

**ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DE LA LINEARIZACIÓN DE LOS
METER FACTOR PARA LOS MEDIDORES DE FLUJO TIPO CORIOLIS DE
LOS BRAZOS 1 Y 2 DEL CARGADERO DE CARROTANQUES DE CPF1
CAMPO RUBIALES.**

AUTOR:

FABIÁN EDUARDO MOTTA HURTADO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA**

2014

**ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DE LA LINEARIZACIÓN DE LOS
METER FACTOR PARA LOS MEDIDORES DE FLUJO TIPO CORIOLIS DE
LOS BRAZOS 1 Y 2 DEL CARGADERO DE CARROTANQUES DE CPF1
CAMPO RUBIALES.**

FABIÁN EDUARDO MOTTA HURTADO

**MONOGRAFÍA PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
ESPECIALISTA EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS**

**DIRECTOR:
EDUARDO MOTTA RUEDA
INGENIERO DE PETRÓLEOS – MBA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS
BUCARAMANGA**

2014

TABLA DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	13
1. MARCO TEORICO	14
1.1 SISTEMAS DE MEDICIÓN DINÁMICA CON MEDIDORES TIPO CORIOLIS.	14
1.1.1 Principio de Operación.....	15
1.1.2 Diagrama de Instalación	16
1.1.3 Ventajas	16
1.1.4 Desventajas	17
1.1.5 Condiciones de Operación y Mantenimiento.....	17
1.2 LIQUIDACIÓN VOLUMÉTRICA EN MEDICIÓN DINÁMICA.....	18
1.3 SISTEMAS DE PROBADORES TIPO COMPACTO	23
1.3.1 Definiciones:	23
1.3.2 Selección de un probador de volumen pequeño o compacto:	25
1.3.3 Consideraciones a cumplir en el sitio de operación:	25
1.3.4 Partes críticas:	26
1.4 PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DEL METER FACTOR.	27
1.4.1 Determinación del Factor de Corrección por efecto de la temperatura en el Producto (CTLM y CTLP), donde: (M) es Medidor y (P) es Probador.	28
1.4.2 Determinación del Factor de Corrección por efecto de la Presión en el Producto (CPLM Y CPLP)	29
1.4.3 Determinación del Factor de Corrección por efecto de la Presión sobre el Material (CPSp) del probador.....	31
1.4.4 Determinación del Factor de Corrección por efecto de la Temperatura sobre el Material (CTSp) Probador	31
1.4.5 Calculo del Factor de Corrección por efecto de la Temperatura sobre el Material (CTSp) para Probadores Compacto.....	32

1.4.6 Determinación del Factor de Corrección Combinado para el Probador (CCFp)	32
1.4.7 Determinación del Factor de Corrección Combinado para el Medidor (CCFM)	33
1.4.8 Cálculo del Volumen del Medidor (VM).....	33
1.4.9 Cálculo del Volumen Corregido del Medidor y el Probador.....	33
1.4.10 Cálculo del Factor del Medidor (MF)	34
2. METODOLOGIA DE LINEARIZACIÓN DE METER FACTORS	35
2.1 CRITERIOS DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	35
2.2 CORRIDAS DE CALIBRACIÓN	35
2.2.1 Procedimiento de calibración	35
2.2.2 Criterios de aceptación del Meter Factor	42
2.4.1 Validación de diferencia de temperatura entre el probador y medidor	44
2.4.2 Validación Menor Desviación estándar	45
3. ANÁLISIS TÉCNICO DE LA LINEARIZACIÓN DE LOS METER FACTOR PARA LOS MEDIDORES DE FLUJO TIPO CORIOLIS DE LOS BRAZOS 1 Y 2 DEL CARGADERO DE CARROTANQUES DE CPF1 CAMPO RUBIALES.....	51
3.1 LINEARIZACIÓN DE LOS METER FACTOR DE LOS MEDIDORES DEL BRAZO 1 Y 2 DEL CARGADERO DE CARROTANQUES DEL CP1 – CAMPO RUBIALES.	56
3.1.1 Incertidumbre Brazo 1.....	56
3.1.2 Análisis Estadístico Brazo 1.....	58
3.1.3 Comparación de incertidumbres de Meter Factor linearizados vs Incertidumbre de Meter Factor Promedio de las 25 corridas.	65
3.1.4 Incertidumbre Brazo 2.....	66
3.1.5 Análisis Estadístico Brazo 2.....	67
3.1.6 Comparación de incertidumbres de Meter Factor linearizados vs Incertidumbre de Meter Factor Promedio de las 25 corridas.	74

3.1.7 Implementación Meter Factors En El Dan Load 6000.....	74
3.1.8 Hallazgos Finales A Corregir	77
4. ANÁLISIS FINANCIERO DE LA LINEARIZACIÓN DE LOS METERFACTOR PARA LOS MEDIDORES DE FLUJO TIPO CORIOLIS DE LOS BRAZOS 1 Y 2 DEL CARGADERO DE CARROTANQUES DE CPF1 CAMPO RUBIALES.	78
4.1 ESTIMACIÓN BENEFICIOS ECONÓMICOS	78
4.2 ESTIMACIÓN COSTOS ANUALES DE OPERACIÓN	81
4.3 FLUJOS DE CAJA ANUALES DEL PROYECTO	81
4.4 ESTIMACIÓN DE LA INVERSIÓN	81
4.5 EVALUACIÓN FINANCIERA.....	82
5. CONCLUSIONES	83
BIBLIOGRAFIA.....	84

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-1: Esquemático típico de instalación de Medidores Tipo Coriolis, tomado del API MPMS CAP 5.6.	16
Ilustración 1-2Arquitectura de Liquidación Volumétrica, tomado del API MPMS Cap. 21.2.....	19
Ilustración 1-3 Liquidación Volumétrica Mediante Medición Dinámica.....	20
Ilustración 1-4 Partes críticas Probador Compacto.....	27
Ilustración 1-5 Arquitectura de Calibración con Probador Compacto, tomado del API MPMS Cap. 4.2.	34
Ilustración 3-2 Arquitectura de conexión de señales.....	37
Ilustración 3-3 Menú Computador de Flujo FlowBoss S600	39
Ilustración 3-4 Menú Computador de Flujo FlowBoss S600	39
Ilustración 3-5 Menú Computador de Flujo FlowBoss S600	40
Ilustración 3-6 Menú Computador de Flujo FlowBoss S600	41
Ilustración 3-7 Reporte de Calibración Daniel S600.	42
Ilustración 4-1 Carta de Control MF Linearizados Brazo 1.	64
Ilustración 4-2 Carta de Control MF promedio 25 corridas Brazo 1.	65
Ilustración 4-3 Carta de Control MF Linearizados Brazo 2.	73
Ilustración 4-4 Carta de Control MF promedio de las 25 corridas Brazo 2....	73

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Niveles de discriminación factores de corrección, tomada del API MPMS Cap. 12.2.2.....	22
Tabla 2 Niveles de discriminación volumétricos, tomada del API MPMS Cap.12.2.2.....	22
Tabla 3 Tabulación Reportes de Calibración.....	44
Tabla 4 Distribución t, tomada del API MPMS Cap. 13.2.....	46
Tabla 5 Consolidado MF Linearizados.....	50
Tabla 6 Comparación Incertidumbres Linearización vs Incertidumbre MF Promedio.....	50
Tabla 7 Resumen de resultados Corridas de Calibración Brazo 1.....	52
Tabla 8 Resultados Corridas de Calibración Brazo 1.....	53
Tabla 9 Resumen de resultados Corridas de Calibración Brazo 2.....	54
Tabla 10 Resultados Corridas de Calibración Brazo 2.....	55
Tabla 11 Resultados 25 Corridas de Calibración Brazo 1 con Desviación Estándar más baja.	56
Tabla 12 Rango de Flujo 1 Brazo 1.	58
Tabla 13 Rango de Flujo 2 Brazo 1.	59
Tabla 14 Rango de Flujo 3 Brazo 1.	61
Tabla 15 Rango de Flujo 4 Brazo 1.	62
Tabla 16 MF Linearizados Brazo 1.....	63
Tabla 17 Resumen Final MF Linearizados Brazo 1.....	63
Tabla 18 Resumen Meter Factor Promedio Brazo 1.	64
Tabla 19 Comparación Incertidumbres Linearizados Brazo 1.....	65
Tabla 20 Resultados 25 Corridas de Calibración Brazo 2 con Desviación Estándar más baja.	66
Tabla 21 Rango de flujo 1 Brazo 2.....	68
Tabla 22 Rango de flujo 2 Brazo 2.....	69
Tabla 23 Rango de flujo 3 Brazo 2.....	70
Tabla 24 Rango de flujo 4 Brazo 2.....	71
Tabla 25 Resumen Final MF Linearizados Brazo 2.....	72
Tabla 26 Resumen Meter Factor Promedio Brazo 2.	73
Tabla 27 Comparación Incertidumbres Linearizados Brazo 2.....	74
Tabla 28 Funciones de Configuración Dan Load 6000.....	75
Tabla 29 Parámetros de configuración de Dan Load 6000.....	75
Tabla 30 Parámetros de configuración de Dan Load 6000 para Brazo 1.....	76

