

**PLANTEAMIENTO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN Y CONTROL
DE LOS BALANCES EN LAS REDES DE GAS NATURAL**

DIANA MARCELA CASTILLO BLANCO



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2010

**PLANTEAMIENTO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN Y CONTROL
DE LOS BALANCES EN LAS REDES DE GAS NATURAL**

DIANA MARCELA CASTILLO BLANCO

Trabajo de Grado para optar al título de

Ingeniera Química

Director:

CRISÓSTOMO BARAJAS FERREIRA

M. Sc. Ingeniero Químico

Codirector:

JOSÉ AUGUSTO FUENTES OSORIO

Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BUCARAMANGA

2010

DEDICATORIA

A mi Madre Martha, la mejor mujer que Dios escogió para mí, quien puso su vida entera al servicio de la mía; sin su amor, su compañía y sus esfuerzos por hacer de mí una gran persona, nada de esto sería posible.

Nunca encontraré la forma de pagar todo cuanto hizo por mí; cada una de las noches que pasó a mi lado cuando yo estaba enferma, cada uno de los días que lloró por verme triste, cada una de las cosas que me brindó aun cuando le hacían falta a ella y cada una de las oraciones que hizo por mí; me permiten hoy estar aquí. Por eso este y todos los triunfos de mi vida siempre estarán dedicados a ella.

A mi Padre Alfonso; por su apoyo y sus consejos para que fuera una mejor persona, por el esfuerzo de su trabajo diario para que todos sus hijos saliéramos adelante, por ser mi ejemplo de superación a seguir.

A mi Nonita Elvira y a Noemí; quienes al lado de mi madre me vieron crecer y compartieron conmigo muchos años de mi vida. Quisiera que pudieran estar aquí compartiendo conmigo mi felicidad, pero sé que desde el cielo cuidan todos mis pasos.

A la Familia Serrano Ramírez; por todo el cariño y el afecto que me han brindado durante toda mi vida.

A mis hermanos; por aceptarme sin prejuicios a pesar de las circunstancias.

A Adolfo; por sus consejos, su compañía, su amor, por querer siempre que sea alguien mejor.

A todos mis compañeros y amigos de la Universidad; por hacer más amenas las largas jornadas de estudio.

Al Teatro UIS; por permitirme cada noche salir de la rutina diaria y hacerme olvidar de los problemas, por enseñarme que vale la pena soñar y luchar por lo que se quiere, por hacerme un ser integral.

“La vida es como una obra de teatro: No es la duración sino la excelencia de los actores lo que importa”

Séneca

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar doy gracias a Dios por darme la vida, la salud y las capacidades para poder realizar éste y todos los proyectos de mi vida.

A la Corporación CDT de GAS, por abrirme sus puertas y darme la oportunidad de realizar este proyecto. A cada una de las personas que integran ese gran equipo de trabajo; quienes sacaron un poco de tiempo en sus actividades para compartir conmigo sus conocimientos y de manera muy especial mis mayores agradecimientos al Ing. José Augusto Fuentes y a René Gamboa por su paciencia, su tiempo, su colaboración, su dedicación, sus enseñanzas y su interés porque todo saliera bien.

Al M.Sc Crisóstomo Barajas Ferreira, por su colaboración y apoyo en el desarrollo del proyecto.

A la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería Química, el lugar que durante estos 5 años me enseñó a ver el mundo con otros ojos.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
1. IMPORTANCIA DEL BALANCE EN LAS REDES DE GAS NATURAL	15
1.1 Cadena de gas natural	15
1.2 Reglamentación Nacional del control de balances en transporte y distribución ...	16
1.3 Cálculo del Balance de Masa y de Energía	18
1.4 Observabilidad y Redundancia.....	20
2. CONCILIACIÓN DE DATOS.....	21
2.1 Definición de la conciliación de datos.....	21
2.2 Aplicaciones de la conciliación de datos	21
2.3 Métodos estadísticos para la realización de la conciliación de datos	25
2.4 Selección de métodos aplicables a las redes de gas natural	27
3. IMPLEMENTACIÓN DE LA CONCILIACIÓN DE DATOS	29
3.1 Estructura de la implementación de la conciliación de datos	29
3.1.1 Identificación del modelo a utilizar	29
3.1.2 Evaluación y selección de la función de minimización	30
3.1.3 Conciliación de la red con todas las mediciones.....	32
3.1.4 Identificación de errores gruesos	32
4. APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE CONCILIACIÓN DE DATOS.....	34
4.1 Aplicación del modelo seleccionado de conciliación de datos a un proceso	34
4.2 Aplicación de la conciliación de datos a una red de transporte de gas natural	38
5. CONCLUSIONES	43
6. RECOMENDACIONES.....	44
7. BIBLIOGRAFÍA.....	45
8. ANEXOS.....	46

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Funciones objetivo para el método de minimización de errores	28
Tabla 2. Comparación entre los métodos seleccionados	29
Tabla 3. Caudales verdaderos y medidos para el proceso de intercambio de calor	34
Tabla 4. Valores conciliados del proceso de intercambio de calor	35
Tabla 5. Cálculo de factores de rendimiento del proceso de intercambio de calor.....	36
Tabla 6. Sumatoria de errores para cada una de las conciliaciones realizadas	37
Tabla 7. Diferencias entre el valor ajustado y medido para las conciliaciones	38
Tabla 8. Balances en la red de transporte de gas natural	40
Tabla 9. Valores a los que se adicionaron los errores gruesos	41
Tabla 10. Cálculo de factores de rendimiento para la red de gas natural	41
Tabla 11. Composición del gas natural	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cadena de transferencia de gas natural	15
Figura 2. Variables observables y redundantes	20
Figura 3. Mediciones de poder calorífico en una tubería de gas natural	22
Figura 4. Medición de caudal y composición de CO ₂ en transferencia de custodia	23
Figura 5. Resultados de la conciliación de datos para dos mediciones de una variable	24
Figura 6. Mezcla de corrientes de gas natural.....	24
Figura 7. Red de tuberías de gas natural con mediciones redundantes	25
Figura 8. Metodología para la implementación de la conciliación de datos.....	29
Figura 9. Proceso de intercambio de calor al que se aplicó la conciliación de datos	34
Figura 10. Red real de transporte de gas natural	39
Figura 11. Valores medidos y conciliados del medidor interno	42
Figura 12. Error de medición	50
Figura 13. Sistema de medición	54
Figura 14. Simulación con Monte Carlo en Excel.....	56

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. METROLOGÍA.....	46
ANEXO B. EL GAS NATURAL.....	51
ANEXO C. SISTEMA DE MEDICIÓN.....	53
ANEXO D. SIMULACIÓN CON MONTECARLO.....	55

RESUMEN

TÍTULO: PLANTEAMIENTO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN Y CONTROL DE LOS BALANCES EN LAS REDES DE GAS NATURAL*

AUTOR: Diana Marcela Castillo Blanco**

PALABRAS CLAVES: Balances, Gas Natural, Conciliación de datos, Mediciones, Error, Minimización.

DESCRIPCIÓN:

Por medio de este trabajo de grado se propone una metodología, que permita realizar el control de los balances a través de la detección de errores gruesos, identificados por herramientas de conciliación de datos. En dicho proyecto, se realizó un barrido de los métodos que se han desarrollado a nivel internacional sobre esta técnica, un análisis de cada uno de ellos que permitiera identificar los más apropiados para la aplicación en las redes de gas natural y una selección de la metodología más adecuada; a partir de una evaluación de desempeño de los diferentes modelos mediante procesos iterativos, siguiendo los lineamientos establecidos para la simulación Monte Carlo.

Esta metodología, que tiene una gran cantidad de aplicaciones importantes, permite identificar probables sistemas de medición que podrían estar presentando fallas y que por tanto deberían ser intervenidos para su optimización (inspeccionados, calibrados y ajustados); además propone un ajuste a las mediciones para disminuir los desbalances en las redes, si se conoce adecuadamente la calidad de la información utilizada. La metodología propuesta se basa en la minimización de los errores de las mediciones por medio de una función objetivo de minimización; finalmente dicha metodología fue aplicada a un ejercicio teórico encontrado en la literatura y posteriormente a una red real de transporte de gas natural, con el fin de comprobar la efectividad de la estructura propuesta para la conciliación de datos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander, Director M.Sc. Crisóstomo Barajas Ferreira, Codirector Ing. José Augusto Fuentes

ABSTRACT

TITLE: PROPOSAL OF A METHOD TO EVALUATE AND CONTROL THE BALANCES IN NATURAL GAS NETWORKS*

AUTHOR: Diana Marcela Castillo Blanco**

KEYWORDS: BALANCES, NATURAL GAS, DATA RECONCILIATION, MEASUREMENTS, ERROR, MINIMIZATION.

CONTENT:

By means of this graduation project it is proposed a new methodology that allows controlling the balances through the detection of gross errors, identified by tools of data reconciliation. In such project there was made a scanning of the methods that had been used internationally about this technique; it was also carried out an analysis of each of those methods, so it could be identified the most appropriate for the implementation in the natural gas networks, and a more adequate selection of the methodology. From an evaluation of the different models' performance through iterative processes, following the established guidelines to the Monte Carlo simulation.

This methodology, which has a great quantity of important implementations, allows to identify probable measurement systems that could be failing and, therefore, should be intervened their optimization (inspected, calibrated, adjusted); plus, proposes and adjustment to the measurements to diminished the imbalance in the networks, if the quality of the used data is adequately known. The proposed methodology is based in the minimization of errors in the measurements by means of a function objective of minimization; finally, such methodology was applied to a theoretical exercise found in the literature and then to a real natural gas transportation network, with the aim of checking the effectiveness of the structure proposed for the data reconciliation.

* Degree Work

** Chemical Engineering School, Physic-Chemistry Faculty, Industrial of Santander University, Director M.Sc. Crisóstomo Barajas Ferreira, Codirector Ing. José Augusto Fuentes

INTRODUCCIÓN

La metrología, juega un papel transcendental en muchos campos de la vida cotidiana, desde los procesos más avanzados y complejos de la industria, hasta muchas de las actividades diarias de todos los seres humanos requieren de la medición de diversos tipos de magnitudes, es por esto que la ciencia de las mediciones está en continuo avance, ya que siempre está en búsqueda de la obtención de mediciones más exactas y confiables que permitan mejorar muchos procesos. Para el caso particular de la industria del gas natural, la metrología permite conocer la cantidad de gas comercializado, así como la energía que éste puede liberar, permitiendo así, realizar las operaciones de transferencia de custodia¹ del gas en transporte y distribución, así como las respectivas facturaciones a los usuarios.

Una medición permite encontrar un valor para una determinada magnitud; sin embargo, hasta ahora es imposible obtener mediciones exactas; aun cuando se utilizan los sistemas de medición más avanzados siempre existirá una duda respecto al valor medido; dicha duda, proveniente de diversos factores, se denomina “*incertidumbre de la medición*” y debe ser reportada cada vez que se indica el valor medido de una magnitud.

