

APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE A LA OPTIMIZACIÓN DE BALANCES EN REDES DE FLUJO DE FLUIDOS

Juan Manuel Ortiz Afanador * (juanmanuel.ortiz@tgi.com.co)

John Fredy Velosa Chacón ** (john.velosa@tgi.com.co)

Transportadora de Gas Internacional – TGI S.A. ESP

Resumen:

Este artículo describe la metodología para mejoras en el balance de la red de transporte de gas natural de TGI (Transportadora de Gas Internacional). El abordaje se basa en la aplicación del análisis de incertidumbre a dos niveles. Un primer nivel “micro-escala”, definido por el presupuesto de incertidumbre de los sistemas de medición de flujo, y un segundo nivel “macro-escala”, relacionado con la incertidumbre asociada al resultado del balance para toda la red. De esta manera, se aplica un proceso cíclico para simular los efectos de las diferentes acciones de mejora, tanto sobre la incertidumbre original de los sistemas de medición como sobre la incertidumbre asociada al balance. El proceso finaliza cuando para una acción de mejora dada no se observa un cambio significativo en la incertidumbre asociada. Con la aplicación de esta metodología ha sido posible programar un plan de inversiones óptimas, orientado a obtener mejores balances en un corto plazo.

Este artículo fue presentado en el 7th International Symposium on Fluid Flow Measurement (ISFFM), realizado entre el 12 y el 14 de agosto en la ciudad de Anchorage (Alaska - USA). Este simposio es organizado por el North American Fluid Flow Measurement Council y en su desarrollo se presentan trabajos sobre una amplia variedad de tópicos de ciencia y tecnología asociados con la medición de flujo de fluidos.

*Especialista de Medición de TGI S.A. ESP. Ingeniero Mecánico. Especialista en Ingeniería del Gas Natural.

**Profesional de Medición de TGI S.A. ESP. Ingeniero Mecánico.

1. INTRODUCCIÓN

En la operación de redes de petróleo y gas es necesario ejecutar periódicamente cálculos de balance de masa y energía. Estos cálculos son usados para establecer la correspondencia entre el total de fluido ingresado a la red y el total de fluido entregado por la red. Los cálculos se ejecutan con base en las mediciones obtenidas a partir de los sistemas de medición de flujo, los cuales usualmente cuentan con una aprobación para su uso en procesos de transferencia de custodia.

Desde un punto de vista ideal, en un mundo libre de errores e incertidumbre, sin fugas: los balances deberían ser perfectos; la cantidad asociada a las entradas sería exactamente la misma para un período de tiempo definido. Sin embargo, e infortunadamente, en el mundo real los resultados del balance son diferentes de cero. Aún con el más estricto control, es claro que detrás de cualquier medición hay un trasfondo probabilístico y que se generarán errores aleatorios que oscilarán en torno a la referencia. Esto significa que a veces será posible observar estados de balance con pérdidas y a veces con ganancias, pero el efecto podría asociarse a la aleatoriedad del proceso.

Por otra parte, una de las componentes claves en la búsqueda de los balances “perfectos” es la complejidad de la red. Éste es un término difícil de definir ya que es una interrelación dada por múltiples componentes, como por ejemplo:

- La cantidad de los sistemas de medición y el tipo de tecnologías de medición
- La cantidad de flujos de entrada y de salida
- Las propiedades y la composición de los flujos de entrada
- La cantidad de mezclas de gas (formadas por la conjunción de

- dos o más corrientes)
- La longitud de la red y la definición del volumen de control
- Los cálculos de inventario de gas acumulado en las tuberías y las condiciones de balance (estacionario - transitorio)
- Un apropiado diseño y construcción de la red, incluyendo sus sistemas de medición e instrumentación
- La cantidad y la calidad de la información usada como materia prima para los cálculos de balance
- Los procedimientos para el mantenimiento y la operación de la red
- El período de tiempo fijado para el balance
- La gestión para el control de pérdidas, fugas y hurtos
- El conocimiento, las certificaciones, los entrenamientos y la cualificación del personal
- El control de los errores de medición y la disponibilidad de trazabilidad
- Los sistemas de información, software, comunicaciones y SCADA
- Los aspectos legales y contractuales