Tabla 31 Parámetros de configuración de Dan Load 6000 para Brazo 2.....	76
Tabla 32 Datos de Entrada Evaluación Financiera.....	78
Tabla 33 Cuantificación de Beneficios Económicos - Brazo1.	80
Tabla 34 Cuantificación de Beneficios Económicos - Brazo2.	80
Tabla 35 Cuantificación de Beneficios Económicos - Cargadero Carrotanques.	80
Tabla 36 Estimación de costos Anuales de Operación - Cargadero Carro tanques.	81
Tabla 37 Flujos de Caja Anuales del Proyecto.....	81
Tabla 38 Estimación de la Inversión.....	81
Tabla 39 Evaluación financiera del Proyecto.	82

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO DE LA LINEARIZACIÓN DE LOS METER FACTOR PARA LOS MEDIDORES DE FLUJO TIPO CORIOLIS DE LOS BRAZOS 1 Y 2 DEL CARGADERO DE CARROTANQUES DE CPF1 CAMPO RUBIALES.¹

AUTOR: FABIAN EDUARDO MOTTA HURTADO²

PALABRAS CLAVES: Medición de hidrocarburos, medición dinámica, linearización, metodología, selección, evaluación económica.

DESCRIPCIÓN.

La medición de hidrocarburos para fiscalización y transferencia de custodia representa uno de los procesos más importantes y de mayor impacto económico en la industria de los hidrocarburos, pues en todos los casos corresponde a las cajas registradoras de la industria. De tal manera cualquier acción y/o inversión asociada a la optimización de los sistemas de medición enfocada a la reducción de su incertidumbre puede llegar a ser un excelente negocio.

En este trabajo se presenta un análisis matemático y estadístico para demostrar que la técnica de linearización de los Factores de Medición “Meter Factor”, de los medidores de flujo de los brazos 1 y 2 del cargadero de carro tanques de la estación CPF1 del campo Rubiales, reduce considerablemente su incertidumbre asociada representando así beneficios económicos.

Adicionalmente se presenta un análisis financiero con base en los criterios de VPN y TIR, que consiste en primer lugar la estimación de los beneficios económicos asociados a la implementación de la metodología, estimación de costos de operación con las tarifas vigentes a lo largo de la industria petrolera nacional, y la presentación detallada de las inversiones requeridas para una adecuada implementación de la metodología de linearización de los meter factor de los 14 medidores de flujo tipo Coriolis del cargadero de carro tanques de CPF1 de Campo Rubiales.

¹ Trabajo de Grado

² Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos, Director EDUARDO MOTTA RUEDA, Ingeniero de Petróleos.

ABSTRACT

TITLE: TECHNICAL-ECONOMIC ANALYSIS OF THE METER FACTOR LINEARIZATION FOR THE ARMS 1 AND 2 CORIOLIS FLOW METERS OF CPF1 – RUBIALES FIELD TANK CARS LOADING FACILITY.³

AUTHOR: FABIAN EDUARDO MOTTA HURTADO⁴

KEY WORDS: Hydrocarbons measurement, dynamic measurement, linearization, Methodology, Economic evaluation.

The hydrocarbons measurement for control and custody transfer represents one of the most important and with greater economic impact processes on the hydrocarbon industry, as in all cases corresponds to the cash registers in the industry. Any such action or investment in optimization of the measurement systems focused on reducing their uncertainty may become excellent business.

In this paper a mathematical and statistical analysis is presented to demonstrate that the technique of Meter Factor linearization for the Coriolis flowmeters of the loading arms 1 and 2 of CPF1- Rubiales Field considerably reduces uncertainty and representing economic benefits

Additionally, a financial analysis is presented based on the criteria of NPV and IRR, which is first to estimate the economic benefits associated with the implementation of the methodology, second to estimate the operating costs with current rates throughout the national oil and gas industry, and lastly a detailed presentation of the investments required for a proper implementation of the linearization methodology of the meter factor for the 14 Coriolis flowmeters of the tank cars loading facility CPF1 Rubiales Field.

³ Bachelor Tesis.

⁴ Faculty of Physical Engineering - Chemical . School of Petroleum Engineering , Director EDUARDO MOTTA RUEDA, Petroleum Engineer .

INTRODUCCIÓN

La medición de hidrocarburos para fiscalización y transferencia de custodia representa uno de los procesos más importantes y de mayor impacto económico en la industria de los hidrocarburos.

La liquidación volumétrica de los sistemas de medición dinámica, que encontramos en el capítulo 12 del estándar API MPMS, la cual contempla un procedimientos normativos dentro de los cuales se encuentra los factores de los medidores (MF), el cual, es obtenido como resultado de la calibración de los medidores de flujo contra un probado volumétrico de acuerdo con el capítulo 4 del estándar API MPMS, es un parámetro fundamental que impacta de manera directa el volumen medido, y de esta manera es determinante para reducir la incertidumbre asociada a los sistemas de medición dinámica.

A través de los años de experiencia, expertos en el tema han identificado que el MF de los medidores de flujo son obtenidos mediante un control estadístico siguiendo las recomendaciones del estándar API MPMS capítulo 13, el cual, no es un parámetro constante, sino al contrario, varía en gran manera dependiendo del flujo al cual están siendo sometidos los medidores. De esta manera, la linearización de los MF es una técnica valiosa que ayuda mitigar el impacto que estos cambios de condiciones de flujo tienen en la liquidación volumétrica de los sistemas de medición dinámica.

La motivación principal de este trabajo corresponde a demostrar técnico económicamente que la linearización de los MF en sistemas de medición dinámica sometidos a condiciones de flujo variables del cargadero de carrotanques del CPF1, puede ser una técnica efectiva para reducir las pérdidas en un sistema de medición de hidrocarburos para transferencia de custodia y así generar beneficios económicos significativos para compañías operadoras del sector de hidrocarburos.

1. MARCO TEORICO

1.1 Sistemas de medición dinámica con medidores tipo Coriolis. 5

Las fuerzas de Coriolis ocurren en sistemas que rotan. Supongamos que un ser humano se encuentra de pie en el centro de un disco que gira, si se mueve radialmente hacia el borde del disco, experimenta una fuerza lateral que intenta desviarlo de la ruta más corta, esta es la fuerza de Coriolis; desde el punto de vista de la medición, se usa cuando el medio que va a medirse fluye a través de un tubo que vibra, la fuerza de Coriolis deforma el tubo, en adición a la vibración causada por la oscilación, la deformación es proporcional al flujo másico.

En este tipo de medidores el fluido pasa a través de un tubo en forma de “U” (existen también otras formas, dependiendo del fabricante). Este tubo vibra a su frecuencia natural, excitado por un campo magnético; la vibración es similar a la de un diapasón, con una amplitud de menos que 1 mm, Los medidores Coriolis (API MPMS 5.6) miden la rata de flujo másico y la densidad. El flujo que pasa por unos tubos especialmente diseñados genera una fuerza, igual pero de sentido opuesto en cada mitad, haciéndolos vibrar, y cuya magnitud es proporcional a la rata de flujo másico. Esta fuerza y las vibraciones son detectadas por unos sensores y convertidas a rata de flujo másico mediante un transmisor.

Si hacemos circular un fluido por su interior, durante la mitad del ciclo de vibración del tubo (es decir, cuando se mueve hacia arriba) el fluido entrante empuja el tubo hacia abajo resistiéndose a la vibración, en cambio que el fluido saliente lo hace hacia arriba. Esta combinación de fuerzas causa que el tubo experimente una torsión. Durante la segunda mitad del ciclo, cuando el tubo se mueve hacia abajo, la torsión resultante tendrá la dirección opuesta. Por consiguiente, tenemos que en cada codo del tubo se produce una oscilación de igual frecuencia (la frecuencia natural) pero desplazadas en fase. Este desplazamiento de fase es directamente proporcional a la razón de flujo másico del fluido que circula por el interior. Si se colocan sensores electromagnéticos (“pickups”) en cada codo, éstos generan una señal sinusoidal cuya diferencia de fase (ΔT) es medida por la unidad electrónica del transmisor para transformarla finalmente en una señal 4-20 mA.

