de datos con los demás valores; los valores ajustados son comparados con los medidos, y si la diferencia entre ambos es baja se puede determinar que dicha medición no tiene errores gruesos; por el contrario una diferencia alta, indica la presencia de dichos errores en esa medición; este procedimiento debe realizarse eliminando cada una de las mediciones, para determinar los medidores que deben ser intervenidos.

4.1.5 Toma de Decisiones y Mejoras Focalizadas

Finalmente, con la información obtenida se facilita la toma de decisiones a nivel organizacional, focalizando los recursos humanos y económicos hacia aquellos sistemas que realmente requieren atención. Es importante anotar, que no es siempre necesario reemplazar la totalidad del sistema porque aprovechando la estimación de la incertidumbre y mediante la evaluación de la sensibilidad, es posible hoy en Colombia, definir con exactitud, cual o cuales partes del sistema deben ser reemplazadas o mejoradas en torno a su funcionalidad.

Este método, igualmente puede ser nuevamente utilizado si se quiere obtener un resultado totalmente confiable, destacando su simplicidad y su ciclicidad.

5 RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE BRAM EN UNA RED DE GAS NATURAL

Una vez determinado y totalmente comprendido el modelo, se aplicó sobre las mediciones de una red real de gas natural ubicada en Colombia. La red se muestra en la Figura 3, donde las flechas indican la dirección del flujo de gas. Como se observa en la figura 3, la red de gas natural cuenta con dos recibos y cinco salidas principales y una de estas se divide en dos flujos, por lo que se tiene un total de seis entregas. La empresa cuenta con medidores en cada uno de los puntos donde se realiza la transferencia de custodia del gas y adicionalmente cuenta con un medidor interno (M.I) ubicado en la línea de entrega del gas donde se realiza la división del flujo. La indicación obtenida por este medidor permite tener mediciones redundantes para los caudales de la red, lo cual hace posible realizar la reconciliación de datos y la detección de errores gruesos. El balance de masa global para esta red está dado por la siguiente ecuación:

Finalmente, con la información obtenida se facilita la toma de decisiones a nivel organizacional, focalizando los recursos humanos y económicos hacia aquellos sistemas que realmente requieren atención. Es importante anotar, que no es siempre necesario reemplazar la totalidad del sistema porque aprovechando la estimación de la incertidumbre y mediante la evaluación de la sensibilidad, es posible hoy en Colombia, definir con exactitud, cual o cuales partes del sistema deben ser reemplazadas o mejoradas en torno a su funcionalidad.

$$F_1 + F_2 - F_3 - F_4 - F_5 - F_6 - F_7 - F_8 + \Delta_{\text{Inventario}} = 0 \quad (\text{Ec. 18})$$

Adicionalmente, es posible realizar un balance alrededor del medidor interior (M.I), como se muestra en la siguiente ecuación:

$$M.I - F_7 - F_8 + \Delta_{\text{Inventario}} = 0 \quad (\text{Ec. 19})$$

Este balance redundante, como se mencionó anteriormente, permite realizar la detección de errores gruesos y el control de los balances.

Combinando las ecuaciones 18 y 19 se obtiene:

$$F_1 + F_2 - F_3 - F_4 - F_5 - F_6 - M.I + \Delta_{\text{Inventario}} = 0 \quad (\text{Ec. 20})$$

Para la aplicación del BRAM se siguió la estructura mostrada en la Figura 2. El CDT de GAS realizó previamente el aseguramiento metrológico de esta red. Los resultados se muestran a continuación.