En la industria del petróleo y el gas es común ignorar la incertidumbre en las mediciones; algunas veces se margina, posiblemente porque hay una carencia de conocimiento acerca de la utilidad de la incertidumbre aplicada a propósitos prácticos. Generalmente, cuando el resultado de una medición se expresa, su incertidumbre no se reporta como información complementaria al mismo. Sin embargo, este parámetro es absolutamente necesario para evaluar la calidad de las mediciones. Por otra parte, es aún menos común expresar la incertidumbre asociada al resultado del balance; existe una confianza ciega que envuelve al resultado obtenido: la incertidumbre y la confiabilidad nunca se tienen en cuenta;

pareciera como si la incertidumbre no existiera para propósitos de los balances.

En el presente artículo se formula una propuesta de metodología para la optimización de balances en redes de flujo de fluidos. La metodología opera bajo un modelo cíclico, iniciando con la estimación de la incertidumbre en los sistemas de medición de flujo que operan en la red, como parámetro de referencia para la determinación de la calidad de la información usada en los cálculos del balance. Posteriormente, la incertidumbre de cada sistema es usada para caracterizar la incertidumbre del balance. De esta forma se establece una condición inicial de incertidumbre (línea base original), la cual es usada para planear acciones de mejora de carácter estratégico, centradas en los sistemas de medición más relevantes para el balance, así como en los componentes con las mayores incertidumbres y específicamente en su impacto esperado sobre la incertidumbre del balance.

La metodología está siendo aplicada actualmente en la Transportadora de Gas Internacional (TGI S.A. ESP), brindando resultados satisfactorios en los balances y eficiencia en las inversiones, orientándose a alcanzar sus metas como una compañía de clase mundial.

Aunque el desarrollo presentado fue proyectado sobre una red de gas natural, los autores consideran que la metodología es aplicable a otras redes de fluidos, como por ejemplo en el sector del petróleo y la petroquímica, el agua, los alimentos, etc.

2. DESCRIPCIÓN DE LA RED

Las principales fuentes de abastecimiento de gas para TGI están localizadas en la zona centro-

oriental (Cusiana) y en la costa norte de Colombia (Guajira), las actividades de la compañía se orientan al suministro de gas al interior del país, entregando gas en las principales ciudades (incluyendo Bogotá), así como a la mayor refinera colombiana, algunas plantas de generación eléctrica y varias industrias. En el año 2008 TGI transportó aproximadamente el 49% del consumo total de gas en Colombia¹, un país con una producción total de gas de aproximadamente 21,5 millones de metros cúbicos por día (760 MMSCFD).

En la Tabla 1 se presenta un breve resumen de las características de la red de TGI. Esta información es útil para fijar un punto de referencia acerca de la red, considerada como el objeto de estudio para la aplicación de la metodología de optimización de balances.

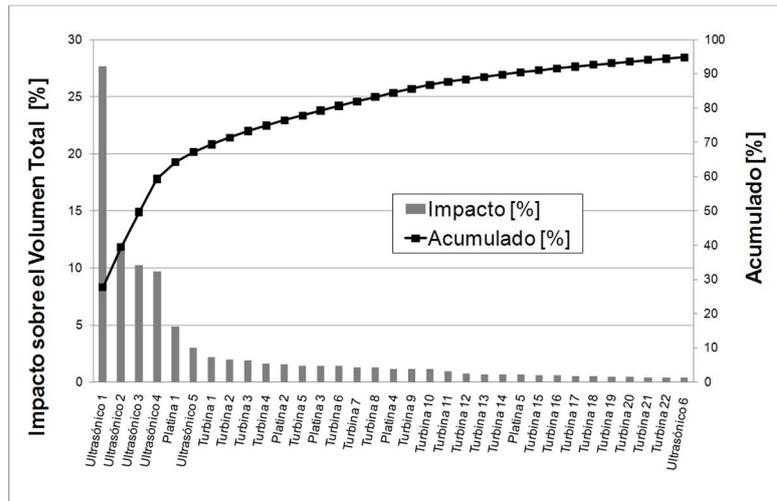


Figura 1. Análisis de Pareto (Condiciones normales de operación)

La red de transporte de gas descrita en la Tabla anterior fue analizada estadísticamente. El objetivo principal era obtener una descripción cuantitativa del impacto de cada sistema de medición de flujo sobre el volumen total transportado, tanto al nivel de las entradas de gas como de las salidas.