Estos errores presentes en las mediciones, afectan los procedimientos de comercialización y facturación del gas distribuido, dado que cuando se realizan los respectivos balances de masa y energía, se identifican y evidencian diferencias entre la masa de gas recibida y la entregada. Estas diferencias se denominan comúnmente como “desbalances” o “pérdidas” y pueden ocasionar grandes problemas a las empresas distribuidoras o transportadoras, tales como: pérdidas considerables de dinero si el desbalance es desfavorable, dificultades al momento de realizar los cobros a los consumidores, ya que no se cuenta con ninguna técnica que permita reconocer si el valor de flujo que genera el desbalance debe ser asumido por el distribuidor o por el consumidor, conflictos para cumplir con las regulaciones legales, problemas jurídicos y

¹ Entrega física del gas de una entidad a otra que lo recibe y asume la custodia del mismo.

desconfianza e inseguridad por parte de consumidores y usuarios. Una forma de reducir estos problemas, es por medio de la obtención de mediciones más confiables y que tengan una menor incertidumbre, sin embargo esto implicaría la utilización de sistemas de medición con mejores características metrológicas y por lo tanto mucho más costosos, haciendo esta solución inviable para la mayoría de las entidades. Es por esto que se hace necesario encontrar herramientas que permitan identificar “errores gruesos” (ver Anexo A) y ajustar las mediciones de forma que se reduzcan dichos errores y se cumpla con las restricciones impuestas por las leyes de conservación.

La herramienta más reconocida y utilizada a nivel internacional para realizar estos ajustes es la conciliación de datos, la cual emplea cálculos estadísticos que permiten evaluar y optimizar (en algunos casos) la confiabilidad y calidad de los datos medidos; disminuyendo el error de éstos y cumpliendo con los balances de masa y energía, sin embargo esta técnica no es muy usada a nivel nacional e inclusive internacional, dada la complejidad y la poca disponibilidad de herramientas que permitan implementarla, por lo que se pretende a partir de un estudio del estado del arte de los diferentes métodos aplicados y evaluados por diferentes entidades internacionales y que están reportados en la literatura, identificar, evaluar el desempeño de cada uno de ellos y proponer una metodología que pueda aplicarse a los procesos de transporte y de distribución de gas natural obteniendo de esta forma un modelo totalmente aplicable que permita identificar errores sistemáticos en una red de gas y ajustar los valores para la compra y venta del gas natural por parte de las instituciones.

El planteamiento de esta metodología le permitiría a Colombia, un desarrollo tecnológico importante ya que la utilización de herramientas estadísticas para el control de los balances, puede ser aplicado en cualquier tipo de proceso y para cualquier fluido. Este proyecto, incluye por tanto, una revisión bibliográfica de los distintos métodos desarrollados a nivel internacional, la evaluación de desempeño de cada uno de ellos, la factibilidad de aplicación a una red de gas natural y la propuesta de un modelo adecuado para los procesos ya mencionados.

1. IMPORTANCIA DEL BALANCE EN LAS REDES DE GAS NATURAL

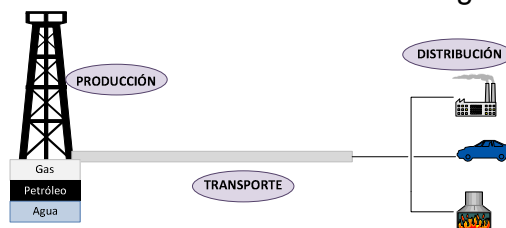
1.1 Cadena de gas natural

Generalmente, los yacimientos de gas natural están ubicados a cientos de kilómetros de los sitios urbanos donde se encuentran los consumidores finales; por tanto se hace necesario transportar este gas desde el sitio donde es extraído hasta el lugar donde será utilizado. Esta cadena que permite realizar la transferencia de custodia del gas natural, está compuesta por tres actividades (Ver Figura 1):

- ❏ Producción: Consiste en la extracción del gas del yacimiento y su posterior tratamiento para que cumpla especificaciones legislativas establecidas a nivel nacional y se considere seguro para su consumo.
- ❏ Transporte: Transferencia del gas por medio de tuberías desde el punto donde se realiza la extracción hasta el “citygate”².
- ❏ Distribución: En esta etapa se recibe el gas entregado por el transportador y se lleva al usuario final. Las concesionarias administradoras del gas en distribución, son denominadas comúnmente “distribuidoras de gas”.

El transporte del gas desde el yacimiento hasta el domicilio o la industria donde se vaya a utilizar, se hace principalmente (en Colombia), por medio de tuberías, denominadas gasoductos y siempre se debe cumplir con las reglamentaciones impuestas por la CREG³ en el Registro Único de Transporte—RUT) y en el Código de Distribución de Gas; en los cuales se especifican lineamientos de operación, instalación, calibración y control de balances, estos últimos serán tratados en detalle en el siguiente numeral.

Figura 1. Cadena de transferencia de gas natural



Fuente: Autor

² Estación de entrega de gas en las puertas de ciudad para su consumo final.

³ Comisión de Regulación de Energía y Gas

1.2 Reglamentación Nacional del control de balances en transporte y distribución

El RUT, en el numeral 4.9 establece que: “Las pérdidas de gas de un sistema de transporte serán calculadas de acuerdo con la ecuación 1”:

$$Pérdidas = C_e + (C_{ai} - C_{af}) - C_t - C_{op} \quad (1)$$

Donde:

- 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.

El manual del transportador, deberá tener claramente establecido el procedimiento de cálculo de la cantidad de energía almacenada en el Sistema de Transporte (C_{ai} y C_{af})

Adicionalmente, en el numeral 4.9.1, del mismo documento, se menciona que: “Las pérdidas de gas del sistema de transporte que excedan del uno por ciento (1%) serán asumidas por el transportador. Las pérdidas de gas que no excedan el 1% serán distribuidas entre los remitentes en forma proporcional a la cantidad de energía transportada y serán reconocidas por éstos al transportador en la factura mensual del servicio”. Por otra parte, con respecto a la actividad de distribución de gas, existe la resolución CREG 057⁴. En dicho documento, se ha extraído la siguiente definición tomada del Capítulo 1 –Definiciones–, válida para el tema de los Balances de Gas:

⁴ Resolución CREG 057 – 1996. “Marco Regulatorio para el servicio público de gas combustible por red y para sus actividades complementarias ”

“PÉRDIDAS EN DISTRIBUCIÓN: Es la diferencia entre el gas natural disponible para la venta y el gas natural facturado. El gas natural disponible para la venta es el resultado del gas natural comprado en puerta de ciudad menos el consumo propio.”

De acuerdo con la anterior definición, se deduce que para obtener las pérdidas en las redes de distribución, se debería aplicar la ecuación 2 ó 3:

$$\text{Pérdidas} = V_t - V_f \quad (2)$$

$$\text{Pérdidas} = \frac{(V_t - V_f)}{V_t} * 100 \quad (3)$$

Donde:

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

Ahora bien, si las pérdidas en distribución, son menores al 4% (límite máximo establecido por la CREG 057), éstas son asumidas por los consumidores finales, por el contrario si las pérdidas son mayores al 4%, el excedente de este límite, debe ser asumido por la empresa distribuidora de gas.

Teniendo en cuenta este panorama, se evidencia claramente la necesidad (económica) de controlar adecuadamente los balances en las redes de gas. En el caso del transportador es necesario garantizar que las pérdidas sean menos del 1% del volumen administrado y para el distribuidor del 4%. Esta diferencia se debe a las limitantes en tecnologías de medición utilizadas por los usuarios finales (los denominados comúnmente contadores de gas domiciliarios). Para tratar este tema es necesario conocer claramente, los factores importantes que inciden en un proceso de control de balance de gas; estos son:

- ☉ La infraestructura necesaria, asociada principalmente a los sistemas de medición de volumen de gas (que pueden ser considerados como las cajas registradoras) y la importancia de la adecuada aplicación de la metrología para el control de las

mediciones. Dicha infraestructura y conceptos metrológicos serán explicados brevemente en el Anexo A.

- ☉ Las ecuaciones básicas para el cálculo del balance de la cantidad de gas a partir de dos leyes: a) conservación de la masa y b) primera ley de la termodinámica. (Estos dos últimos factores serán tratados posteriormente)
- ☉ Los métodos estadísticos de “conciliación de datos”, que permiten realizar la detección de probables errores gruesos en una red de gas y el ajuste de las mediciones. Este factor, objeto del proyecto, será tratado en el siguiente capítulo.

1.3 Cálculo del Balance de Masa y de Energía

En todo proceso que se realice y en general en cualquier operación que se lleve a cabo, debe cumplirse con la ley de conservación de la masa, la cual establece que: “La materia no se crea ni se destruye sólo se transforma”; dicha ley indica que la cantidad de materia que ingresa a un proceso debe ser igual a la que sale, en términos matemáticos esto se puede representar por medio de la siguiente ecuación:

$$\sum Entradas - \sum Salidas + Generación - Consumo - Acumulación = 0 \quad (4)$$

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 contenida en la tubería y se conoce también como “*inventario de gas*”. Para la entidad encargada de la administración de una tubería de gas, al igual que para cualquier organización, es indispensable conocer dicha cantidad de materia, ya que esta le permitirá realizar el cálculo del balance de masa en las redes, con este fin se realiza la medición del inventario en las tuberías al inicio y al final del día.

Adicionalmente a la medición del inventario, también debe tomarse la medición del volumen de gas en cada uno de los puntos donde se tengan recibos (entradas) y

entregas (salidas) del energético. Con esta información, el balance de masa en las redes de gas natural se calcula por medio de la siguiente ecuación:

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

Dónde:

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

Como se mencionó anteriormente, la ecuación (4) 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. Igualmente, existe otra ecuación de balance, la cual está relacionada con la conservación de la energía; dicha ecuación es la primera ley de la Termodinámica y establece que: “La energía no se crea ni se destruye sólo se transforma”. Para el caso de la transferencia de gas natural, el cálculo del balance de energía se realiza por medio de la siguiente ecuación:

$$\sum P.C * \text{Recibos} - \sum P.C * \text{Entregas} + P.C * \Delta \text{Inventario} = 0 \quad (7)$$

Donde

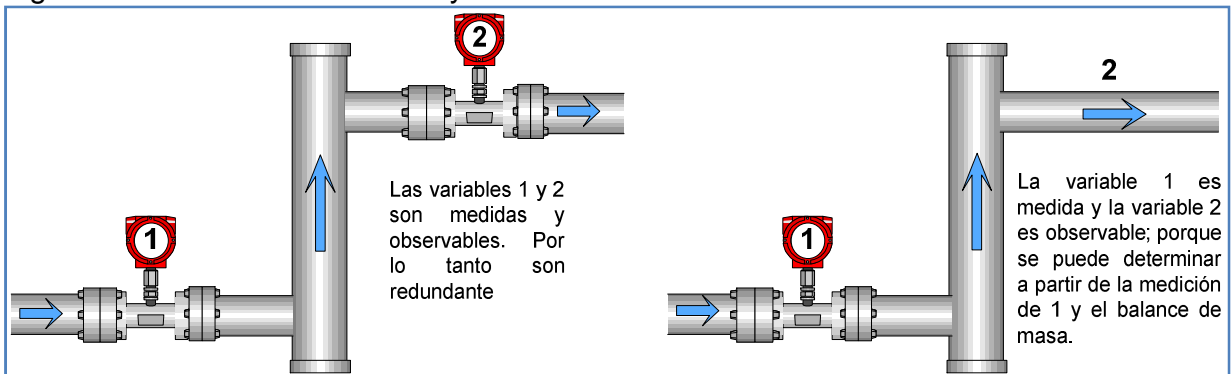
$P.C$ Poder calorífico superior del gas natural

Esta ecuación también es una restricción del proceso, por lo que debe controlarse con el fin de garantizar su cumplimiento. A partir de lo anterior, es posible concluir que para realizar los cálculos de balance, es necesario tener las mediciones de los caudales volumétricos del gas recibido y entregado, así como el poder calorífico del mismo. Estas variables que permiten efectuar los balances, se dividen en observables y redundantes; dicha clasificación será explicada a continuación.