⁵ Manual de medición de hidrocarburos Ecopetrol S.A, Capítulo 5 Medición Dinámica, Versión 1 del 15/01/2008

1.1.1 Principio de Operación

Este tipo de medidor mide la masa directamente, pero para medir volumen la configuración toma la masa medida y la divide por la densidad cuantificada por el equipo, se recomienda instalar un transmisor de temperatura por separado para compensar y hacer los ajustes cuando se realiza conversión a volumen, pues no es recomendable usar la RTD del Coriolis puesto que su instalación ha sido diseñada para hacer la compensación por temperatura para el material de los tubos.

Durante la instalación del sensor los tubos deben permanecer llenos de fluido en una sola fase y no deben transmitirse vibraciones externas a estos; teniendo en cuenta que la interferencia electromagnética (EMI) no debe exceder la capacidad del blindaje del sensor

El cálculo de la fuerza de Coriolis se hace mediante la siguiente ecuación:

$$F_c = 2 * m * \omega$$

Donde:

F_c : Fuerza Coriolis

m : Flujo Másico

ω : Velocidad angular del tubo

La combinación de las fuerzas opuestas en ambas secciones del tubo causa una torsión del mismo, produciéndose en cada sección una oscilación de igual frecuencia pero desplazada en fase. Esta diferencia de fase es directamente proporcional a la rata de flujo.

$$m = k * Dt$$

Donde:

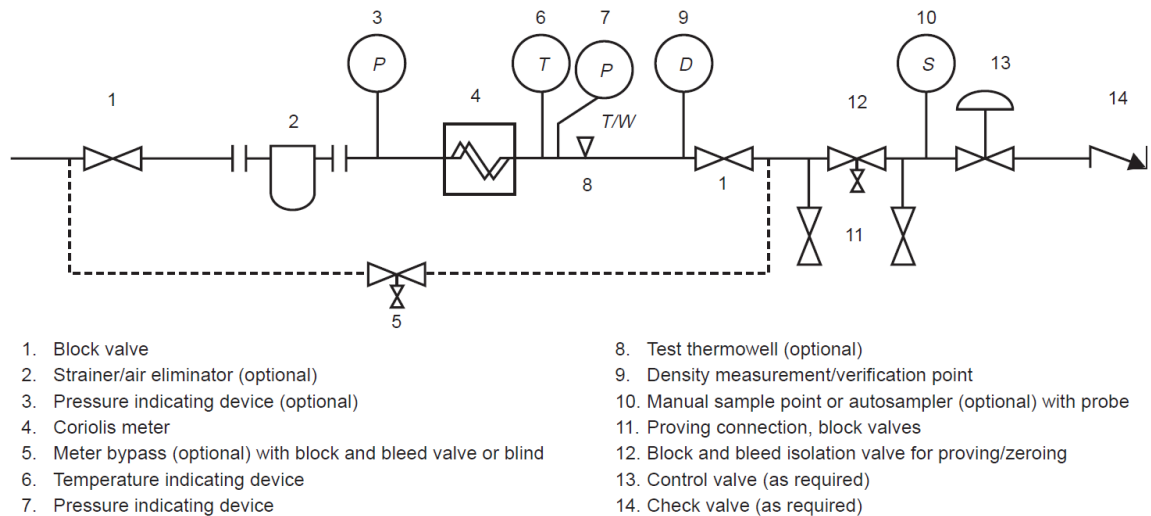
Dt : Ángulo de fase

k : Constante

1.1.2 Diagrama de Instalación

El brazo de medición según el API MPMS Capítulo 5 Sección 6 MEASUREMENT OF LIQUID HYDROCARBONS BY CORIOLIS METERS, es el siguiente:

Ilustración 1-1: Esquemático típico de instalación de Medidores Tipo Coriolis, tomado del API MPMS CAP 5.6.



1.1.3 Ventajas

- Su exactitud es de + 0.10% en medición de flujo.
- Repetibilidad de + 0.005%.
- Rangeabilidad de 20:1 hasta 80:1
- Sin partes móviles propensas a desgaste.
- De bajo mantenimiento.
- Son de fácil instalación.
- No requiere acondicionamiento de la tubería.
- El sensor es no intrusivo.
- Bajos niveles de mantenimiento porque son mínimamente afectados por sustancias corrosivas y abrasivas.
- No es susceptible al daño por desprendimiento de gases.
- Capacidad para medir a ratas de flujo cercanas a cero.

- Mínimamente afectado por cambios en la viscosidad.
- Mediciones directas de masa y densidad (Proporcionando medición de volumen indirecta).
- Normalmente no se requiere acondicionamiento de flujo.

1.1.4 Desventajas

- Cambios significativos en la densidad afectan la exactitud.
- Variaciones en la rata de flujo afecta la medición de densidad.
- Cambios en temperatura del fluido afectan la elasticidad de los tubos.
- Cambios en la presión afecta las características de vibración de los tubos.
- Corrientes en múltiples fases (liquido/gas/sólidos) afectan la medición.
- Ocurre la cavitación, por baja contrapresión aguas abajo.
- Se forman depósitos dentro del sensor de flujo en algunas ocasiones.
- Se genera corrosión y erosión del tubo sensor de flujo en algunas ocasiones.
- Sensibilidad a las condiciones de instalación, incluidos choques y vibraciones.
- Acumulación de depósitos internos que pueden afectar la precisión.
- No se utilizan, normalmente, tamaños más grandes a seis (6) pulgadas para las aplicaciones de transferencia de custodia.
- Algunas veces se dificulta la calibración, debido al lapso de tiempo de las salidas de los pulsos.
- Requieren periódico reajuste a bajas presiones, y bajos flujos.
- Necesita control de presión de sustentación.
- Generan altas caídas de presión.

1.1.5 Condiciones de Operación y Mantenimiento

Algunas recomendaciones para el mantenimiento del sistema son:

- Inspección visual del montaje mecánico cada año.
- Inspección visual de los sellos de conexión y del conduit cada año.
- Verificación del cero flujo durante la puesta en marcha y cada seis meses.
- Verificación de salidas análogas y pulsos cada año.
- Verificación de lecturas de densidad cada año.

Otros factores a tener en cuenta son:

- Con el medidor másico Coriolis se logran exactitudes de $\pm 0.10\%$ en medición de flujo, con repetibilidad de $\pm 0.005\%$. La exactitud sobre la medida de densidad es de $\pm 0.0005 \text{ g/cc}$.
- Rangeabilidad de 20:1 a 80:1; dependiendo del modelo.
- El sensor es no intrusivo y no tiene partes móviles propensas al desgaste, expuestas al proceso, lo que genera bajo mantenimiento.
- Fácil instalación, pues no se requieren condiciones especiales de flujo o acondicionamiento de la tubería.

Dentro de los aspectos críticos en la instalación de un Medidor Másico Coriolis están:

- Vibración en el montaje del sistema de medición (externa o de múltiples
- Medidores).
- Flujo pulsante, si es cercano a la frecuencia de vibración del sensor.
- Tensión mecánica (axial, radial, torsional) presente en la instalación.
- Perfiles de velocidad no uniforme y remolinos en el flujo.
- Interferencias por frecuencias de radio o electromagnéticas.
- Verificación periódica de valor de cero almacenado.

En gases se deben de tener en cuenta la siguiente recomendación:

- Para gases la medición de flujo másico requiere altas presiones, la exactitud de la medición, para presiones de alrededor de 200 Bares (2900 psig), es de $\pm 1\%$.

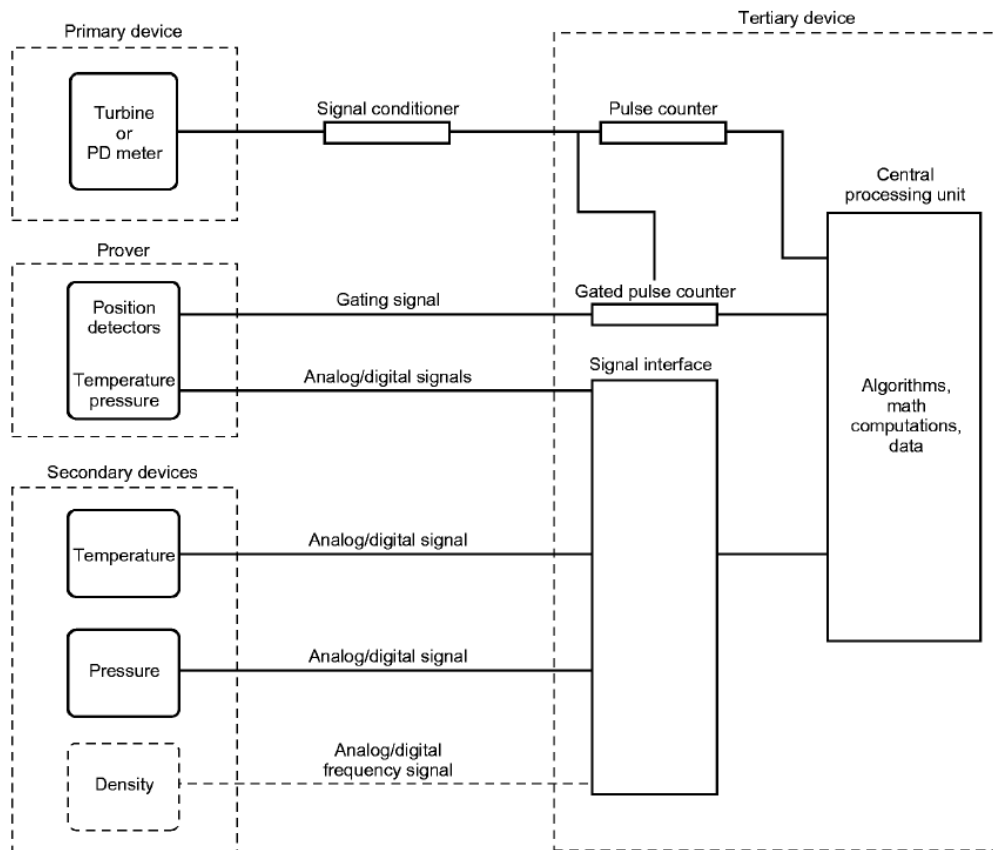
1.2 Liquidación volumétrica en medición dinámica.⁶