Para desarrollar lo anterior, se recolectaron los datos asociados a las entradas y las salidas de gas, tal y como se registraron en los sistemas de medición de flujo, para un período anual. Con esta información, se generaron dos estadísticas, la primera se asocia a las condiciones comunes de operación y la segunda a las condiciones operacionales extremas, por ejemplo como consecuencia de una alta demanda de gas, generalmente asociada al despacho de las plantas de generación eléctrica, o a incrementos en los consumos de gas por parte de clientes industriales.

Como resultado, los sistemas de medición fueron clasificados, generándose categorías en función de su impacto sobre el volumen total transportado en la red. También se desarrolló un análisis de Pareto (Figura 1); el principal objetivo de este trabajo fue definir las proporciones entre los sistemas de medición de alto impacto y aquellos de impacto medio y bajo. Desde un punto de vista práctico, se definió una cobertura equivalente al 95% del volumen total transportado como un punto de referencia para establecer la división.

¹La segunda compañía transportó el 31%.
Fuente: Superintendencia de Servicios Públicos

Aspecto	Valor
Volumen diario transportado (promedio)	10,5 x 106 m ³ /día (372 MMSCFD)
Volumen máximo transportado	12,5 x 106 m ³ /día (441 MMSCFD)
Capacidad adicional bajo construcción	7,1 x 106 m ³ /día (250 MMSCFD)
Longitud de tuberías principales (Diámetros entre 300 mm (12") y 550 mm (22"))	2749 km (1708 mi)
Longitud de tuberías auxiliares (Diámetros menores a 300 mm (12"))	953 km (592 mi)
Total de puntos de entrada de gas	9
Total de puntos de salida de gas	239
Total de puntos de mezcla (unión de dos o más corrientes diferentes)	5
Estaciones de compresión	6
Estaciones de compresión en construcción	6
Potencia total de compresión instalada	34,3 MW (46035 hp)
Potencia adicional bajo construcción (Fase 1)	57 MW (76445 hp)
Potencia adicional bajo construcción (Fase 2)	19,9 MW (26750 hp)

Tabla 1. Características de la red de TGI

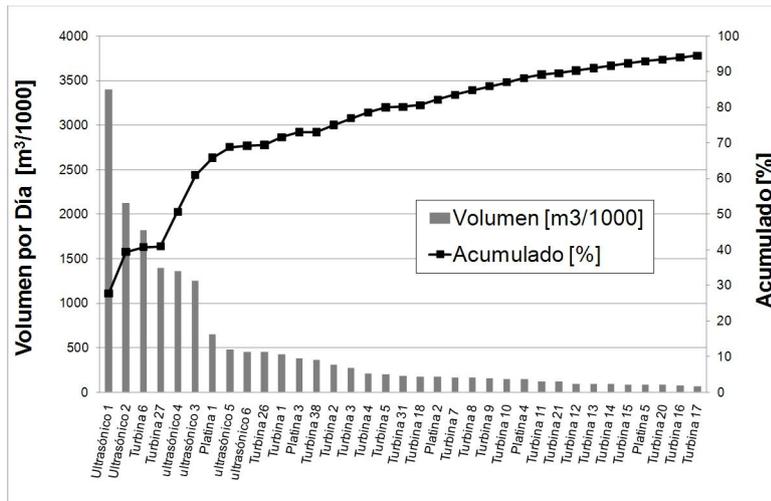


Figura 2. Análisis de impacto (Condiciones de operación extremas)

Para el caso específico de las condiciones operacionales extremas, se desarrolló un análisis adicional, considerando el efecto de aquellos sistemas con una baja frecuencia de operación pero con una alta demanda de gas natural. En la Figura 2 puede observarse el reordenamiento de los sistemas de medición (eje "x") con respecto al Pareto ilustrado en la Figura 1. Así mismo, en las Figuras 1 y 2, puede observarse el tipo de tecnología de medición instalada.