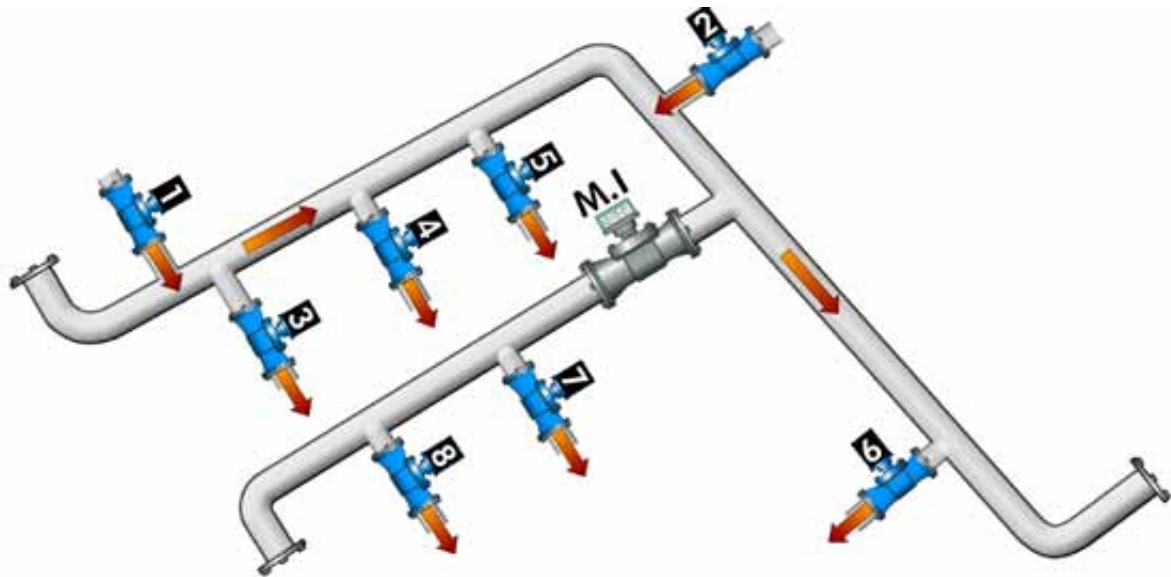


Figura 3. Red real de gas natural

5.1 Evaluación y Selección de la Función de Minimización:

Las simulaciones que permitieron determinar los factores que muestran el rendimiento de las funciones, se hicieron tomando como valores verdaderos, las mediciones del día que presentaba un desbalance más cercano a cero.

Para este procedimiento se realizaron 500 simulaciones, las cuales permitieron observar claramente cual era la función más apropiada para esta red. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.

A partir de la información anterior, puede concluirse que para esta red, la función de minimización, con un mayor rendimiento, es la de Cauchy, debido a que tiene: el valor más alto del promedio y de la mediana TER; el valor de OP más cercano a 1; el más alto para la selectividad y finalmente el más bajo para el AVTI.

Ahora bien, ya con la función de minimización seleccionada, se prosigue a realizar la reconciliación con las ocho indicaciones arrojadas por los medidores, en cada uno de los puntos, donde se presenta la transferencia de custodia del gas.

5.2 Reconciliación de la Red con todas las Mediciones.

Una vez identificada la función de Cauchy, como la óptima, es posible realizar la reconciliación de las mediciones. Para esta red se contaba con los datos diarios correspondientes a un año de operación, por lo que la reconciliación se realizó para cada día. La Tabla 5 muestra la sumatoria para los dos recibos y las seis entregas del gas, así como la diferencia entre el inventario inicial y final, con las respectivas diferencias de las entradas y salidas de gas para 5 días de operación de la red, los cuales presentan un alto porcentaje de desbalances.

Factores de Rendimiento	M. Cuadrados	Cauchy	Fair
Nº Simulaciones	500	500	500
Total E.G simulados	967	268	352
E.G detectados	2277	351	337
E.G correctamente identificados	635	251	171
E.G incorrectamente identificados	1642	100	166
OP	0,660	0,937	0,486
AVTI	3,284	0,200	0,332
Selectividad	0,279	0,715	0,507
Promedio TER	-39,609	1,399	0,009
Mediana TER	-36,619	0,234	0,007

E.G = Errores Gruesos

Tabla 4. Cálculo de factores de rendimiento para la red de gas natural

BALANCES

Día	Δ Inventario(KPCE)	Recibos (KPCE)	Entregas (KPCE)	Desbalance (KPCE)	%Desbalance
1	6,91	2124,50	2760,85	-629,43	-29,63%
2	17,64	2356,82	2971,28	-596,81	-25,32%
3	51,06	3557,84	1836,48	1772,43	49,82%
4	-1,28	3910,68	2907,55	1001,85	25,62%
5	115,56	6137,00	4426,52	1826,04	29,75%