Una vez teniendo los dispositivos de medición primario (Medidor de Flujo) y secundarios (Medidores de temperatura, presión y densidad), para efectos de liquidación volumétrica es de suma importancia un elemento que convierta las señales de pulsos y 4-20mA en información volumétrica real, el cual es el fin último de un sistema de medición dinámica, este dispositivo se le llama computador de flujo. A continuación se mostrará una arquitectura

⁶ API MPMS CAP 12.2 CALCULATION OF PETROLEUM QUANTITIES, Tercera Edición, Junio de 2003.

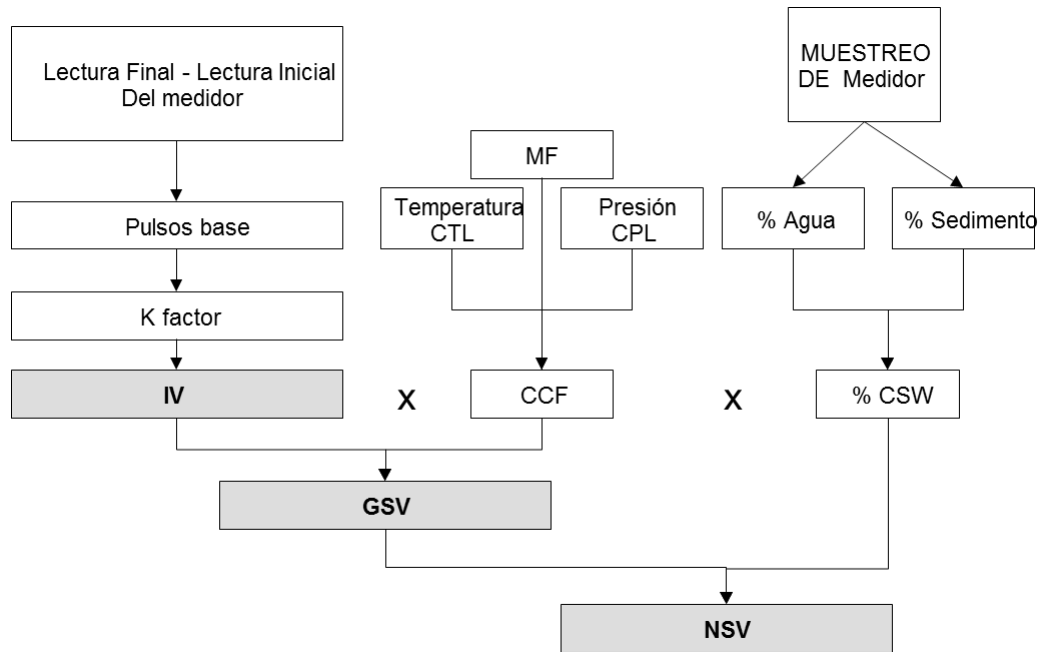
básica de un sistema de medición dinámica controlado y administrado por un computador de flujo:

Ilustración 1-2Arquitectura de Liquidación Volumétrica, tomado del API MPMS Cap. 21.2.



Como se mencionaba anteriormente, el computador concentra las señales de flujo, temperatura, presión y densidad, y mediante algoritmos certificados por el API MPMS, liquida los volúmenes de la siguiente forma:

Ilustración 1-3 Liquidación Volumétrica Mediante Medición Dinámica.



Paso 1: Cálculo de IV (Volumen Indicado)

$$IV = MR_C - MR_O$$

Donde:

MR_C : Lectura de Final del Medidor [Bbls]

MR_O : Lectura de Inicial del Medidor [Bbls]

Paso 2: Cálculo del CCF (Factor de Corrección Combinado)

$$CCF = CTL * CPL * MF$$

Donde:

CTL: Factor de Corrección por Temperatura.

CPL: Factor de Corrección por Presión.

MF: Factor del Medidor

Nota: Para el cálculo del primer MF de un medidor de flujo se asume inicialmente que es igual a 1.

Paso 3: Cálculo de GSV (Volumen Bruto Estándar)

$$GSV = IV * CCF$$

Paso 4: Cálculo de CSW (Factor de Corrección por Agua y Sedimentos)

$$CSW = 1 - \left(\frac{\%S\&W}{100} \right)$$

Donde:

$\%S\&W$: Porcentaje de Agua y Sedimento.

El porcentaje de agua y sedimentos normalmente se obtiene mediante un análisis de laboratorio de la muestra del producto que pasará por el sistema de medición dinámica.

Paso 4: Cálculo del NSV (Volumen Neto Estándar)

$$NSV = GSV * CSW$$

El redondeo de cada uno de estos factores de corrección y volúmenes calculados se realizará con base en las tablas 6 y 7 del API MPMS CAP 12.2.2 Edición 2002 mostradas a continuación:

Tabla 1 Niveles de discriminación factores de corrección, tomada del API MPMS Cap. 12.2.2.

%S&W	XX.XXX
CSW	X.XXXXX
CTL	X.XXXX
CPL	X.XXXX
MF	X.XXXX
CMF	X.XXXX
CCF	X.XXXX

No obstante lo anterior, API MPMS 11.1 Edición 2004 cambia el CTX.XXXXX

Tabla 2 Niveles de discriminación volumétricos, tomada del API MPMS Cap.12.2.2.

	USC Units		SI Units	
	(Bbl)	(gal)	(m ³)	(L)
Op Meter Reading (MR _o)	XX.XX	XX.XX	XX.XXX	XX.0
Cl Meter Reading (MR _c)	XX.XX	XX.XX	XX.XXX	XX.0
Indicated Volume (IV)	XX.XX	XX.XX	XX.XXX	XX.0
Gross Std Volume (GSV)	XX.XX	XX.XX	XX.XXX	XX.0
Net Std Volume (NSV)	XX.XX	XX.XX	XX.XXX	XX.0
S&W Volume (SWV)	XX.XX	XX.XX	XX.XXX	XX.0

1.3 Sistemas de probadores tipo Compacto ⁷

1.3.1 Definiciones:

- a. Espacio entre pulsos (duty cycle o interpulse spacing)

Es la relación porcentual que existe entre el tiempo en el cual un pulso está en su nivel alto, contra el tiempo en que éste está en el nivel bajo. (Esta definición se aplica aun tren de pulsos, como el de un medidor de flujo).

- b. Temporizador contador de una prueba (proving timer counter)

Un temporizador/contador de una prueba, es un contador de alta velocidad, usado en doble cronometría, para medir tiempo con una señal de pulsos de una frecuencia conocida

- c. Pasadas de pruebas (prover pass)

Es el volumen en un viaje del desplazador entre switch detectores en una sola dirección.

- d. Viaje completo de prueba (prover round trip)

Es el volumen bidireccional del probador cuando el desplazador viaja entre switches detectores en una dirección y en la de retorno.

- e. Tipos de Probadores Compactos:

Existen dos tipos de probadores de volumen pequeño:

- Unidireccionales

⁷ API MPMS CAP 4.2 PROVING SYSTEMS, Tercera Edición, Septiembre de 2003.

- Bidireccionales

En los unidireccionales el desplazador viaja en una sola dirección a través de la sección calibrada durante el período de prueba. El desplazador retorna a su posición inicial por medio de un mecanismo adicional.

Los bidireccionales permiten al desplazador viajar en una dirección y luego en la otra durante el período de calibración. Esto se logra reversando el flujo por medio de una válvula de 4 vías.