La conclusión de este trabajo previo, fue la identificación de un reducido número de sistemas (33 en el estudio de Pareto -condiciones normales de operación- y 35 en el análisis de impacto -condiciones operacionales extremas-), los cuales registran la mayor proporción de gas transportado (95%). Esta situación ofrece un importante punto de partida para el establecimiento de prioridades y la proyección de planes de acciones de mejora.

3. NIVEL MICRO-ESCALA (Incertidumbre de los sistemas de medición)

Después de la consolidación de la descripción de la red, el siguiente paso fue llevar a cabo inspecciones sobre los sistemas de medición de

flujo de alto impacto, considerando los siguientes dos principios:

- Debe evaluarse el cumplimiento de estándares técnicos, así como los aspectos técnicos incluidos en los contratos y en la regulación.
- Debe evaluarse la incertidumbre de medición asociada a cada sistema de medición, usando la metodología de la GUM [1] y obteniéndose un presupuesto de incertidumbre detallado para cada sistema.

Considerando el bajo número de sistemas de entrada, se tomó la decisión de inspeccionar todos los 9 sistemas (100%). Con respecto a los

sistemas de salida, se tomó la decisión de inspeccionar los 35 sistemas que representan el 95% de cobertura, obtenidos a través de los dos análisis estadísticos mencionados.

TGI suscribió un convenio con la Corporación CDT de GAS (institución colombiana de I+D, especializada en metrología de flujo y tecnologías del gas natural) para las inspecciones de los sistemas de medición. El CDT de GAS ejecutó las inspecciones a través de su Organismo de Inspección, el cual está acreditado bajo los lineamientos de la norma ISO/IEC 17020. El convenio tenía el enfoque e incluía las actividades necesarias para lograr coherencia con los dos principios mencionados anteriormente.

Esta etapa se denomina micro-escala porque su objetivo principal se centraba en el análisis de los sistemas de medición como unidades particulares, sin considerar su relación con el balance de gas.

Para llevar a cabo las estimaciones de incertidumbre, la Corporación CDT de GAS diseñó una herramienta sistematizada, basada en MS-Excel [2]. Esta aplicación (denominada STO-FLOW) permitió obtener estimaciones de incertidumbre de acuerdo con la metodología de la

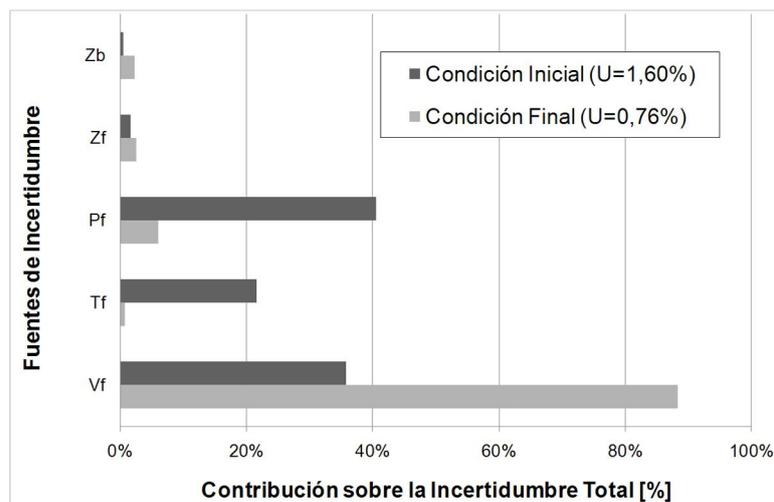


Figura 3. Presupuesto de incertidumbre para un sistema de medición

GUM, usando una base de conocimiento normalizada y predefinida, suministrando un medio efectivo y ágil para el procesamiento de la información recolectada durante las inspecciones. Un presupuesto de incertidumbre típico para un sistema de medición se presenta en la Figura 3, sobre la misma gráfica se puede observar la condición inicial (en el momento de la inspección) y la condición final (después de las mejoras).