1.4 Observabilidad y Redundancia

Teniendo la ecuación de balance de masa es posible determinar el valor de un caudal volumétrico en algún punto de la red donde no se tenga un medidor, 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**. Las variables **redundantes**, por su parte, 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 [1]. La Figura 2 muestra un ejemplo de estos tipos de variables.

Figura 2. Variables observables y redundantes



Fuente: Autor

2. CONCILIACIÓN DE DATOS

2.1 Definición de la conciliación de datos

Como se mencionó anteriormente, en todos los procesos que se llevan a cabo en la industria están presentes las mediciones con diferentes propósitos: control, monitoreo del proceso, facturación, etc., sin embargo dichas mediciones siempre están contaminadas por errores (ver Anexo A), tanto de tipo sistemático (denominadas en este documento como errores gruesos) como de tipo aleatorio. En consecuencia de estos errores, cuando los valores de una magnitud indicados por un medidor se ingresan en las ecuaciones de conservación, se encuentra que las leyes de la naturaleza son desobedecidas.

La conciliación de datos es una técnica que permite identificar estos errores y mejorar la calidad de las mediciones disminuyendo el efecto de los errores sistemáticos, esta técnica utiliza las 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; los valores ajustados por medio de esta técnica cumplen con los balances de masa. La conciliación de datos requiere la ausencia de errores gruesos para realizar un correcto ajuste de las mediciones, por lo que es necesario detectar estos errores antes de aplicar la técnica a cualquier proceso.

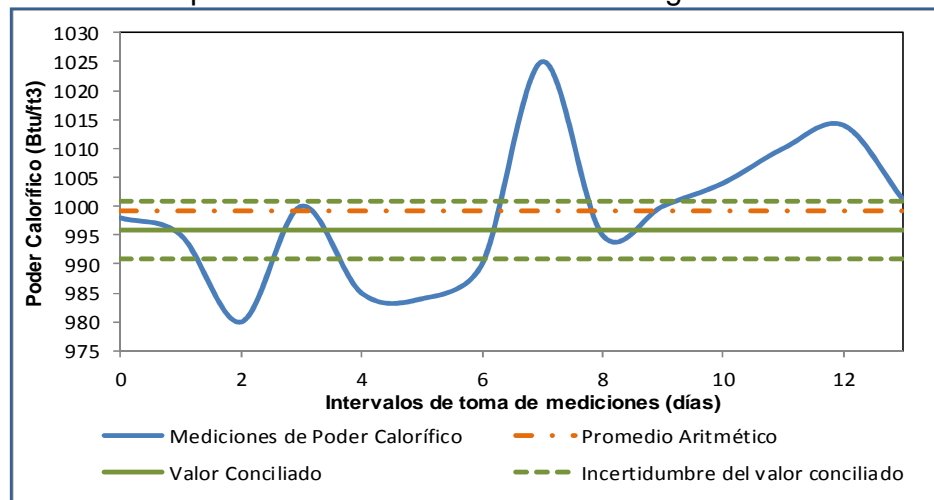
2.2 Aplicaciones de la conciliación de datos

Debido a la gran cantidad de ventajas que presenta la técnica de conciliación de datos, las aplicaciones que tiene dicha herramienta en los procesos son amplias y muy importantes. Estas aplicaciones son las siguientes:

🔗 **Estudios de Homogeneidad:** La homogeneidad de las mediciones consiste en la uniformidad o semejanza que tiene una serie de valores medidos de una variable en ciertos intervalos de tiempo, un ejemplo cotidiano de la realización de estudios de homogeneidad en la industria del gas se observa en las mezclas de dos o más corrientes con distintos valores de poder calorífico, lo que origina una variación

considerable en el tiempo, de la composición del gas y por tanto fluctuación del poder calorífico tal y como se observa en la Figura 3; en estos casos la homogeneidad de las mediciones es baja y se hace necesario encontrar un método que permita encontrar un valor representativo para el poder calorífico de la mezcla, valor necesario para hacer los cálculos de energía contenida en el gas. Esta figura muestra doce (12) mediciones de poder calorífico de una mezcla de corrientes de gas natural, la línea naranja corresponde al valor promedio de estas mediciones, la línea verde al valor conciliado y las líneas punteadas representan la incertidumbre del valor conciliado. La regulación legal expresa que el valor que debe tomarse como el poder calorífico de este punto es el valor del promedio aritmético mensual, sin embargo, como se observa en la figura debido a los grandes cambios que se presentan en las mediciones el promedio no representa fielmente todos los valores. La conciliación de datos que realiza un mejor ajuste, permite identificar el periodo de tiempo en el que se debe realizar dicha conciliación de forma que el valor estimado sea representativo. Para este caso de acuerdo con el método de conciliación de datos se debería disminuir el periodo de promediación de un (1) mes a un (1) día.

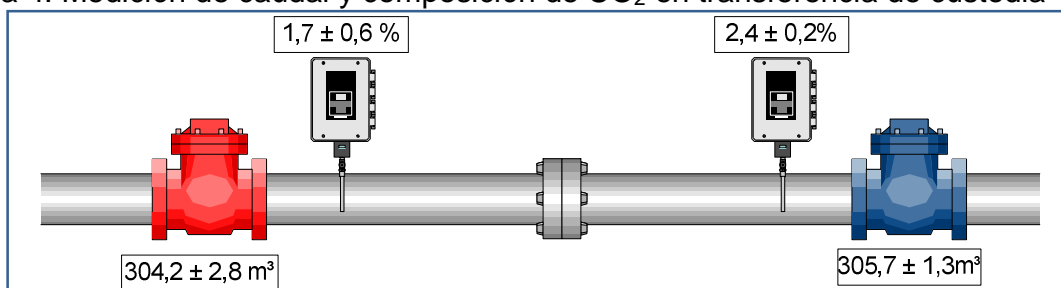
Figura 3. Mediciones de poder calorífico en una tubería de gas natural



Fuente: Autor

☞ **Solución de Disputas:** La Figura 4 muestra dos (2) mediciones para el caudal volumétrico de gas que se realizan en un proceso de transferencia de custodia, una de estas mediciones es realizada por la entidad que entrega el gas y la otra por quien lo recibe, sin embargo ambos medidores arrojan indicaciones diferentes, lo que representa problemas al momento de realizar las distintas operaciones de facturación; es en este punto donde la conciliación de datos permite encontrar a partir de estas dos mediciones un valor representativo que se considera como el valor convencionalmente verdadero. Otro ejemplo es en la medición de calidad de gas; se tienen dos (2) mediciones para la concentración de CO₂ en el gas, el RUT establece que el contenido máximo permitido de CO₂ es del 2% (v/v), en la figura se muestra que en la primera medición se cumple con este límite, sin embargo la indicación del segundo medidor expresa que la concentración no cumple con la legislación; para poder tomar una decisión en esta situación es posible aplicar la conciliación de datos para encontrar un único valor que indique si se cumple o no con dicha regulación.

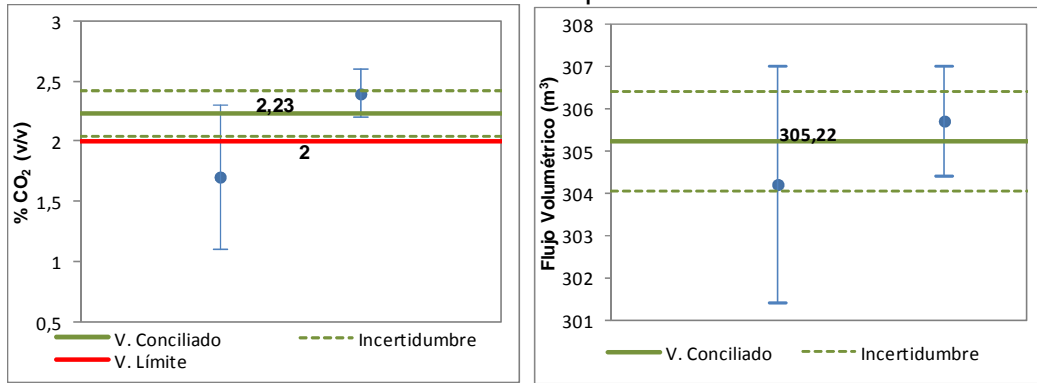
Figura 4. Medición de caudal y composición de CO₂ en transferencia de custodia



Fuente: Autor

La Figura 5 muestra los resultados obtenidos al aplicar la conciliación de datos, para las dos mediciones de caudal volumétrico; a partir de esto se concluye que el valor convencionalmente verdadero es $305,22 \pm 1,2 \text{ m}^3$. Así mismo, en la figura se puede observar el valor conciliado de composición de CO₂; el cual está representado por la línea verde y es $2,23 \pm 0,19 \text{ m}^3$, esto permite deducir que el gas estudiado no cumple con el límite permitido por la regulación (línea roja).

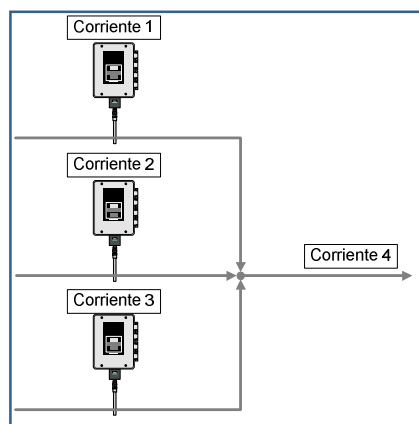
Figura 5. Resultados de la conciliación de datos para dos mediciones de una variable



Fuente: Autor

☞ **Determinación de la composición en mezclas:** La conciliación de datos permite obtener un valor estimado de la composición de una mezcla de dos o más corrientes como la que se muestra en la Figura 6; en la cual las corrientes 1, 2 y 3 tienen todas las variables medidas. Para determinar dicha composición es necesario utilizar el balance de masa total, los balances por componentes y la relación de que la suma de las composiciones debe ser igual a 1. Esto permite tener una ecuación redundante, que será la restricción que debe cumplirse para el ajuste de los datos, posteriormente los valores conciliados se reemplazan en las ecuaciones de balance y se obtiene la composición en la corriente 4.