Tabla 5. Balances en la red de Gas Natural

VALORES CONCILIADOS

Día	Δ Inventario(KPCE)	Recibos (KPCE)	Entregas (KPCE)	Desbalance (KPCE)	%Desbalance
1	6,91	2124,52	2131,43	0,00	0%
2	17,64	2356,83	2374,48	0,00	0%
3	51,06	2190,88	2241,94	0,00	0%
4	-1,28	3910,67	3909,39	0,00	0%
5	115,56	4310,99	4426,55	0,00	0%

Tabla 6. Balances en la red con los valores reconciliados

La reconciliación, fue entonces aplicada a cada uno de los días del año, lo que permitió ajustar las mediciones de forma que se cumpla con las leyes de conservación de masa y energía. Esta reconciliación se realizó con las mediciones de los recibos y las entregas, sin tener en cuenta las indicaciones del medidor interno. Para este caso específico (aunque no aplica para todos) el Δ Inventario no fue reconciliado dado que las variaciones de presión son muy pequeñas con respecto al período de reconciliación (diario), por lo que el Δ Inventario se consideró despreciable, frente a los recibos y entregas de gas, sin embargo, sí se tomó en cuenta al momento de plantear las restricciones de la red (balances de masa). Los valores reconciliados de las mediciones para los 5 días de la tabla anterior se muestran en la tabla 6.

5.3 Identificación de Errores Gruesos

Utilizando la indicación de caudal volumétrico entregado por el medidor interno (M.I), se realizaron las reconciliaciones eliminando cada una de las

mediciones, con el fin de identificar los sistemas de medición que tuvieran las diferencias más altas, entre el valor medido y el valor reconciliado. Las indicaciones obtenidas por el medidor interno, permiten que las demás mediciones se conviertan en redundantes, lo que facilitó la detección de errores gruesos.

Inicialmente se retiró el medidor 1, se realizó la reconciliación sin dicho medidor y se encontró el valor del caudal 1, a partir de los balances de masa y la indicación del medidor interno; este procedimiento se repitió para cada uno de los datos de medición.

En la Figura 4 y la Figura 5 se muestran las variaciones entre los valores reconciliados (con y sin el respectivo medidor) y las mediciones de caudal para los medidores 3 y 5, como se observa en las gráficas los porcentajes de variación entre los 2 valores no son mayores al 1%, lo cual indica que estos sistemas de medición están funcionando correctamente. Así mismo para los demás medidores