Los informes de inspección contenían una completa descripción del estado de los sistemas de medición de flujo a un altísimo detalle, incluyendo el desempeño metrológico de cada elemento (primarios, secundarios, terciarios) y los siguientes aspectos:

- Características metrológicas de los elementos de medición
- Trazabilidad que soporta las mediciones
- Procedimientos de operación y mantenimiento
- Aspectos de instalación
- Estabilidad en la mediciones

Una vez adquirido el conocimiento relativo a los errores y problemas de medición, era posible establecer un plan preliminar de mejoras. Cada sistema se analizaba bajo un procedimiento paso a paso. La incertidumbre inicial era el punto de partida. Después, se simulaba el efecto de cada acción de mejora individual mediante el software STOFLOW de la Corporación CDT de GAS, iniciando con el componente de mayor incertidumbre dentro del presupuesto. Tanto los efectos sobre el sistema de medición, como las inversiones requeridas se evaluaron a cada paso, con el propósito de desarrollar una relación costo-beneficio. Este análisis se muestra en la Figura 4 (para el mismo sistema mostrado en la Figura 3).

Vale la pena aclarar que aquellos

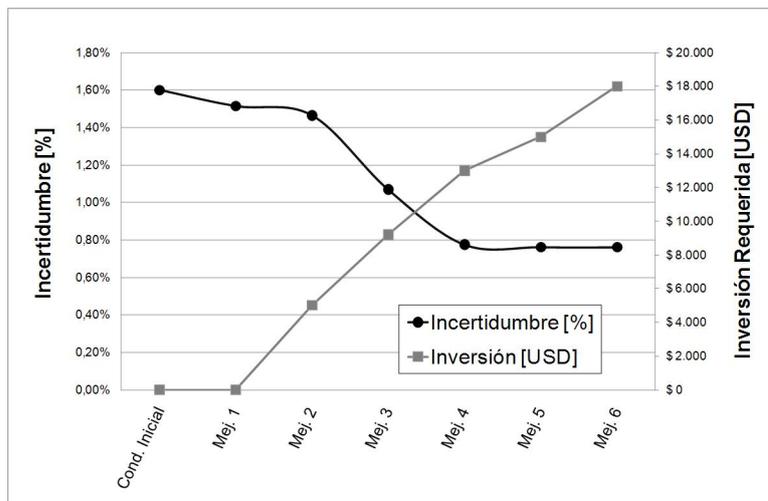


Figura 4. Análisis costo-beneficio para un sistema de medición

sistemas de medición que no fueron inspeccionados de manera directa, fueron analizados y clasificados por medio de atributos comunes. Del estudio se determinó que lo más apropiado era crear categorías de acuerdo con su participación o impacto dentro del balance. Las incertidumbres típicas de medición que se asignaron a estos sistemas se encontraban entre 2% y 5%, de acuerdo con el conocimiento que se tenía de los mismos (tecnología, obsolescencia, detalles de su operación, estabilidad en las calibraciones, etc.). Esta estrategia era necesaria para poder completar la información que posteriormente se requeriría para la siguiente etapa

de la metodología, relacionada con la estimación de incertidumbre para el balance de la red. Los resultados de la clasificación por categorías se presentan en la Tabla 2.

4. NIVEL MACRO-ESCALA (Incertidumbre del balance)

En su último libro “El andar del borracho. Cómo el Azar gobierna nuestras vidas” [3], el físico Leonard Mlodinow escribió:

“Ésta es una de las contradicciones de la vida: aunque las medidas siempre lleven incertidumbre, la incertidumbre en la medida

Categoría	Impacto sobre el balance (Imp)	Cantidad de sistemas de medición de flujo
1	Imp ≥ 5%	4
2	0,5% ≤ Imp < 5%	24
3	0,05% ≤ Imp < 0,5%	28
4	Imp ≤ 0,05%	183

Tabla 2. Clasificación de sistemas de medición de flujo de acuerdo con su impacto sobre el balance

raramente se discute cuando se citan las medidas.”