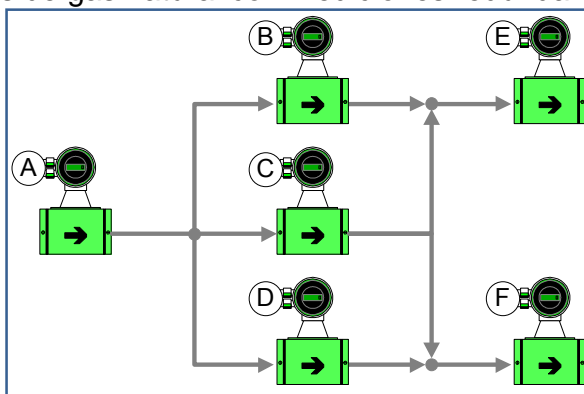
Figura 6. Mezcla de corrientes de gas natural



Fuente: Autor

☞ **Diagnóstico de Equipos:** La conciliación de datos permite determinar qué equipos de una red presentan fallas y por tanto generan errores gruesos. La Figura 7 muestra un ejemplo de una red de tuberías de gas en la que se tienen mediciones redundantes, lo que permite determinar las mediciones que presentan errores gruesos. Posteriormente se explicará el proceso de que debe desarrollarse.

Figura 7. Red de tuberías de gas natural con mediciones redundantes



Fuente: Autor

☞ **Control de los Balances:** Es la principal aplicación de la conciliación de datos, ya que permite identificar las probables mediciones confiables de una red, encontrando estimados más precisos que son representativos, estos valores cumplirían, además, con las restricciones impuestas por las leyes de conservación. El control de los balances, como se mostrará más adelante, permite también realizar el diagnóstico de los equipos.

2.3 Métodos estadísticos para la realización de la conciliación de datos

En la literatura se encuentra una gran variedad de métodos que han sido desarrollados para realizar la conciliación de datos en distintos procesos [2][3][4]. Luego de realizar un amplio barrido de dichos métodos y de estudiar y comprender cada uno de ellos, se seleccionaron los que probablemente podrían ser correctamente aplicados para el proceso de transporte de gas. Dicha selección se realizó teniendo en cuenta que la herramienta que se desea desarrollar se debe enfocar principalmente al control de los

balances en las redes de Gas Natural, las ecuaciones que representan estos balances 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 conciliación de datos en procesos no lineales, adicionalmente también se eliminaron las metodologías que requerían algoritmos demasiado complejos para la realización de los cálculos de balance y para la conciliación; ya que se busca una herramienta que permita encontrar estimados precisos sin requerir de tiempos demasiado largos de procesamiento. Los métodos seleccionados inicialmente fueron los siguientes:

☉ Minimización de Funciones [5]: 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 (incertidumbre) 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 mostrarán más adelante. 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 [6]: Este método permite encontrar el valor conciliado de una variable a partir de dos o más mediciones redundantes de esa misma variable; por 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.

☉ Matrices [7]: Siguiendo una distribución normal para los errores de las mediciones ε , se encuentra que los estimados de las mediciones (valores conciliados)

se pueden determinar a partir de la siguiente ecuación, que involucra operaciones entre matrices:

$$\hat{X} = (I - VM^T(MVM^T)^{-1})Z \quad (8)$$

Donde:

- \hat{X} Vector de las estimaciones (conciliados)
- I Matriz identidad
- V Matriz de varianza-covarianza
- M Matriz de restricciones
- M^T Transpuesta de la matriz de restricciones

Con este método es posible encontrar los valores ajustados de las variables, por medio de operaciones entre matrices. El método de operaciones con matrices se puede aplicar para realizar el control de balances, sin embargo no se puede utilizar para realizar la conciliación de datos a un conjunto de mediciones, puesto que es necesario utilizar la matriz M constituida por las restricciones impuestas por los balances de masa.

2.4 Selección de métodos aplicables a las redes de gas natural

Cada uno de los métodos seleccionados anteriormente fueron aplicados a varios ejercicios, lo que permitió a partir de los resultados obtenidos, evaluar el desempeño de cada uno y descartar el método de matrices ya que requiere el conocimiento del valor de la varianza y la covarianza de las mediciones, las cuales difícilmente se encuentran. Adicionalmente dicho método no permite ser automatizado fácilmente lo cual complicaría el desarrollo de una herramienta práctica de conciliación, considerando que debe realizarse el ajuste de un gran número de mediciones. A partir de esto se determinó la viabilidad de uso de los métodos de minimización de funciones y de incertidumbre.

Como se mencionó anteriormente, el método de minimización consiste en la reducción de errores, por medio de una función objetivo (ρ), las funciones objetivo que se utilizarán se muestran en la Tabla 1, dichas funciones han sido estudiadas y validadas,

por lo que son reconocidas internacionalmente, lo que garantiza la calidad de los resultados que se obtengan.

Tabla 1. Funciones objetivo para el método de minimización de errores

Función de Minimización	Ecuación
MÍNIMOS CUADRADOS	$\rho_i = \varepsilon_i^2$ (9)
NORMAL CONTAMINADA	$\rho_i = -\ln \left\{ 0,765e^{\left(-\frac{\varepsilon_i^2}{2}\right)} + 0,0235e^{\left(-\frac{\varepsilon_i^2}{200}\right)} \right\}$ (10)
CAUCHY	$\rho_i = \ln \left(1 + \frac{\varepsilon_i^2}{2,3849^2} \right)$ (11)
LORENTZIAN	$\rho_i = -\frac{1}{1+(\varepsilon_i^2/13,52)}$ (12)
FAIR	$\rho_i = \left[\frac{ \varepsilon_i }{1,3998} - \ln \left(1 + \frac{ \varepsilon_i }{1,3998} \right) \right]$ (13)

Fuente: Autor

Por otra parte, las ecuaciones que permiten encontrar el valor de una variable por medio del método de incertidumbre, así como la incertidumbre de este valor son las siguientes.

$$m^c = \frac{\sum \frac{m_i}{\sigma_i^2}}{\sum \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (14)$$

$$U_{m^c} = \sqrt{\frac{1}{\sum \frac{1}{\sigma_i^2}}} \quad (15)$$

Donde:

m^c Vector de las estimaciones (conciliados)

m_i Matriz identidad

σ_i Incertidumbre de las mediciones

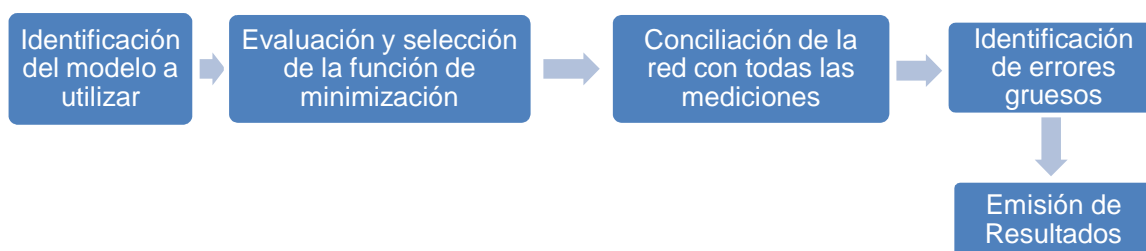
U_{m^c} Incertidumbre del valor conciliado

3. IMPLEMENTACIÓN DE LA CONCILIACIÓN DE DATOS

3.1 Estructura de la implementación de la conciliación de datos

La Figura 8 muestra la metodología diseñada y propuesta que se debería seguir para llevar a cabo la conciliación de datos y la detección de errores gruesos en procesos aplicables a redes de gas natural.

Figura 8. Metodología para la implementación de la conciliación de datos



Fuente: Autor

3.1.1 Identificación del modelo a utilizar

Como se mencionó anteriormente de los modelos encontrados en la literatura que fueron estudiados, se seleccionaron dos como los más indicados para realizar la conciliación de datos en las redes de gas natural. Entre estos dos se realizó una comparación y se determinaron las limitaciones y las ventajas de cada uno con el fin de encontrar el más indicado. La Tabla 2 muestra esta comparación:

Tabla 2. Comparación entre los métodos seleccionados

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

Fuente: Autor

Con base en esto se determinó que la metodología que se utilizará para la conciliación será una combinación de los dos modelos seleccionados; de forma que el modelo de incertidumbre proporcionará el valor de la incertidumbre que se utilizará como factor de ponderación en el modelo de minimización de funciones, el cual finalmente realizará la conciliación de las mediciones efectuando de esta forma el control de los balances.

3.1.2 Evaluación y selección de la función de minimización

Una vez se ha determinado el modelo que debe utilizarse para realizar la conciliación de datos, se hace necesario encontrar la función de minimización que tiene un mayor rendimiento para el proceso a conciliar y por tanto permitirá obtener los resultados más óptimos. Inicialmente se trabajó con las cinco funciones mostradas anteriormente, sin embargo las funciones Lorentzian y Normal Contaminada se descartaron ya que presentan problemas de convergencia, esto se debe a que dichas ecuaciones están diseñadas para procesos donde se presentan velocidades de crecimiento de sustancias y reacciones químicas y biológicas, por lo que no arrojan estimados correctos para el control de balances en redes de gas natural. Para determinar la función de minimización que tiene el mayor rendimiento, se deben calcular los factores de evaluación propuestos por Narasimhan y Jordache [5]: OP (Overall Power), AVTI (Average number Type I errors) y Selectividad, los cuales evalúan los criterios de capacidad de detección correcta de errores gruesos; dichos criterios se calculan para un número n (mayor a 1) de simulaciones, por medio de las siguientes ecuaciones:

$$OP = \frac{\text{Número de errores gruesos correctamente identificados}}{\text{Número de errores gruesos simulados}} \quad (16)$$

$$AVTI = \frac{\text{Número de errores gruesos erróneamente identificados}}{\text{Número de simulaciones realizadas}} \quad (17)$$

$$\text{Selectividad} = \frac{\text{Número de errores gruesos correctamente identificados}}{\text{Número de errores gruesos detectados}} \quad (18)$$

Por su parte, el promedio y la mediana de la reducción total de errores TER (ecuación 19) son usados para comparar el rendimiento de la conciliación de datos.

$$TER = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i^f)^2} - \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i^* - x_i^f)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i^f)^2}} \quad (19)$$

Donde:

y_i Valor con error aleatorio

x_i Valor conciliado

x_i^t Valor considerado como convencionalmente verdadero

Los pasos para la determinación de la mejor función de minimización son los siguientes:

1. Se determina el número de simulaciones que se desean realizar; cabe destacar que entre mayor sea la cantidad de casos simulados se obtendrán resultados más exactos para los factores anteriormente mencionados. Por lo tanto, se recomienda realizar un mínimo de 500 simulaciones. Ahora bien, si el número de simulaciones no permite identificar claramente la mejor función de minimización, se recomienda aumentar gradualmente la cantidad de simulaciones hasta que se observe claramente una función óptima.
2. Se adicionan errores gruesos de forma aleatoria a los valores convencionalmente verdaderos de las variables involucradas en el proceso, realizando una simulación con Montecarlo (ver Anexo D).
3. Se realiza la conciliación de datos con cada una de las funciones de minimización y para cada uno de los casos simulados.
4. Se detectan los errores gruesos, por medio del método X84 [8]. Dicho método establece que las variables para las cuales los errores después de la conciliación de datos son mayores que 3 desviaciones medias, se consideran con errores gruesos. La desviación media se define por medio de la siguiente ecuación:

$$D_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}| \quad (20)$$

Donde:

\bar{x} Promedio de los valores

N Número de datos

5. Se calcula el rendimiento de cada una de las funciones 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 conciliación de datos de las mediciones [9], se analizan los valores obtenidos para el promedio y la mediana del TER y se descartarán la o las funciones que tengan los valores más bajos, posteriormente se observarán los factores OP, AVTI y la Selectividad y con base a los resultados de estos se encontrará 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 conciliación de datos, lo cual será explicado a continuación.