Un "small volume prover" o probador compacto debe normalmente tener los siguientes elementos:

- Un cilindro calibrado con sus switches detectores del desplazador.
- Un desplazador, tal como, pistón, esfera u otros dispositivos (popet valve).
- Un medio para posicionar el desplazador.
- Un dispositivo medidor de presión.
- Un dispositivo medidor de temperatura.
- Contador temporizador de prueba (Doble cronometría).

Todas las válvulas usadas en y para un sistema "small volume prover" que puedan proveer o contribuir a un "By-Pass" de líquido entre el probador y el medidor, deben estar provistas de un método de chequeo de pase.

Estos probadores deben estar provistos con líneas de drenaje y venteo y se deben dejar las conexiones necesarias para poder realizar la recalibración por el método del "Water Draw Calibration".

1.3.2 Selección de un probador de volumen pequeño o compacto:

A continuación se analizan algunas consideraciones a tener en cuenta en la selección de un probador de pequeño volumen:

- El probador será exclusivo de un sistema de medición o será compartido por varios sistemas de medición.
- Dispersión geográfica de los sistemas de medición dentro de la Estación (Manejo de contaminación, diferencia de temperatura entre probador y medidor).
- Rangos de temperatura y presión.
- Ratas de flujo mínimo, normal y máxima esperadas (habilidad para manejar un rango de flujo mayor con respecto a un probador tradicional).
- Propiedades físicas de los líquidos a ser manejados.
- Tipo del medidor a ser probado.
- Características de la señal de salida del medidor.
- El grado de automatización a ser incorporado en la operación de prueba.

1.3.3 Consideraciones a cumplir en el sitio de operación:

- Disponibilidad de facilidades en el sitio, tales como energía, agua, espacio, etc.
- La pérdida de presión a través del probador no debe ser mayor a las admisibles del brazo medidor bajo prueba.
- Tamaño del bache para poder realizar el proceso de calibración.
- Tiempo necesario para poder realizar el proceso de calibración.

- Conocimiento y nivel tecnológico para operar y mantener el probador compacto.

En la determinación de la sección calibrada entre detectores, los siguientes ítems deben ser considerados por el diseñador:

- La exactitud, resolución y repetibilidad de los switches detectores.
- La resolución del medidor en Pulsos/unidad de volumen.
- La exactitud, resolución, repetibilidad y estabilidad del sistema de interpolación de pulsos.
- La mínima y máxima rata de flujo del medidor bajo prueba.

La uniformidad de la señal del medidor relativa al tiempo (ver "Espacio entre pulsos" en definiciones).

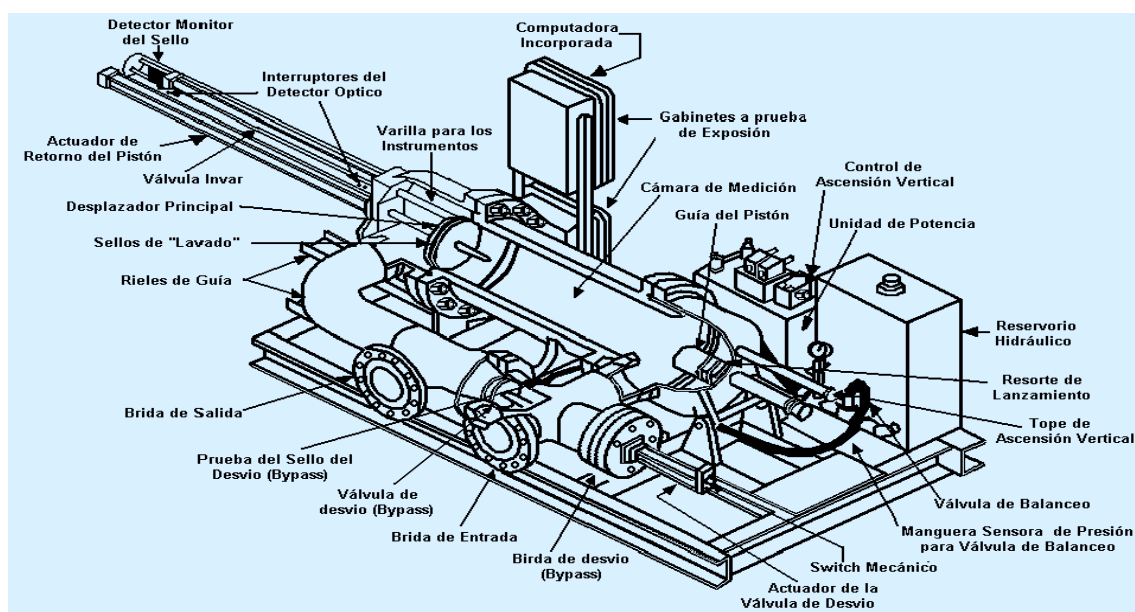
1.3.4 Partes críticas:

Cuando se reemplaza un detector que esté dañado o fallando, gran cuidado debe tenerse para asegurar que el detector quede en el mismo sitio del anterior y su repetibilidad no sea alterada, sin causar cambios en el volumen calibrado en más de 0.01%. Si la posición del detector reemplazado y la reproducibilidad es mayor que $\pm 0.01\%$, el probador deberá ser recalibrado.

Este tipo de probadores, requiere el uso de un sistema de interpolación de pulsos que provea una resolución de no menos de una parte en 10000, del volumen indicado por el medidor, por cada pasada del desplazador entre switches detectores.

A continuación se mostrará un esquemático típico de un probador compacto:

Ilustración 1-4 Partes críticas Probador Compacto.



1.4 Procedimiento para el cálculo del Meter Factor.⁸

Este procedimiento es para determinar y aceptar el factor de medidor, tal como lo establece en el *API MPMS capítulo 12 CALCULATION OF PETROLEUM QUANTITIES* y el Capítulo 12 del MMH, para ello se requiere el certificado del Volumen del Probador, de este certificado, se deben obtener los siguientes datos:

- Volumen del Probador: VP (Bis).
- Diámetro Exterior (pulg.).
- Diámetro Interior (pulg.).
- Espesor (pulg.).
- Tipo del Material de Construcción.

⁸ Manual de medición de hidrocarburos Ecopetrol S.A, Capítulo 5 Medición Dinámica, Versión 1 del 15/01/2008

Del medidor se requiere k-Factor para el procedimiento del cálculo del factor de medidor.

Teniendo estos datos de debe seguir el siguiente procedimiento:

1.4.1 Determinación del Factor de Corrección por efecto de la temperatura en el Producto (CTLM y CTLP), donde: (M) es Medidor y (P) es Probador.

$$CTL_M = e^{\{-K*(T_M-60)*(1+0.8*K*(T_M-60))\}}$$

$$CTL_P = e^{\{-K*(T_P-60)*(1+0.8*K*(T_P-60))\}}$$

Nota: Redondear a Cuatro cifras decimales

Utilizando como variables:

- Temperatura en °F (M y P)
- Gravedad API @ 60°F

Se determina por la Tabla 6B (ASTM D-1250) ó por la siguiente ecuación:

$$GE_{@60°F} = \frac{141.5}{(131.5 + °API_{@60°F})} \quad (1)$$

Para Crudo:

$$K = \frac{341.0957}{(GE_{@60°F} * \rho W_{@60°F})^2} \quad (2)$$

Donde:

$\rho W_{@60°F}$: Densidad del Agua a 60 °F es 999.012

1.4.2 Determinación del Factor de Corrección por efecto de la Presión en el Producto (CPLM Y CPLP)

Variables:

- Temperatura en °F (Medidor y Probador)
- Gravedad API @ 60°F
- Presión (psi)

Se determina por la Tabla de compresibilidad (API Cap. 11.2.1) o siguiendo el procedimiento:

- Paso1: Se calcula el factor de compresibilidad tanto para el probador como para el medidor:*

Para el medidor:

$$F_M = e^{\left\{A+B*T_M+\frac{C+D*T_M}{\rho^2}\right\}}$$

Donde:

F_M : Factor de compresibilidad (Lbs/Pulg2)

A, B, C y D Son constantes

A= -1.9947

B= 0.00013427

C= 793920

D= 2326

ρ : Densidad del producto (gr / ml)

La densidad del producto se calcula de la forma:

$$\rho = \left(\frac{141.5}{^{\circ}API_{@60^{\circ}F} + 131.5} \right) * 0.999012$$

Para el probador:

$$F_M = e^{\left\{A+B*T_M+\frac{C+D*T_M}{\rho^2}\right\}}$$

Donde:

F_P : Factor de compresibilidad (Lbs/Pulg2)

A, B, C y D Son constantes

$$A = -1.9947$$

$$B = 0.00013427$$

$$C = 793920$$

$$D = 2326$$

ρ : Densidad del producto (gr / ml)

La densidad del producto se calcula de la forma:

$$\rho = \left(\frac{141.5}{^{\circ}API_{@60^{\circ}F} + 131.5} \right) * 0.999012$$

b. Paso 2: Cálculo del CPL reemplazando el F_p y P :

Para el probador:

$$C_{PLP} = \frac{1}{1 - 10^{-5} * F_p * P_p}$$

Para el medidor:

$$C_{PLM} = \frac{1}{1 - 10^{-5} * F_p * P_M}$$

Donde:

P_p : Presión promedio del probador (PSI)

P_M : Presión promedio del medidor (PSI)

1.4.3 Determinación del Factor de Corrección por efecto de la Presión sobre el Material (CPSp) del probador

Variables:

- Presión (Psi)
- Diámetro Interior (pulg.)
- Espesor (pulg.)
- Tipo del Material de Construcción

Se determina por la Tabla A-5, 6.7 (API Cap. 12 Sec. 2, Parte 1) ó por la siguiente ecuación:

$$CPS_p = \left\{ 1 + \frac{P_p * ID}{\varepsilon * W_t} \right\}$$

Nota: Redondear a Cuatro cifras decimales.