Esta cita es la realidad, no solo en nuestras vidas, como lo afirma Mlodinow, sino en la industria. Para la metodología descrita en este artículo, si la incertidumbre no se estima y expresa para una sola de las mediciones, no sería posible estimar la incertidumbre asociada al cálculo del balance.

La regulación colombiana aplicable a transporte de gas natural [4], establece que si el desbalance excede el valor de 1% (positivo exclusivamente), las pérdidas por encima del 1% deben ser asumidas por la empresa de transporte, pero si el desbalance está por debajo de 1% (pero únicamente hasta 0%), las pérdidas deben ser asumidas por los remitentes, a través de una distribución proporcional de las mismas.

De esta manera, podría afirmarse que la regulación anteriormente descrita posee dos problemas:

- El control de errores de medición, exigido por la misma regulación, establece un error máximo permisible de $\pm 1\%$ para cada instrumento de medición asociado al sistema de transferencia de custodia. De otra parte, la misma regulación establece que el error combinado (sin citar la metodología para su cálculo) debe ser a su vez inferior a $\pm 1\%$. Como se puede observar, no se tiene en cuenta el impacto de cada magnitud o su grado de contribución dentro de la incertidumbre combinada de todo el sistema, en contraste con lo establecido en OIML R140 [5]. Así mismo, se pretende controlar el balance en 1% con mediciones de $\pm 1\%$.
- El control de los desbalances se realiza sobre un intervalo de 0 a 1%, no se considera la

posibilidad de obtener valores negativos en los balances, no se declara (como es común) mediante un intervalo simétrico en torno a cero, con lo cual se ignora la naturaleza aleatoria de las mediciones sobre las cuales se calcula el balance.

“Ésta es una de las contradicciones de la vida: aunque las medidas siempre lleven incertidumbre, la incertidumbre en la medida raramente se discute cuando se citan las medidas.”

No hay discusiones acerca del impacto positivo que tienen los balances con resultados cercanos a cero sobre los clientes y sobre el transportador. La satisfacción de los clientes se incrementa en la medida en que éstos paguen menos pérdidas; por otra parte, un transportador con un control efectivo de sus balances obtiene excelentes indicadores de sus operaciones y evita riesgos económicos.

Una de las preguntas más reiterativas en las industrias que operan redes de flujo de fluidos y que desarrollan cálculos de balance, al momento de trazar planes de acción para su control es: ¿Cuánto mejorará el balance después de las acciones y/o inversiones propuestas? Inevitablemente, la respuesta a esta pregunta se esconde en la incertidumbre de las mediciones, y precisamente la incertidumbre es una de las mayores debilidades en la industria.

De acuerdo con lo planteado, el interés de expandir el concepto de incertidumbre a partir de sistemas individuales hacia la red de

gasoductos era una prerrogativa del presente estudio. Era necesario lograr alcanzar un panorama global e integral de la red. Para tal efecto, las incertidumbres asociadas a los sistemas individuales se cargaron dentro de un modelo matemático para el balance, al cual se le aplicó a su vez la metodología dada en la GUM para obtener la incertidumbre asociada al resultado del balance.

Inicialmente, los resultados obtenidos fueron preocupantes. El intervalo de incertidumbre para el balance era de $\pm 1,17\%$, es decir, por encima del límite del 1%. En este punto, se decidió llevar a cabo una simulación de Monte Carlo [6], [7] para confirmar los resultados obtenidos mediante la GUM, así como para llevar a cabo un análisis más ágil de la influencia de aspectos tales como el efecto de las diferencias en el inventario de las tuberías (efecto de acumulación). Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, encontrándose una buena concordancia entre los dos métodos.

La incertidumbre obtenida representó la incertidumbre típica asociada a los resultados del balance. Se le asignó el término “línea base de incertidumbre”, una línea de partida usada como referencia para la evaluación de la conveniencia de las mejoras, como se verá a continuación.