3.1.3 Conciliación de la red con todas las mediciones

Una vez se ha determinado la función de minimización que se utilizará, es posible realizar el control de los balances mediante la conciliación de datos. Para desarrollar la minimización se utilizó la herramienta Solver de Excel, la cual por medio del algoritmo de cálculo *GRG Non linear*⁵ encuentra los valores ajustados cumpliendo con las restricciones (balances de masa) y minimizando los errores de acuerdo a la función seleccionada. Se escogió esta herramienta ya que el algoritmo que utiliza ha sido validado y se ha comprobado que arroja resultados aceptables [10]. Debido a que era necesario ingresar los datos en el Solver cada vez que se requería realizar una conciliación, y teniendo en cuenta que en la mayoría de ocasiones se necesita realizar el control de un gran número de balances, se desarrolló un macro en el programador de Visual Basic, que permite el desarrollo del Solver para realizar la minimización de forma automática.

3.1.4 Identificación de errores gruesos

En capítulos anteriores se mencionó que para que la conciliación de datos arroje resultados válidos era necesario eliminar los errores gruesos. Para esto, se debe identificar qué sistema de medición en la red de tuberías presenta fallas que generen estos errores sistemáticos, para realizar las respectivas operaciones de inspección y calibración a dichos equipos. Para la identificación de los errores gruesos se lleva a

⁵ 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.

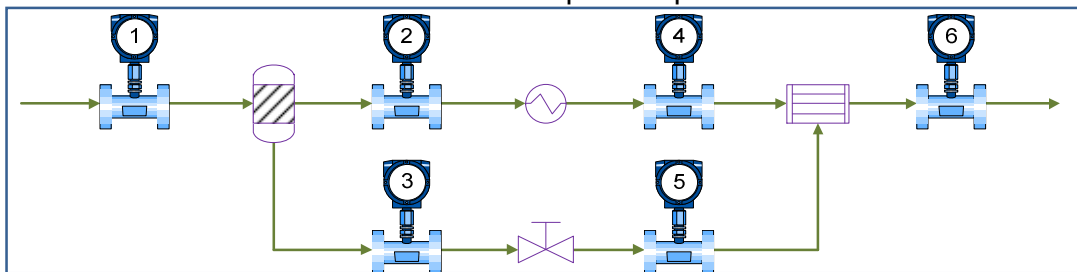
cabo la conciliación de datos con los valores indicados en las mediciones, posteriormente se elimina la primera medición y se realiza la conciliación de datos con los demás valores; los valores ajustados son comparados con los medidos, si la diferencia entre ambos es baja se puede determinar que dicha medición no tiene error grueso, por el contrario una diferencia alta indica la presencia de un error grueso en esa medición; este procedimiento debe realizarse eliminando cada una de las mediciones, para determinar los medidores que deben ser intervenidos.

4. APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE CONCILIACIÓN DE DATOS

4.1 Aplicación del modelo seleccionado de conciliación de datos a un proceso

Siguiendo la metodología planteada anteriormente se realizó la conciliación de datos a un proceso teórico de intercambio de calor (ver Figura 9). En cada una de las líneas en las que se muestran los medidores, se tiene una indicación del caudal volumétrico que pasa por ese punto, estas indicaciones junto con los valores verdaderos, los balances de masa y los desbalances se muestran en la Tabla 3.

Figura 9. Proceso de intercambio de calor al que se aplicó la conciliación de datos



Fuente: Adaptado de Data Reconciliation & Gross Error Detection [5]

Tabla 3. Caudales verdaderos y medidos para el proceso de intercambio de calor

Corriente	Caudales Verdaderos (m ³ /h)	Caudales Medidos (m ³ /h)	Balances	Desbalance
1	100	101,91	$F_1 - F_2 - F_3 = 0$ (21)	2,81
2	64	64,45		
3	36	34,65	$F_2 - F_4 = 0$ (22)	0,25
4	64	64,20	$F_3 - F_5 = 0$ (23)	-1,79
5	36	36,44	$F_4 + F_5 - F_6 = 0$ (24)	
6	100	98,88		0,64

Fuente: Adaptado de Data Reconciliation & Gross Error Detection [5]

Los caudales verdaderos se asumieron con el fin de realizar una comparación, una vez se realiza la conciliación de datos, sin embargo cabe destacar que en los procesos reales no se cuenta con dichos valores, por lo que se hace necesario ajustar las mediciones para encontrar un estimado del valor convencionalmente verdadero. El

factor de ponderación no se tuvo en cuenta ya que se consideró que todas las mediciones tienen la misma incertidumbre.

Cuando los valores medidos se ingresan a los balances de masa se encuentra que no se cumplen dichas restricciones, ya que ninguno de ellos da 0. En este punto se hace necesario encontrar un método que permita ajustar estas mediciones de forma que se cumplan las leyes de conservación; realizando la conciliación de datos es posible determinar dichos estimados. Con el fin de realizar una comparación entre las tres funciones de minimización, se realizó la conciliación de datos para estas mediciones con cada una de dichas funciones, los resultados obtenidos, así como los errores para cada uno de ellos se muestran en la Tabla 4:

Tabla 4. Valores conciliados del proceso de intercambio de calor

Corriente	VALORES CONCILIADOS			ERRORES		
	M.C	Cauchy	Fair	M.C	Cauchy	Fair
1	100,22	100,10	100,12	0,22	0,10	0,12
2	64,50	64,42	64,40	0,50	0,42	0,40
3	35,72	35,68	35,72	0,28	0,32	0,28
4	64,50	64,42	64,40	0,50	0,42	0,40
5	35,72	35,68	35,72	0,28	0,42	0,28
6	100,22	100,10	100,12	0,22	0,10	0,12
Σ Errores				2,00	1,68	1,60

Fuente: Autor

Fácilmente se puede comprobar que los valores obtenidos en las tres conciliaciones cumplen satisfactoriamente con los balances de masa establecidos en las ecuaciones 21 a 24. Sin embargo, también es posible observar que la función de minimización que presenta una mayor minimización de los errores es Fair. Por lo que se podría pensar que es la que tiene un mayor rendimiento y la que arroja los mejores ajustes. Sin embargo, para conocer con certeza la función de minimización con mayor rendimiento deben seguirse los pasos explicados en el numeral 3.1.2, para la selección de la mejor

función de minimización. Para esto, se determinó realizar un total de 1000 simulaciones con el fin de tener una mayor precisión para escoger la función más apropiada, posteriormente se realizó la adición de errores gruesos; para lo cual se utilizó una función de probabilidad normal con una media de 0 y una desviación estándar del 2,5% de la medición, que generó los valores aleatorios que se adicionaron a cada uno de los valores verdaderos y por último se efectuó la conciliación de datos para todas las simulaciones y con las tres funciones de minimización. Con esto fue posible determinar los factores OP, AVTI, TER y la Selectividad; los cuales se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Cálculo de factores de rendimiento del proceso de intercambio de calor

Factores de Rendimiento	M. Cuadrados	Cauchy	Fair
Nº Simulaciones	1000	1000	1000
Total E.G simulados	908	882	904
E.G detectados	874	710	729
E.G correctamente identificados	696	561	592
E.G incorrectamente identificados	178	149	137
OP	0,767	0,636	0,655
AVTI	0,178	0,149	0,137
Selectividad	0,796	0,790	0,812
Promedio TER	0,434	0,440	0,449
Mediana TER	0,428	0,441	0,448

Fuente: Autor

A partir de esto se encuentra que la función con el mayor rendimiento para el proceso, es la función de Fair, ya que presenta los valores más altos para el promedio y la mediana de la reducción total de errores (TER), así como el valor más bajo para el factor AVTI y el segundo más alto para el OP; por tanto es posible concluir que la minimización de los errores debe realizarse con dicha función objetivo, lo cual confirma la teoría planteada anteriormente cuando se realizó la conciliación con las tres funciones. Los resultados de la conciliación con esta función están en la Tabla 4.

Siguiendo con la estructura establecida en el capítulo anterior, se continuó con la identificación de los errores gruesos; para lo cual se realizó la conciliación eliminando la medición uno (1), seguidamente se efectuó la conciliación sin la medición dos (2) y así sucesivamente con las demás mediciones. La Tabla 6 muestra la sumatoria de los errores minimizados; para cada una de las conciliaciones realizadas.

Tabla 6. Sumatoria de errores para cada una de las conciliaciones realizadas

Caso de conciliación	Suma de Errores
Todos los medidores	1,012
Sin M1	0,378
Sin M2	1,011
Sin M3	0,714
Sin M4	0,997
Sin M5	0,837
Sin M6	0,619

Fuente: Autor

Debido a que todas las variables son redundantes, al realizar la conciliación eliminando alguna de las mediciones, dicha variable eliminada se convierte en observable y se puede determinar a partir de los conciliados de las demás mediciones.

La segunda columna de la Tabla 7, muestra los valores obtenidos para cada uno de los caudales volumétricos, cuando se realizó la conciliación sin su respectiva medición, así mismo en la tercera columna se muestra la diferencia entre dicho valor y la indicación del medidor en ese mismo punto.

Tabla 7. Diferencias entre el valor ajustado y medido para las conciliaciones

Medidor	Conciliado sin medidor	Diferencia
1	99,28	2,63
2	64,36	0,09
3	36,34	1,69
4	64,54	0,34
5	35,13	1,31
6	100,93	2,06

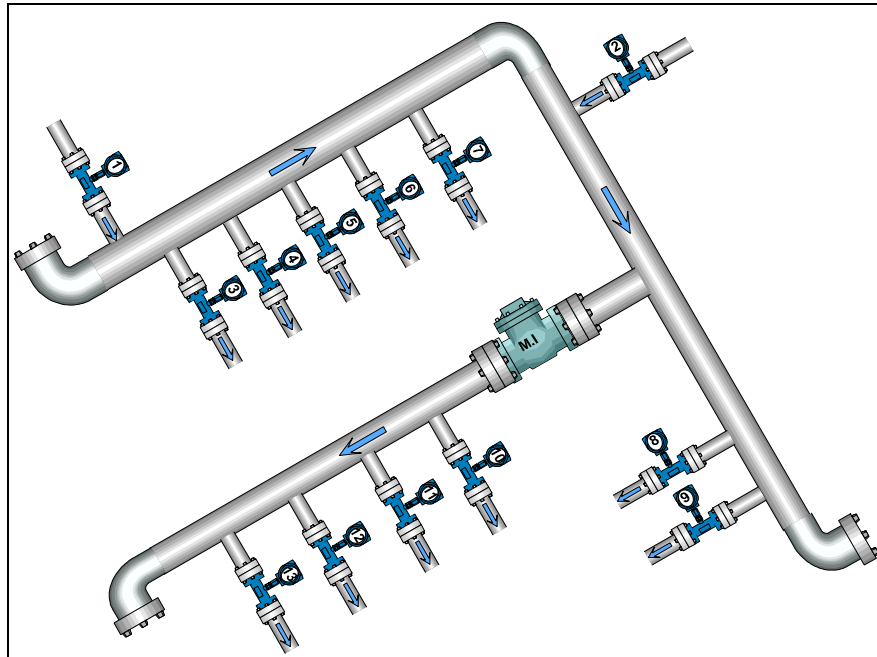
Fuente: Autor

Al realizar un análisis de los resultados mostrados en la tabla 5, se encuentra que al conciliar los datos sin las mediciones 1 y 6 se obtiene una mayor reducción de errores, por el contrario cuando estas mediciones se incluyen en la conciliación se observa que la sumatoria de errores es mayor; esto permite afirmar que los medidores 1 y 6 presentan fallas que generan errores gruesos. Lo anterior se confirma con los resultados mostrados en la tabla 6 donde se nota que las diferencias más altas se presentan para los medidores 1 y 6; por lo que puede concluirse que dichos medidores deben ser intervenidos, realizando los respectivos procedimientos de inspección, calibración y ajuste; ya que están generando errores gruesos que afectan los balances.