Donde:

P_p : Presión en el Probador.

ID : Diámetro Interior (pulg.)

ε : Modulo de Elasticidad del Material Tabla 2 (API Cap. 12 Secc. 2, Parte 1) (por Psi)

W_t : Espesor de la pared del Probador (pulg.)

1.4.4 Determinación del Factor de Corrección por efecto de la Temperatura sobre el Material (CTSp) Probador

Variables:

- Temperatura °F
- Tipo del Material de Construcción

Se determina por la Tabla A-1, 2,3 y 4 (API Cap. 12 Secc. 2, Parte 1) ó por la siguiente ecuación:

$$CPS_p = 1 + (T_p - 60) * G_C$$

Nota: Redondear a Cuatro cifras decimales.

Donde:

T_P : Temperatura en el Probador.

G_C : Coeficiente de Expansión Térmica Cúbica Tabla 1 (API Cap. 12 Secc. 2, Parte 1) (por °F)

1.4.5 Cálculo del Factor de Corrección por efecto de la Temperatura sobre el Material (CTSp) para Probadores Compacto.

$$CPS_P = [1 + (T_P - 60) * G_A] * [1 + (T_d - 60) * G_L]$$

Nota: Redondear a Cuatro cifras decimales.

Donde:

TP: Temperatura en el Probador

Td: Temperatura del Detector

Ga: Coeficiente de Expansión Térmica de Superficie

Gl: Coeficiente de Expansión Térmica Lineal

1.4.6 Determinación del Factor de Corrección Combinado para el Probador (CCFp)

$$CCF_P = CTL_P * CPL_P * CPS_P * CTS_P$$

Nota: Redondear a Cuatro cifras decimales.

1.4.7 Determinación del Factor de Corrección Combinado para el Medidor (CCFM)

$$CCFM = CTL_M * CPL_M$$

Nota: Redondear a Cuatro cifras decimales.

1.4.8 Cálculo del Volumen del Medidor (VM)

$$V_M = \frac{\#Pulsos}{K\ Factor}$$

Donde:

#Pulsos: Pulsos generados durante la prueba

K Factor: Pulsos por unidad de volumen [Pulsos/Bbl]

1.4.9 Cálculo del Volumen Corregido del Medidor y el Probador.

El volumen corregido del medidor se calcula de la forma:

$$VC_M = V_M * CCFM$$

Donde:

V_M : Volumen del Medidor [Bbls]

CCFM: Factor de corrección combinado del medidor

El volumen corregido del probador se calcula de la forma:

$$VC_P = V_P * CCFP$$

V_P : Volumen del Probador [Bbls]

CCFP: Factor de corrección combinado del probador.

1.4.10 Cálculo del Factor del Medidor (MF)

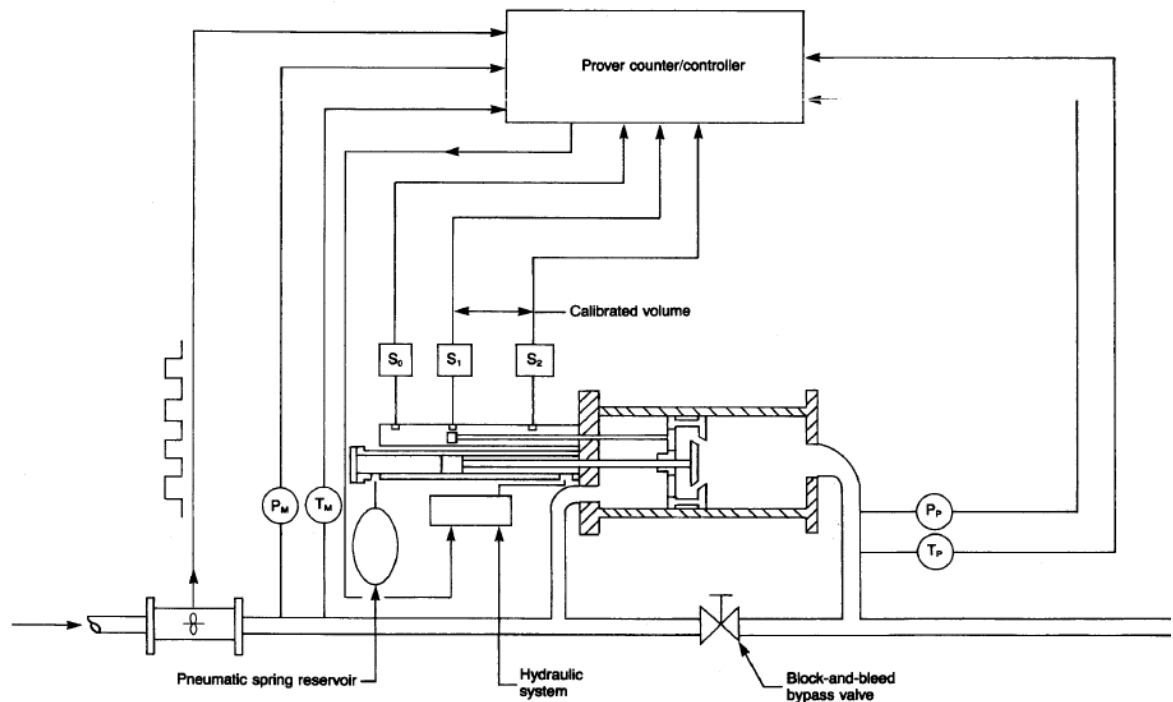
Finalmente el meter factor se calcula mediante el cociente entre el volumen corregido del probador y el volumen corregido del medidor, de la forma:

$$MF = \frac{VC_P}{VC_M}$$

Nota: Redondear a Cuatro cifras decimales.

A continuación se mostrará la arquitectura típica de un sistema de medición dinámica con su respectivo probador compacto para el cálculo del MF según el API MPMS Cap 4.2 PROVING SYSTEMS.

Ilustración 1-5 Arquitectura de Calibración con Probador Compacto, tomado del API MPMS Cap. 4.2.



2. METODOLOGIA DE LINEARIZACIÓN DE METER FACTORS

2.1 Criterios de aplicación de la metodología

Esta metodología debe aplicarse en los casos particulares de operaciones de cargaderos de carrotanques para productos crudos o derivados para transferencia de custodia cuyo flujo en cada uno de los brazos de cargue varíe según condiciones operativas (Número de Carro tanques en cargue simultaneo, número de unidades de bombeo, operaciones de bombeo simultaneas), pues como se demostrará más adelante de manera práctica, el Meter Factor de los medidores de flujo varían significativamente al aumentar y/o disminuir el flujo.

2.2 Corridas de Calibración

Las corridas de calibración hechas en el brazo 1 y 2 del cargadero de carro tanques de CPF1 fueron hechas con el probador compacto Daniel con número de serie 0908-358252-10-1 con la filosofía propuesta, la cual básicamente consiste en hacer el mayor número de corridas posibles en un día normal de operación con todas las condiciones operacionales posibles (número de carro tanques, número de bombas activas, nivel de la cabeza del tanque), para así poder identificar los rangos de flujo a los cuales son sometidos los medidores de flujo tipo Coriolis en su operación cotidiana.

2.2.1 Procedimiento de calibración

a. Ingreso de información al S600 para calibración de un medidor.

Antes de realizar las conexiones eléctricas y mecánicas en campo se debe ingresar al computador de flujo los datos del probador y del medidor que se va a calibrar. Tales como fabricante, N° serial, Fecha de la última calibración, modelo del medidor, TAG,

b. Alistamiento mecánico del probador compacto.

Revisar si la presión del nitrógeno en el plenum es la adecuada, esta presión para la aplicación del cargadero debe encontrarse en 60 psi + (presión de línea/3.2), como la presión de línea durante el cargue es de 35 PSI la presión del plenum deberá estar en 63 psi ± 5 .