5. PLANEACIÓN DE MEJORAS

El conocimiento es clave para tomar decisiones acertadas. El grado de incertidumbre de medición identificado presentaba la necesidad de ejecutar acciones correctivas sobre los sistemas de medición con el propósito de incrementar la confiabilidad en los resultados de medición. Era claro que todas las acciones de mejora que se desarrollaran sobre los sistemas de medición de flujo tendrían un impacto positivo



Figura 5. Diagrama de flujo correspondiente a la metodología

podrían someterse, incluidos sus costos. Se definió un proceso de evaluación de tipo cíclico, como se presenta en la Figura 5.

En el momento en que se aprecia un comportamiento asintótico en la evolución de la incertidumbre del balance, partiendo de la línea base definida, el proceso finaliza. En el modelo creado, aquellas inversiones sin un reflejo inmediato y significativo sobre la incertidumbre del balance representaban inversiones riesgosas.

Si las inversiones continúan más allá de la convergencia, los efectos solamente podrían verse luego de muchas mejoras consecutivas. Esto podría interpretarse como si al converger se agotaran las acciones con efectos inmediatos sobre la incertidumbre del balance y las acciones que quedaron pendientes fueran refinamientos adicionales que no le aportarían mucho al control del balance, aún cuando las mismas mejoren la incertidumbre del sistema de medición en particular.

En la Figura 6 se muestra el comportamiento obtenido para la evolución en la incertidumbre del balance, considerando las mejoras e inversiones, aplicadas de manera progresiva sobre los sistemas de medición. Las mejoras y las inversiones parten del equilibrio obtenido del análisis costo-beneficio realizado para cada sistema de medición en particular.

En la misma figura, puede observarse el establecimiento de una asíntota en un valor de incertidumbre asociada al balance de 0,7%, habiendo partido del valor de incertidumbre de la línea base de 1,17%. Vale la pena aclarar que cada mejora de la gráfica representa un sistema de medición optimizado al nivel dado por el equilibrio costo-beneficio individual. Así mismo, puede observarse que el equilibrio natural costo-beneficio se logra con la implementación de las mejoras en el 6° sistema, a partir del cual se alcanza la asíntota de incertidumbre. En términos prácticos, este punto se estableció como parámetro de control de la aplicación de la metodología expuesta.

sobre los resultados del balance, sin embargo, había una duda relacionada con el punto de inflexión, es decir, con la determinación del momento en el cual las inversiones podrían continuar pero no tendrían un impacto visible sobre la incertidumbre del balance.

La duda fue resuelta mediante la ejecución de múltiples simulaciones, aprovechando los modelos creados para la incertidumbre del balance de la red, así como los datos obtenidos en las inspecciones de los sistemas de medición de alto impacto, sus incertidumbres particulares y las potenciales mejoras a las que

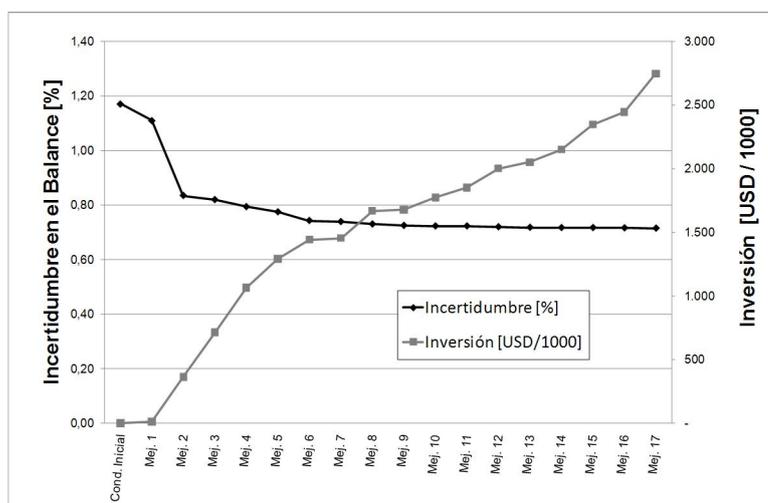


Figura 6. Análisis costo-beneficio para el balance

6. PLANES FUTUROS

Actualmente TGI está evaluando la posibilidad de implementar técnicas de reconciliación de datos y detección de errores para la ejecución de sus balances. En dicho proyecto TGI espera aprovechar la redundancia en las mediciones de flujo que posee en sus estaciones de compresión, con el propósito de tener una mejor resolución en sus balances.