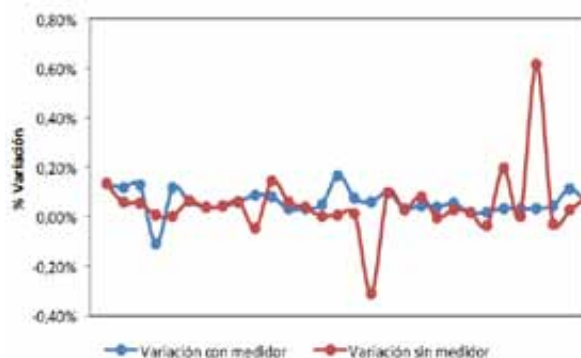


Figura 4. Variaciones entre el valor medido y los reconciliados del medidor 3

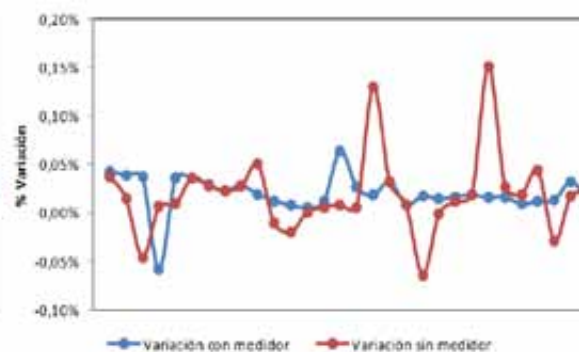


Figura 5. Variaciones entre el valor medido y los reconciliados del medidor 5

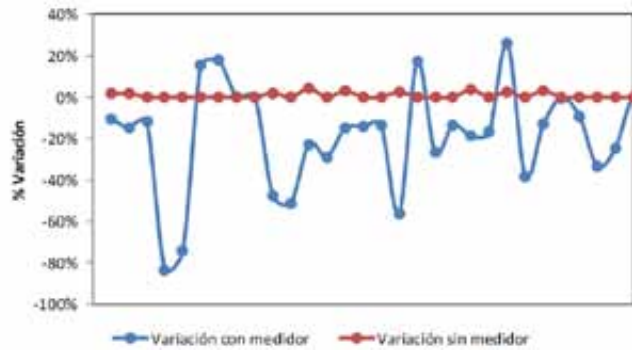


Figura 6. Variaciones entre el valor medido y los reconciliados del medidor interno (M.I)

ubicados en los puntos de recibo y entrega del gas, se encontraron resultados similares, lo que permitió concluir que dichos medidores no estaban generando errores gruesos que afectaban los cálculos de los balances en la red.

Por el contrario, cuando se evaluó el medidor interno (M.I) se encontraron grandes variaciones (+20% / -20%, -40%, -60%, -80%) entre el valor medido y el valor reconciliado, cuando el medidor es utilizado en la reconciliación. Por el contrario cuando este medidor no se utiliza en la reconciliación, las variaciones son pequeñas lo cual puede observarse en la Figura 6.

5.4 Toma de Decisiones y Mejoras Focalizadas

A partir de lo anterior, fue posible determinar que el medidor interno (M.I) debería ser intervenido, ya que probablemente presentaba fallas que generaban errores gruesos. Una actividad de inspección realizada posteriormente al sistema de medición (M.I), permitió confirmar el resultado obtenido con la aplicación del BRAM.

Una vez sean realizados los procesos de calibración y ajuste, es posible aplicar nuevamente el BRAM como método de control, logrando cada vez optimizar el balance de tal forma que se pueda realizar un correcto procedimiento de facturación en la compra y venta del gas natural. Adicionalmente, las inversiones de capital realizadas para la identificación de los errores en los sistemas de medición, resultaron siendo mínimas.

Finalmente, el BRAM, como herramienta de uso frecuente, permite monitorear las mediciones logrando detectar probables errores gruesos que en el futuro se puedan volver a presentar en la red.

6 CONCLUSIONES

- Se identificó, que una combinación de los métodos de minimización de funciones y de incertidumbre, es una metodología adecuada para realizar el ajuste de las mediciones y la detección de errores gruesos en las redes de gas natural.

BRAM, permite identificar aquellos sistemas de medición que presentan fallas y que generan la presencia de errores gruesos, facilitando a las empresas encargadas del transporte y la distribución del gas natural, conocer qué equipos requieren ser inspeccionados, calibrados y/o ajustados, con el fin de garantizar mediciones confiables que faciliten la realización de las distintas operaciones de facturación.

Por consiguiente, se reduce ostensiblemente la inversión en adquisición de nuevos sistemas de medición, e inclusive, en actividades de calibración e inspección que podrían resultar innecesarias, logrando al final, plena confiabilidad en los balances de la red de gas natural.