4.2 Aplicación de la conciliación de datos a una red de transporte de gas natural

Una vez se determinó el modelo a utilizar para la conciliación de datos, se aplicó la herramienta a las mediciones de una red real de transporte de gas natural. Esto se realizó como parte de un servicio ofrecido por la Corporación CDT de GAS a una reconocida transportadora de gas natural en el país; la red se muestra en la Figura 10, donde las flechas indican la dirección del flujo.

Figura 10. Red real de transporte de gas natural



Fuente: Corporación CDT de GAS

Como se observa en la figura, la red de transporte cuenta con 2 recibos y 8 entregas y una de estas entregas se divide en cuatro (4) flujos, por lo que se tiene un total de 11 entregas. La empresa transportadora 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 conciliación de datos y la detección de errores gruesos. El balance de masa global para esta red está dado por la siguiente ecuación:

$$F_1 + F_2 - F_3 - F_4 - F_5 - F_6 - F_7 - F_8 - F_9 - F_{10} - F_{11} - F_{12} - F_{13} + \Delta Inventario = 0 \quad (25)$$

Adicionalmente, es posible realizar un balance alrededor del medidor interior, este balance redundante, como se mencionó anteriormente permite realizar la detección de errores gruesos y el control de los balances. La ecuación que representa el balance se muestra a continuación:

$$M.I - F_{10} - F_{11} - F_{11} - F_{12} - F_{13} + \Delta Inventario = 0 \quad (26)$$

Combinando las anteriores ecuaciones se encuentra que:

$$F_1 + F_2 - F_3 - F_4 - F_5 - F_6 - F_7 - F_8 - F_9 - M.I + \Delta Inventario = 0 \quad (27)$$

La transportadora entregó a la Corporación CDT de GAS las mediciones diarias para un año de operación de la red, así como los respectivos desbalances, con el fin de que se realizaran los respectivos cálculos que les permitieran identificar los medidores que arrojan indicaciones con errores gruesos y que por tanto deben ser inspeccionados con el fin de conocer y corregir las causas que originan dichos errores, adicionalmente la empresa requería de una herramienta que le permitiera efectuar el control de los balances. La Tabla 8 muestra las mediciones, los valores para la diferencia de inventario, la suma de las dos (2) entregas y los once (11) recibos; así como el desbalance.

Tabla 8. Balances en la red de transporte de gas natural

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

Fuente: Corporación CDT de GAS

Para dar cumplimiento a los requerimientos de la empresa, se ofreció la metodología de conciliación de datos mostrada anteriormente. Para realizar el respectivo ajuste de las mediciones y la detección de los errores gruesos de forma que se controlen los balances en este proceso, se siguió la estructura planteada en el capítulo 3.

Identificación del modelo a utilizar: Ya que no se conocen los valores de incertidumbre, se trabajará únicamente con el modelo de minimización de funciones y asumiendo que la incertidumbre de todas las mediciones es la misma.

Evaluación y Selección de la función de minimización: Para la selección de la función de minimización se realizó el mismo procedimiento del anterior ejercicio, 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, los cuales se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Valores a los que se adicionaron los errores gruesos

Valores convencionalmente Verdaderos (m ³)												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
484	1592,86	29,38	58,27	325	154,68	51,64	686,27	85,96	23,71	198,26	472,16	19,88

Fuente: Corporación CDT de GAS

Para este procedimiento se realizaron 500 simulaciones y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Cálculo de factores de rendimiento para la red de gas natural

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

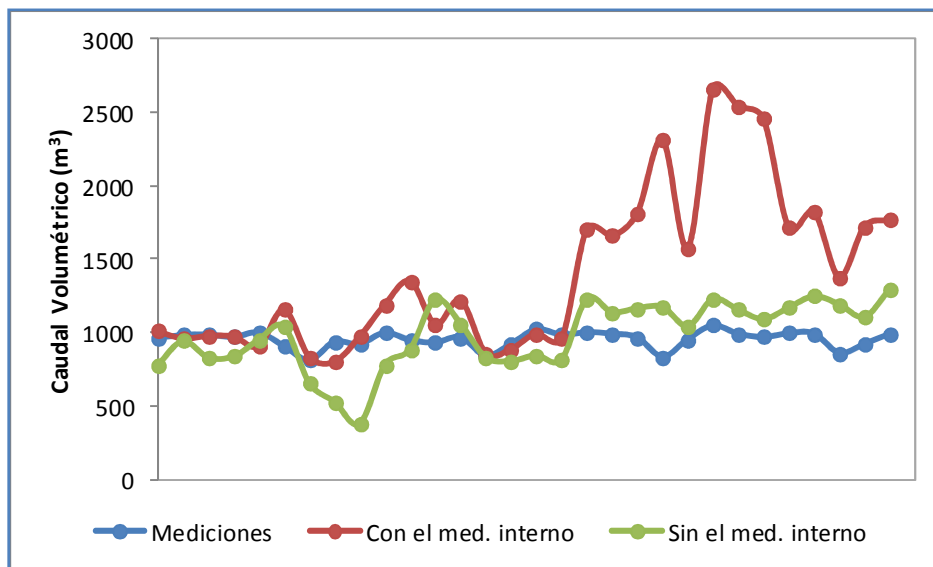
Fuente: Autor

A partir de la información anterior, puede concluirse que para esta red de transporte, la función de minimización con un mayor rendimiento es la de Cauchy, debido a que tiene el valor más alto del promedio y la mediana TER, así como el valor de OP más cercano

a 1, el más alto para la selectividad y el más bajo para el AVTI. Ahora bien, ya con la función de minimización seleccionada; se prosigue a realizar la conciliación con las 13 indicaciones arrojadas por los medidores en cada uno de los puntos donde se presenta la transferencia de custodia del gas.

Identificación de Errores Gruesos: Las indicaciones dadas por el medidor interno, permite que las demás mediciones se conviertan en redundantes, lo que facilita la detección de errores gruesos. Para esto se realizó la conciliación, utilizando la medición de dicho equipo y tomando como restricción el balance de la ecuación 20. Esto permitió determinar que el medidor interno presenta errores gruesos; ya que cuando se realiza la conciliación con este medidor (línea roja) se obtienen diferencias altas, entre los valores conciliados y los medidos, como se observa en la Figura 11, y por el contrario, cuando dicho medidor se retira de la conciliación (línea verde) los valores conciliados están más cerca de los valores medidos; por tanto es posible concluir que dicho medidor debe ser intervenido, ya que probablemente presenta fallas que estén generando errores gruesos.

Figura 11. Valores medidos y conciliados del medidor interno



Fuente: Autor

5. CONCLUSIONES

- Se realizó un estudio del 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 conciliación de datos.
- Luego de realizar una revisión de cada uno de estos métodos se determinó que una combinación de los métodos de minimización de funciones y de incertidumbre es la metodología más adecuada para realizar el ajuste de las mediciones y la detección de errores gruesos en las redes de gas natural.
- Se planteó una metodología que permite realizar la conciliación de datos por medio del Solver GRG No lineal manejado por Excel, ya que es una herramienta validada, que garantiza resultados confiables; para facilitar los cálculos, el Solver fue programado en un código de Visual Basic, lo que permite realizar de forma automática la conciliación de datos y la detección de errores gruesos.
- La metodología propuesta 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 y posteriormente calibrados y ajustados, con el fin de garantizar mediciones confiables que faciliten la realización de las distintas operaciones de facturación.
- Esta herramienta facilitará muchos de los procesos que se llevan a cabo en las empresas comercializadoras de gas natural; debido a sus facilidades de identificación de probables valores conciliados de las mediciones de forma que sea posible disminuir las pérdidas. Esto por tanto se convierte en un gran avance para la Corporación CDT de GAS, ya que podrá contar con las bases para el desarrollo de herramientas y el personal competente para ofrecer a la industria del gas natural un servicio que permita brindar elementos de control de los balances a sus clientes.

6. RECOMENDACIONES

- ☉ Se recomienda desarrollar la metodología propuesta para efectuar la conciliación de datos en el software Excel, realizando la minimización de las funciones con el Solver del mismo programa; ya que aunque existen otros algoritmos que realizan este procedimiento, el utilizado por Excel genera resultados confiables, ya que ha sido validado y además permite realizar una gran cantidad de cálculos de forma automática facilitando los procesos de conciliación en las redes de gas natural.

- ☉ Adicionalmente a la detección de errores gruesos, se recomienda a la Corporación CDT de GAS desarrollar a partir de la herramienta de conciliación de datos brindar soluciones en aplicaciones tales como:
 - ❖ Conciliación de datos de caudales volumétricos, que permita conocer el volumen transportado en un nodo de la red de transporte a partir de datos históricos.
 - ❖ Determinación de los puntos más adecuados en las redes de gas, para la ubicación de los sistemas de medición, de forma que se cuente con la mayor cantidad de variables redundantes y observables que permitan realizar con mayor confiabilidad la detección de errores gruesos.
 - ❖ Solución de disputas legales y entre clientes y proveedores cuando se tienen valores distintos de mediciones para una sola variable
 - ❖ Determinación de los intervalos de tiempo en los que se debe realizar el promedio de las mediciones del poder calorífico de una mezcla de gas natural por medio de la realización de estudios de homogeneidad.