7. CONCLUSIONES

- La metodología presentada es de gran utilidad para propósitos de planeamiento. Con su aplicación fue posible identificar y trazar un camino seguro y confiable para ejecutar optimizaciones metrológicas que redunden en una mejora de los balances. Las mejoras proyectadas a partir de la línea base de incertidumbre se proyectaron hasta alcanzar un comportamiento asintótico, de forma paralela se consideró el equilibrio costo-beneficio derivado de las inversiones necesarias para disminuir la incertidumbre. Los dos aspectos permitieron trazar el plan óptimo de acciones-inversiones, así como la definición de una incertidumbre objetivo para el balance.

- La optimización de balances en redes de fluidos es un trabajo complejo que involucra varias disciplinas, su integración dentro de un plan coherente es una tarea difícil. En el presente trabajo, se llevó a cabo una integración por medio de la aplicación sistemática de: inspecciones, estimaciones de incertidumbre para sistemas individuales y la proyección de sus efectos sobre el balance de la red mediante la aplicación del análisis de incertidumbre a los balances.

"La optimización de balances en redes de fluidos es un trabajo complejo que involucra varias disciplinas, su integración dentro de un plan coherente es una tarea difícil. En el presente trabajo, se llevó a cabo una integración por medio de la aplicación sistemática de: inspecciones, estimaciones de incertidumbre para sistemas individuales y la proyección de sus efectos sobre el balance de la red mediante la aplicación del análisis de incertidumbre a los balances."

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a todos sus compañeros de la Gerencia de Infraestructura por su valioso apoyo en la implementación del Plan de Aseguramiento Metrológico de TGI.

Referencias

- [1] JCGM 100:2008 "GUM 1995 with minor corrections - Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement" First edition September 2008.
- [2] Luis E. García S., Jose A. Fuentes O., John F. Velosa C. "A Statistical Tool to Support the Optimisation of Measurement Systems" Corporación CDT de GAS. 26th International North Sea Flow

Measurement Workshop, St. Andrews, Scotland, 2008.

- [3] Leonard Mlodinow. "The Drunkard's Walk", Random House Inc. 2008.

- [4] Resolución CREG No. 071 de 1999 "Reglamento Único de Transporte de Gas Natural - RUT". Comisión de Regulación de Energía y Gas. Colombia. 1999.

- [5] OIML R 140 "Measuring systems for gaseous fuel", International Organization of Legal Metrology. 2007.

- [6] JCGM 101:2008 "Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" - Propagation of distributions using a Monte Carlo method" First edition 2008.

- [7] Martin Basil, Andrew W. Jamieson "Uncertainty of Complex Systems by Monte Carlo Simulation", FLOW Ltd - Shell UK Exploration and Production - 16th North Sea Flow Measurement Workshop, Gleneagles, Scotland, 1998.

- [8] Nico Keyaerts, Leonardo Meeus, William D'haeseleer "Natural Gas Balancing: Appropriate Framework and Terminology", University of Leuven (K.U.Leuven), Energy Institute. 2008.

- [9] L.M. Petherick, F.U. Pietsch "Effects of Errors in Linepack Calculations on Real-Time Computational Pipeline Monitoring". Interprovincial Pipe Line Inc. Edmonton, Alberta. Canada, 1994.

- [10] V.V. Veverka, F. Madron "Material and Energy Balancing in the Process Industries - From Microscopic Balances to Large Plants". Computer Aided Chemical Engineering, Volume 7. Elsevier Science, First Edition. 1997.

- [11] Shankar Narasimhan, Cornelius Jordache "Data Reconciliation and Gross Error Detection: An Intelligent Use of Process Data", Gulf Professional Publishing. 1999.