Conectar el probador compacto al brazo del cargadero donde se encuentra el sistema de medición que se quiere calibrar. En el brazo de medición se encontraran tres válvulas para la alineación del probador, dos de bola de $\frac{1}{4}$ de vuelta para alineación del probador compacto y una de doble bloqueo y purga para asegurar que todo el fluido que pase a través del medidor pase en su totalidad por el probador compacto; es muy importante verificar antes de cada calibración de que esta válvula no tenga pase, ya que esta condición puede influir en que las corridas consecutivas no sean repetibles en un 0.05% según el API MPMS Cap 4.8.

Como consideraciones adicionales se debe tener en cuenta:

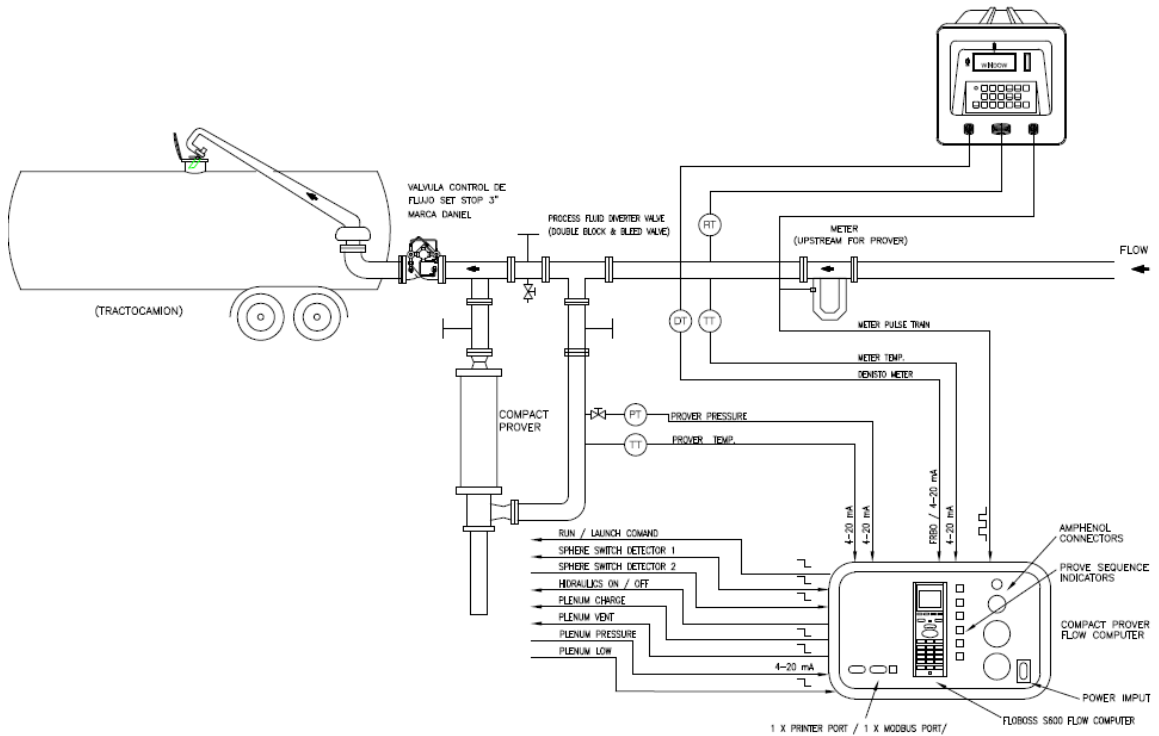
- La válvula del plenum al cilindro se debe encontrar abierta, para asegurar el correcto cargue neumático.
- Las 4 válvulas de venteo ubicadas a la entrada y salida de la cámara de medición del probador se deben encontrar cerradas.
- Asegurando lo anterior y teniendo en cuenta la figura 1 se debe abrir parcialmente la válvula aguas arriba del probador, esto con el fin de garantizar que el probador se llene de fluido lentamente y facilitar la purga del mismo.
- Una vez entre fluido al probador se debe purgar por medio de las válvulas superiores ubicadas a la entrada y salida de la cámara de medición hasta asegurar su lleno total sin presencia de aire.
- Asegurando esta condición, se debe completamente las válvulas de entrada y salida del probador compacto.

- Por último, se cierra la válvula de doble bloqueo y purga. Con esto se asegura que todo el producto que pase por el medidor es el que va a pasar por el probador compacto.

c. Alistamiento eléctrico del probador compacto.

Conectar las señales del probador compacto y del brazo de medición al computador de flujo. Ver figura 2.

Ilustración 2-1 Arquitectura de conexión de señales.



El probador compacto tiene un conector amphenol que lleva sus señales al computador de flujo, este conector debe conectarse en el conector A de la consola portátil.

Para el conjunto de señales del brazo de medición a calibrar, existe una conexión tipo plug and play cuyo terminal es un conector amphenol de 6 pines conectado a una consola de paso ubicada en cada brazo. El otro extremo del cable se encuentra un conector amphenol de 10 pines el cual debe ir conectado al Conector B de la consola portátil.

d. Alimentación del probador compacto.

El probador compacto tiene un plug de 4 polos para su conexión de potencia, este plug se debe conectar a una toma ubicada en cada una de las islas con una alimentación de 220Vac.

e. Alimentación de la consola de flujo portátil.

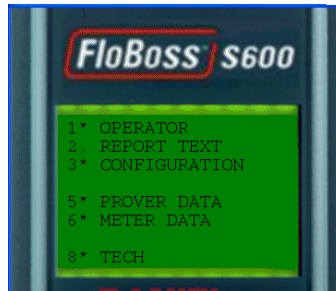
El computador de flujo portátil tiene un plug de 3 polos para su conexión de potencia, este plug se debe conectar a una toma ubicada en cada una de las islas con una alimentación de 110Vac regulados.

f. Revisión y configuración del meter factor y k-factor del medidor.

Antes de iniciar con las corridas de calibración se debe ingresar el meter factor y el k-factor actual del medidor a calibrar.

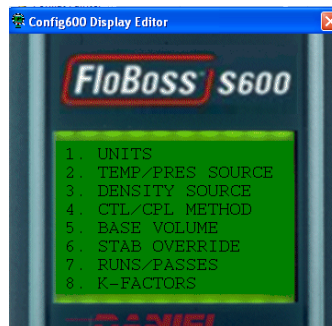
En el menú principal del computador de flujo aparecerá lo siguiente:

Ilustración 2-2 Menú Computador de Flujo FlowBoss S600



Para configurar el meter factor y el k factor se presiona la tecla 3 y el S600 desplegara otro menú, como se muestra a continuación:

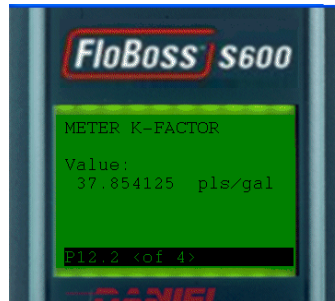
Ilustración 2-3 Menú Computador de Flujo FlowBoss S600



Para ingresar a la sección en mención se oprime la tecla 8 (K-FACTORS), la pantalla inicialmente mostrara el meter factor configurado anteriormente. Para cambiar el meter factor de acuerdo al asignado al instrumento durante la última calibración se oprime la tecla CHNG (change-cambiar), se ingresa el código de la aplicación (1111), se ingresa el valor del meter factor seguido de la tecla enter.

Debajo de la tecla menú, existe las teclas de navegación (arriba, abajo izquierda y derecha), oprimir la tecla derecha para ingresar al K-factor del medidor, si el k-factor del medidor es diferente al pre configurado se debe cambiar este valor por el actual. Para esto se oprime la tecla CHNG (change-cambiar) y se ingresa el código de la aplicación (1111), luego se ingresa el valor del k-factor seguido de la tecla enter.

Ilustración 2-4 Menú Computador de Flujo FlowBoss S600



Para volver al menú principal se oprime dos veces la tecla menú.

g. Encendido del probador compacto.

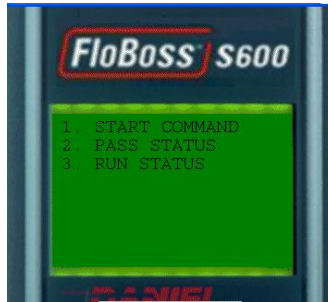
El probador compacto cuenta con dos cajas de paso con botoneras, la ubicada a la izquierda es para el encendido y apagado del motor, esta cuenta con los botones start y stop. La ubicada a la derecha es para la operación local del probador cuenta con los interruptores uno para objeto de calibración del probador (upstream y down stream) y otro para operación local mediante la válvula solenoide utilizada para abrir o cerrar el circuito hidráulico del probador.