- ☉ Se recomienda, que la metodología aquí propuesta para el control de los balances, sea aplicada en distintas redes de transporte y distribución de gas natural, de tal forma que se realice un análisis de los resultados obtenidos que permita evaluar su desempeño, en todos los procesos que se dan en las distintas redes de gas natural; esto permitirá inclusive evaluar si los lineamientos establecidos en las regulaciones legales vigentes acerca de los límites en los desbalances son razonables para cada una de las entidades involucradas en los procesos de transferencia de custodia.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] **BAGAJEWICZ, Miguel J y CABRERA, Enmanuel.** Data Reconciliation in Gas Pipeline Systems. 2003
- [2] **MANDEL, Denis; ABDOLLAHZADEH, Ali; MAQUIN, Didier; RAGOT, José.** Data Reconciliation by inequality balance equilibration: a LMI approach. 1997
- [3] **RAO, R. Ramesh y NARASIMHAN, Shankar.** Comparison of Techniques for Data Reconciliation of Multicomponent Process.
- [4] **MAQUIN, Didier; ADROT, Olivier; RAGOT, José.** Data Reconciliation with uncertain models. 2000
- [5] **NARASIMHAN, Shankar y JORDACHE, Cornelius.** Data Reconciliation & Gross Error Detection. An intelligent use of Process Data. Gulf Publishing Company. 2000
- [6] **OLIVEIRA, Elcio C. y AGUIAR, Paula F.** Data Reconciliation in the Natural Gas Industry: Analytical Applications. 2009.
- [7] **MAQUIN, Didier. Y RAGOT, José.** Comparison of Gross Errors Detection Methods in Process Data. 1991
- [8] **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).
- [9] **ÖZYURT, Derya B y PIKE, Ralph W.** Theory and practice of simultaneous data reconciliation and gross error detection for chemical processes. 2004
- [10] **DRUD, Arne.** Conopt: a GRG code for large sparse dynamic nonlinear optimization problems. 1983
- [11] **GUERRERO, Fernando y LLANO, Fernando.** Gas Natural en Colombia. 2003.
- [12] **GUO, Boyun y GHALAMBOR, Ali.** Natural Gas Engineering Handbook. Houston, TX. 2005.

8. ANEXOS

ANEXO A. METROLOGÍA

Medición:

Aún sin conocer la definición, los seres humanos estamos continuamente en contacto con las mediciones, cada vez que nos acercamos al supermercado o a la tienda a comprar nuestros alimentos medimos la masa que necesitamos de cada uno de ellos, cuando escuchamos las predicciones meteorológicas, conocemos las mediciones de temperatura que se han realizado en la ciudad, cuando deseamos comprar una tela para un vestido nuevo necesitamos realizar distintas mediciones para conocer las longitudes de esta y así como estas son muchas las situaciones de la vida cotidiana que requieren de las mediciones, es por esto que aunque no lo notemos, si no tuviéramos instrumentos de medición que nos permitieran conocer estas magnitudes, nuestra vida sería muy complicada.

Igualmente, en todos los procesos industriales que se desarrollen, las mediciones juegan un papel trascendental; ya que por medio de estas es posible conocer la cantidad de materias primas requeridas para obtener la cantidad de producto deseado, así como garantizar las condiciones adecuadas para que el proceso se lleve a cabo.

Siendo entonces tan importantes las mediciones se necesita de una ciencia que se encargue de su estudio y que esté buscando continuamente métodos que permitan mejorar la calidad de las mismas; dicha ciencia se conoce como Metrología y se encarga del estudio de las mediciones y sus distintas aplicaciones.

Según la Tercera Edición del Vocabulario Internacional de Metrología—VIM, una medición se define como un proceso en el que se obtiene experimentalmente uno o varios valores que pueden atribuirse razonablemente a una magnitud (propiedad que puede expresarse cuantitativamente mediante un número y una referencia). Dicha magnitud, que desea medirse, se denomina mensurando.

Calibración:

Debido al desgaste natural de los instrumentos, el envejecimiento de los mismos, los esfuerzos aplicados y los cambios de temperatura, los equipos se deterioran poco a poco lo que implica que arrojen mediciones con errores sistemáticos. Para garantizar que las mediciones realizadas con determinado instrumento son confiables es necesario que dicho instrumento sea calibrado en determinados intervalos de tiempo, estos periodos son proporcionados por un programa de aseguramiento metrológico.

La calibración consiste en la comparación entre los valores y las incertidumbres de una medición de referencia (considerada como el valor convencionalmente verdadero) y la indicación dada por el instrumento que desea calibrarse. El valor de referencia que permite realizar dicha comparación debe ser proporcionado por un instrumento con una mayor precisión, el cual se denomina instrumento patrón y que debe ser trazable a los patrones nacionales e internacionales. En la calibración de instrumentos es necesario controlar la trazabilidad, el error y la incertidumbre. Una vez se ha realizado esta comparación se establece una relación que permita garantizar los resultados obtenidos por el instrumento calibrado.

Patrón de Medida:

Un patrón se define como la realización de la definición de una magnitud dada, con un valor determinado y una incertidumbre de medida asociada, tomada como referencia.⁶ En otras palabras, un patrón es una medida materializada, instrumento, material de referencia o sistema de medición que permite definir o reproducir una unidad o varios valores de una magnitud los cuales pueden ser tomados como referencia.

Según la autoridad que reconozca el patrón de referencia, estos se clasifican en internacionales y nacionales; los primeros, como su nombre lo indica son aquellos que son reconocidos mediante un acuerdo internacional y que se utilizan mundialmente, por su parte los patrones nacionales son los reconocidos por una autoridad nacional y que se ponen al servicio de un estado.

⁶ Vocabulario Internacional de Metrología (VIM). 3ª edición 2008.

Por otra parte, los patrones también se clasifican según su jerarquía metrológica en patrones primarios (obtenidos por la realización de la definición de una unidad, su valor se acepta sin referenciarse a otro patrón), patrones secundarios (establecidos al realizar la calibración con un patrón primario) y patrones de trabajo (utilizados para calibrar o verificar instrumentos o sistemas de medida). Cabe destacar que a medida que la jerarquía del patrón disminuye, la incertidumbre de la medición aumenta.

Como se mencionó anteriormente un patrón de medición es utilizado principalmente con el fin de obtener valores de referencia que permitan compararse con las indicaciones de otros instrumentos que midan la misma magnitud del patrón. Esta cadena de comparaciones entre un patrón y un instrumento constituye la trazabilidad metrológica

Trazabilidad:

La trazabilidad es la propiedad de una medición o del valor de un patrón de estar relacionado con referencias establecidas por acuerdos nacionales o internacionales mediante una cadena ininterrumpida de comparaciones (calibraciones), cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre. Por lo tanto, para garantizar que la indicación dada por un instrumento es válida dicho instrumento debe ser calibrado con patrones trazables. Los patrones primarios constituyen el punto de partida de la cadena de trazabilidad, a partir de estos se calibran los patrones secundarios y así sucesivamente se realizan las diversas comparaciones hasta llegar a la calibración de los patrones de trabajo, garantizando de esta forma la trazabilidad de las mediciones; naturalmente cada una de estas comparaciones debe estar documentada para comprobar la validez de las mismas.

Incertidumbre de Medición

Todos los instrumentos desarrollados hasta el momento para la medición de las distintas magnitudes son inexactos y por tanto ninguna medida es perfecta; siempre habrá una incertidumbre sobre el valor obtenido, esta incertidumbre se define como un parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un

mensurando, a partir de la información que se utiliza⁷. Entre las fuentes que contribuyen a la incertidumbre se encuentran: variación en las condiciones ambientales, observación del metrologo, calibración del instrumento y las aproximaciones y suposiciones incorporadas en los modelos y procedimientos de medición. La incertidumbre siempre debe reportarse junto con el valor medido del mensurando y se considera como un estimativo del error de la medición; el cual se definirá a continuación.

Error de Medición

El error se define como la diferencia entre el valor indicado por el instrumento y el valor convencionalmente verdadero (Ver Figura 12), naturalmente el objetivo de cualquier medición es obtener una estimación lo más cercana posible al valor verdadero; sin embargo, independientemente del sistema de medición utilizado, cualquier valor medido tendrá errores. El error de una medición es la suma de dos tipos de errores: errores aleatorios y errores sistemáticos o gruesos.

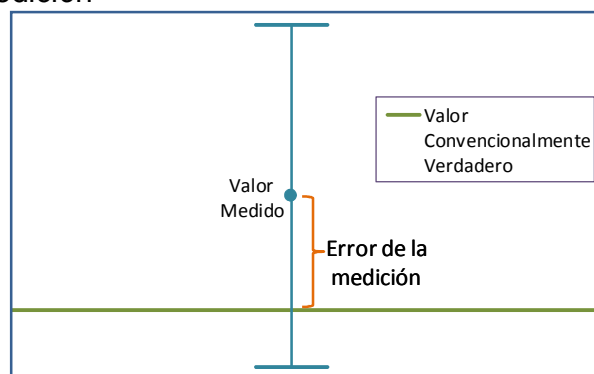
Los errores aleatorios, son aquellos que, al realizar mediciones repetidas de una misma variable con el mismo instrumento y a idénticas condiciones, cambian de manera impredecible, el valor de referencia de dicho error aleatorio es la media que se obtendría de un número infinito de mediciones repetidas del mismo mensurando; por lo tanto, la única forma de caracterizar dichos errores es mediante el uso de distribuciones de probabilidad. Los errores aleatorios no pueden eliminarse completamente y siempre están presentes en las mediciones. Este tipo de errores se originan por diversas causas, entre las cuales se encuentran: cambios en las condiciones ambientales, fallas en la observación por parte del metrologo, ruido, entre otros. Por su parte, los errores sistemáticos permanecen constantes en mediciones repetidas o varían de forma predecible; entre las fuentes más comunes que ocasionan estos errores están la descalibración, fallas en el instrumento, fugas, suciedad y corrosión en el sistema de medición. Los errores sistemáticos ocurren con menos frecuencia, pero sus magnitudes generalmente son mayores que la de los errores aleatorios. Adicionalmente, se tiene el

⁷ Vocabulario Internacional de Metrología (VIM) 3ª edición 2008.

término de errores gruesos, el cual no se encuentra definido en el VIM, pero es usado por la mayoría de los autores para designar errores sistemáticos grandes.

El error se denomina con la letra ε y puede representarse por medio de la siguiente ecuación: $\varepsilon = (y - x)$ Donde y es el valor medido y x es el valor convencionalmente verdadero. Estos errores, como se mencionó anteriormente afectan los cálculos de los balances de masa y energía ocasionando inconsistencias al momento de realizar las distintas operaciones de facturación.

Figura 12. Error de medición



Fuente: Autor

ANEXO B. EL GAS NATURAL

🌀 Origen y clasificación del Gas Natural [11][12]:

Las diversas investigaciones que se han realizado concuerdan en que desde hace millones de años microorganismos mezclados con partículas arcillosas y arenosas y restos de organismos animales y vegetales, construyeron una masa sólida (roca madre) en la cual, debido a la contribución de diversos factores entre los que se encuentran: la acción bacteriana, la presión, el calor, la destilación natural que se da en las profundidades, así como la adición de Hidrógeno en fuentes profundas, la presencia de catalizadores y en tiempo; empezaron a formarse el petróleo y el gas.

Las acumulaciones de gas en los yacimientos pueden ser clasificados como reservorio, campos y pozos. Un reservorio es una formación subterránea porosa y permeable que contiene un banco individual de hidrocarburos confinados por rocas impermeables o barreras de agua y es caracterizada por un único sistema de presión. Por su parte, un campo es un área que consiste de uno o más reservorios que están relacionados con la misma característica estructural y un pozo contiene uno o más reservorios en estructuras aisladas.