- Se determinó que para la aplicación de la técnica de minimización de error se requiere de una función objetivo. Luego de un barrido se encontró una gran cantidad de funciones de minimización que han sido desarrolladas en diversas investigaciones y reportadas en la literatura, sin embargo todas estas funciones tienen un rendimiento distinto dependiendo del proceso en el que se quiera aplicar. Para el caso de las redes de gas natural, se estableció que las funciones de Mínimos Cuadrados, Cauchy y Fair eran las más apropiadas, sin embargo para encontrar cuál es la más adecuada para una red determinada debe realizarse el cálculo de los factores OP, AVTI, Selectividad y TER.
- La aplicación del BRAM depende de la infraestructura y la ubicación de los sistemas de medición de la red que se pretende reconciliar, por lo tanto es necesario hacer un estudio de observabilidad y redundancia, que permita determinar si se cuenta con mediciones redundantes que faciliten la detección de errores gruesos y el posterior ajuste de las mediciones, puesto que de no contarse con tales variables redundantes, la aplicación de la metodología sería inviable. Es claro entonces, que de no contar con ellas, se requerirían adecuaciones en la red, previas a la aplicación del BRAM.
- La metodología aplicada, permite identificar aquellos sistemas de medición que presentan fallas y que generan la presencia de errores gruesos, facilitando a las empresas encargadas del transporte y la distribución del gas natural, conocer qué equipos requieren ser inspeccionados, calibrados y/o ajustados, con el fin de garantizar mediciones confiables que faciliten la realización de las distintas operaciones de facturación. Por consiguiente se reduce ostensiblemente la inversión en adquisición de nuevos sistemas de medición, e inclusive, en actividades de calibración e inspección que podrían resultar innecesarias, logrando al final, plena confiabilidad en los balances de la red de gas natural.
- El modelo implementado, aplicó correctamente a la red en la que fue evaluada, ya que dicha red contaba con un control previo de las mediciones (aseguramiento metrológico, errores sistemáticos pequeños e incertidumbres razonables), lo que permitió determinar cual medidor presentaba las fallas y generaba los errores gruesos. Durante las pruebas, y teniendo en cuenta el conocimiento real de la red, fue posible confirmar que el nuevo modelo implementado, que permite aplicar la reconciliación de datos, realizó un correcto ajuste a las mediciones.
- Finalmente, se realizó en el CDT de GAS un estudio relacionado con el estado del arte, acerca de las metodologías que permiten efectuar el control de los balances en los distintos procesos, lo cual permitió identificar las distintas herramientas estadísticas desarrolladas a nivel internacional para la ejecución de la reconciliación de datos. Es importante destacar, que el CDT de GAS continuará estudiando y desarrollando este modelo, el cual podría permitir a nivel nacional, un avance tecnológico importante, ya que la utilización de herramientas estadísticas para el control de los balances, puede ser aplicada en cualquier tipo de proceso y para cualquier red de fluidos que se encuentren en una sola fase.

REFERENCIAS

- [1] ORTIZ AFANADOR, Juan M y VELOSA CHACÓN, John F. Aplicación de análisis de incertidumbre a la optimización de balances en redes de flujo de fluidos. Revista MET&FLU. N° 1. 2009
- [2] VOCABULARIO INTERNACIONAL DE METROLOGÍA. Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM), JCGM 200:2008.
- [3] BAGAJEWICZ, Miguel J y CABRERA, Enmanuel. Data Reconciliation in Gas Pipeline Systems. 2003
- [4] MANDEL, Denis; ABDOLLAHZADEH, Ali; MAQUIN, Didier; RAGOT, José. Data Reconciliation by inequality balance equilibration: a LMI approach. 1997
- [5] RAO, R. Ramesh y NARASIMHAN, Shankar. Comparison of Techniques for Data Reconciliation of Multicomponent Process.
- [6] MAQUIN, Didier; ADROT, Olivier; RAGOT, José. Data Reconciliation with uncertain models. 2000
- [7] MAQUIN, Didier. Y RAGOT, José. Comparison of Gross Errors Detection Methods in Process Data. 1991
- [8] NARASIMHAN, Shankar y JORDACHE, Cornelius. Data Reconciliation & Gross Error Detection. An intelligent use of Process Data. Gulf Publishing Company. 2000
- [9] OLIVEIRA, Elcio C. y AGUIAR, Paula F. Data Reconciliation in the Natural Gas Industry: Analytical Applications. 2009.
- [10] HAMPEL, F. R., RONCHETTI, E. M., ROUSSEEUW, P. J. y STAHEL, W. A. Robust statistics—the approach based on influence functions. New York: Wiley. (1986).
- [11] ÖZYURT, Derya B y PIKE, Ralph W. Theory and practice of simultaneous data reconciliation and gross error detection for chemical processes. 2004
- [12] DRUD, Arne. Conopt: a GRG code for large sparse dynamic nonlinear optimization problems. 1983