Debido a que el gas natural es petróleo en estado gaseoso siempre está acompañado con petróleo líquido; por tanto hay tres tipos de gas natural: gas no asociado, gas asociado y gas condensado. El gas no asociado está en los reservorios con una mínima cantidad de petróleo, el gas asociado es el gas disuelto en petróleo bajo condiciones naturales y el gas condensado se refiere al gas con alto contenido de hidrocarburos líquidos a presiones y temperaturas reducidas.

🌀 Composición del Gas Natural

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos simples, principalmente Metano (CH_4) con una pequeña cantidad de compuestos inorgánicos, la Tabla 11 muestra la composición promedio del gas natural. Dependiendo de la composición del gas, en

especial del contenido de compuestos inorgánicos, el poder calorífico del gas varía entre 700 y 1600 Btu/ft³.

Tabla 11. Composición del gas natural

COMPONENTE	COMPOSICIÓN
Metano (CH ₄)	90 %
Etano (C ₂ H ₆)	5 %
Propano (C ₃ H ₈)	1 %
Butano (C ₄ H ₁₀)	1 %
Carbón (C)	1 %
Inorgánicos	2 %

Fuente: Autor

Poder calorífico del gas natural

El poder calorífico superior se refiere a la energía total transferida como calor en una reacción de combustión ideal a una temperatura y presión base. Por tanto, para el caso del gas natural el poder calorífico es la cantidad de energía liberada por la combustión de 1 ft³ de gas. Generalmente, la cantidad de energía liberada se mide en BTU y considera el valor requerido para la evaporación del agua asociada a los productos de combustión.

El valor del poder calorífico depende de la composición química del gas natural; entre mayor sea la cantidad de hidrocarburos más pesados que el metano que lo constituya, mayor será su poder calorífico.

Debido a que la función del gas natural es proporcionar la energía requerida para la realización de procesos que la requieran, la compra del gas se realiza sobre una base de energía. Sin embargo el transporte se realiza en una base volumen, ya que las mediciones que se obtienen con los distintos instrumentos indican el valor del caudal volumétrico (volumen por unidad de tiempo). Es por esto que para poder conocer la cantidad de energía entregada, es necesario combinar la medición del caudal con la del poder calorífico.

ANEXO C. SISTEMA DE MEDICIÓN

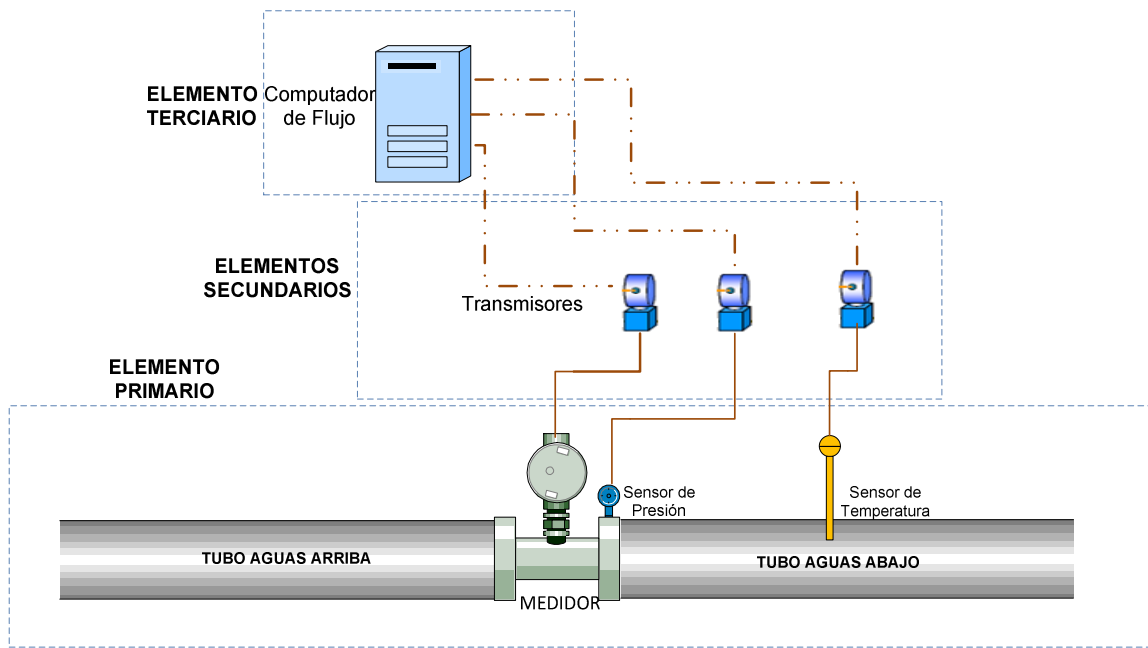
Para poder realizar la facturación del Gas Natural es necesario conocer la cantidad que se entrega al realizar el proceso de transferencia de custodia; por lo tanto es necesario medir la cantidad que es transportada por las tuberías, para esto se utilizan sistemas de medición. Un sistema de medición está compuesto por tres tipos de elementos principales (ver Figura 13):

- ☞ Elemento Primario: Constituido por el tubo aguas arriba y aguas abajo, por el cual fluye el gas y el medidor del caudal que indicará el volumen transportado. Es el elemento principal ya que se encuentra directamente relacionado con la magnitud a medir.

- ☞ Elementos Secundarios: Son aquellos instrumentos que se encargan de medir magnitudes tales como presión, temperatura y demás variables que, si bien no son las que se desean conocer, influyen en la medición del caudal volumétrico y son requeridos por el modelo matemático para realizar las correcciones necesarias al valor de caudal indicado por el elemento primario del sistema.

- ☞ Elemento Terciario: Consiste en un computador de flujo que se encarga de procesar las mediciones realizadas por los elementos primarios y secundarios y que llegan a dicho computador por medio de transmisores. El elemento terciario efectúa el algoritmo de cálculo con el fin de realizar las respectivas correcciones e indicar el caudal que fluye por la tubería.

Figura 13. Sistema de medición



Fuente: Autor

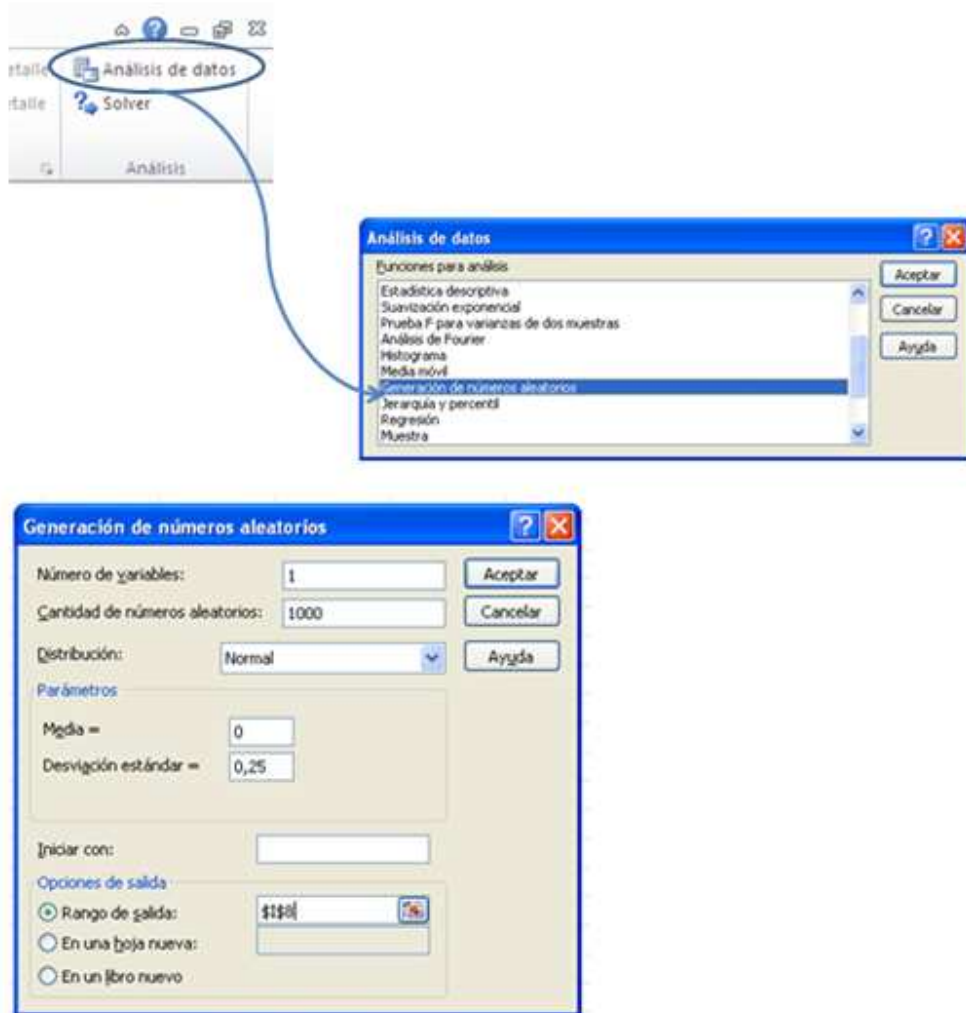
ANEXO D. SIMULACIÓN CON MONTE CARLO

La simulación con Monte Carlo es una técnica que combina conceptos estadísticos (muestreo aleatorio) con la capacidad que tienen los ordenadores para generar números pseudo-aleatorios y automatizar cálculos.

Los orígenes de esta técnica están ligados al trabajo desarrollado por Stan Ulam y John Von Neumann a finales de los 40 en el laboratorio de Los Álamos, cuando investigaban el movimiento aleatorio de los neutrones. En años posteriores, la simulación de Monte Carlo se ha venido aplicando a una infinidad de ámbitos como alternativa a los modelos matemáticos exactos o incluso como único medio de estimar soluciones para problemas complejos. Así, en la actualidad es posible encontrar modelos que hacen uso de simulación Monte Carlo en las áreas informática, empresarial, económica, industrial e incluso social. En otras palabras, la simulación con Monte Carlo está presente en todos aquellos ámbitos en los que el comportamiento aleatorio o probabilístico desempeña un papel fundamental; precisamente, el nombre de Monte Carlo proviene de la famosa ciudad de Mónaco, donde abundan los casinos de juego y donde el azar, la probabilidad y el comportamiento aleatorio conforman todo un estilo de vida. Son muchos los autores que han apostado por utilizar hojas de cálculo para realizar simulación Monte Carlo; la potencia de las hojas de cálculo reside en su universalidad, en su facilidad de uso y en su capacidad para recalcular valores.

En el presente proyecto se utilizó la simulación con Monte Carlo, en la selección de la función de minimización con el mayor rendimiento para la generación de los valores aleatorios que serían adicionados como errores gruesos a los valores convencionalmente verdaderos. Para esto se utilizó la herramienta Análisis de Datos-Generación de números aleatorios, en Excel (ver Figura 14) y se generaron los valores con una distribución normal de media 0 y desviación estándar igual a 2,5% del valor verdadero.

Figura 14. Simulación con Monte Carlo en Excel



Fuente: Autor