Para el encendido del probador, se debe enviar el pulsador del probador compacto a RUN en este momento se escuchara cuando se energiza la válvula solenoide y se enciende el testigo de Detector Status de la consola, seguido a esto se oprime el botón start del motor. Una vez que el motor haya arrancado posicionamos el pulsador a RET e inmediatamente el testigo de Detector Status se apaga y se enciende el testigo de Upstream Status. En ese momento el probador compacto está listo para iniciar corridas de verificación y calibración en el brazo de medición.

h. Arranque de corridas de calibración.

En el menú principal se ingresa a OPERATOR oprimiendo la tecla 1 en donde se desplegara el siguiente menú:

Ilustración 2-5 Menú Computador de Flujo FlowBoss S600



Se ingresa al START COMMAND oprimiendo la tecla 1, una vez el display muestre el estado (READY) se oprime la tecla CHNG (change) y se digita la clave (1111) y aparecerá dos opciones:

START

ABORT

Oprimir tecla 1 para iniciar corrida de calibración o verificación.

En el menú del operador se puede observar el estado de las pasadas o corridas, esto para objeto informativo. Para ingresar a esta información se oprime la tecla 2 o 3 dependiendo de que se requiera consultar.

i. Reporte de Calibración

El reporte de calibración para la aplicación del S600 para el cargadero de carrotanques de CPF1 fue diseñado basado en la norma API MPMS Cap 5.6 Apéndice D, tal como se muestra a continuación:

Ilustración 2-6 Reporte de Calibración Daniel S600.

RUBI		USV						

REPORT DE CALIBRACION								

PACIFIC RUBIALES ENERGY								
PROBADOR COMPACTO CARGADERO CPF1								
Fecha y hora:	06/11/2011 10:40:43	No de tiquete: 0						

DATOS MEDIDOR								
TAG :	FIT-104	Modelo: CMF300M355						
Fabricante:	Micro Motion	Serial: 486736						
Diametro:	3"	Metodo Calculo: Promedio						
		K_Factor: 500.00						
		M_Factor: 0.9987						
		Producto: Crudo						

DATOS PROBADOR								
Tipo :	PRV COMPCT	EspesorPared: 0.88						
Vol_Base :	15.048138	Gamma Tubo : 0.0000120						
DiaInterno:	12.25	ModElasticid: 28800000						
Material :	17-4PH Stainless	Motivo Aborto : 0						
		Ref_Temp:60.0 Deg.F						
		Ref_Pres:14.7 psig						
		Tablas : TABLE54A						

DATOS CORRIDAS								
No.	Pulsos (Puls)	Dens_60 (API)	M_Temp (DegF)	M_Pres (Psig)	P_Temp (DegF)	P_PRES (Psig)	Flujo (GPH)	M_Factor
1	7438.250	13.1000	168.3	9.3	168.0	9.3	9536.5	1.0130
2	7435.329	13.1000	170.9	9.1	170.6	9.1	9632.3	1.0134
3	7435.456	13.1000	173.2	9.1	173.2	9.0	9728.4	1.0133
4	0.000	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0000
5	0.000	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0000
6	0.000	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0000
7	0.000	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0000
8	0.000	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0000
9	0.000	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0000
10	0.000	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0000
From:	7436.345	13.1000	170.8	9.1	170.6	9.1	9632.4	1.0132
K_Factor From:	493.47 PUL/Gal							
Repetibilidad:	0.040 %							
Dato Calculado Probador								
1.	Volumen Base en Gal							15.048138
2.	Factor de Correccion por efecto de la Temp en el Acero (CTSP)							1.00133
3.	Factor de Correccion por efecto de la Pres en el Acero (CPSP)							1.00000
4.	Factor de Correccion por efecto de la Temp en el liquido (CTLP)							0.95995
5.	Factor de Correccion por efecto de la Pres en el liquido (CPLP)							1.00004
6.	Factor Combinado de Correccion (CCF)							0.96126
7.	Volume Corregido Probador Bbl (Linea 1 X Linea 6)							14.46516
Dato Calculado para el Medidor								
8.	Volumen Medido Gal							14.87269
9.	Factor de Correccion por efecto de la temp en el liquido (CTLM)							0.95985
10.	Factor de Correccion por efecto de la pres en el liquido (CPLM)							1.00004
11.	Factor Combinado de Correccion (CCF)							0.95989
12.	Volumen Corregido Medidor Bbls (Linea 8 X Linea 11)							14.27621
Meter Factor Calculado								
13.	M_Factor (Linea 7 / Linea12)							1.0132
14.	K_Factor Actual Pul/ Gal							500.00
15.	Diferencia M_Factor con respecto al anterior							-0.0145

FIRMAS								
_____ OPERADOR			_____ SUPERVISOR			_____ INSPECTOR		

2.2.2 Criterios de aceptación del Meter Factor

a. Repetibilidad mínima

El API MPMS Capítulo 4.8 define que el mínimo de repetibilidad entre corridas consecutivas es de 0.05%. De lo contrario el computador de flujo abortará inmediatamente la corrida y deberá ser necesario ejecutar una

nueva. Este último está configurado para ejecutar al menos 3 corridas de múltiples pasadas por tiquete.

b. Diferencia de temperatura entre el probador y el medidor

Dado que el API MPMS no genera lineamientos claros donde hable de estas diferencias a la hora de hacer corridas de calibración, se utilizó como guía el Manual de Medición de Hidrocarburos de Ecopetrol Capítulo 5 donde recomienda “verificar que la diferencia de temperatura entre el medidor y el probador no sea mayor de 1.5° F, sin embargo esta cifra depende del montaje probador, medidor. Puede ser menor cuando están muy cercanos y no hay caídas de presión, o mayor cuando, por ejemplo, el medidor está en una sección de alta presión y el probador en una de baja presión. Entonces es mejor definirla de acuerdo a cada aplicación”.

Debido a las condiciones de diseño y operación particulares de la aplicación del cargadero de carrotanques de CPF1, donde tener flujos estables durante las corridas y por ende cumplir con la repetibilidad entre corridas consecutivas es tan exigente;, se define que la tolerancia máxima permitida, según las mejores prácticas en aplicaciones de cargaderos de carrotanques, de la diferencia de temperatura entre el probador y el medidor es de $\pm 3^{\circ}\text{F}$ y así mismo se configura en el computador de flujo.

2.3 Preparación de las Corridas de Calibración

Tal como se pudo observar en la figura 8 el reporte de calibración que genera el computador de flujo Daniel S600 contiene toda la información asociada al probador y medidor de flujo, sin embargo para este caso práctico es necesario tabular y organizar la información promedio de las 3 corridas en el siguiente orden:

- i. Meter Factor.
- ii. Temperatura y Presión del Medidor.
- iii. Temperatura y Presión del Probador.
- iv. Gravedad API del producto.
- v. Rata de Flujo.

Tal como se puede observar a continuación:

Tabla 3 Tabulación Reportes de Calibración

Número de Reporte	SISTEMA DE MEDICIÓN DINÁMICA X						
	Meter	MEDIDOR		PROVER		Gravity	Flow
	Factor	Temp.	Press.	Temp.	Press.	API	Rate
1	MF1	T1 m	P1 m	T1 p	P1 p	d1	q1
2	MF2	T1 m	P1 m	T1 p	P1 p	d2	q2
3	MF3	T1 m	P1 m	T1 p	P1 p	d3	q3
4	MF4	T1 m	P1 m	T1 p	P1 p	d4	q4
5	MF5	T1 m	P1 m	T1 p	P1 p	d5	q1
6	MF6	T1 m	P1 m	T1 p	P1 p	d6	q2
7	MF7	T1 m	P1 m	T1 p	P1 p	d7	q3
8	MF8	T1 m	P1 m	T1 p	P1 p	d8	q4
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
N	MF _n	T(n) m	P(n) m	T(n) p	P(n) p	d(n)	q(n)

Esta preparación de la información es necesaria hacerla para cada brazo de medición dinámica a linearizar.

2.4 Criterios de Selección de las corridas de calibración para la linearización

2.4.1 Validación de diferencia de temperatura entre el probador y medidor

Es necesario validar que la diferencia de temperatura entre el probador y el medidor de flujo sea menor de 3°F según el criterio establecido en el numeral 3.2.2 (Criterios de aceptación del Meter Factor). Se descargarán las corridas que no cumplan este criterio.

NOTA: El criterio de Repetibilidad es realizado automáticamente en el computador de flujo, el cual aborta la corrida en caso tal que no se cumpla. Por lo tanto todo reporte de calibración generado cumple con este criterio.

2.4.2 Validación Menor Desviación estándar

Como la incertidumbre asociada al Meter factor es directamente proporcional a la desviación estándar de los factores de cada una de las corridas, por lo tanto es necesario de los reportes de calibración que se tienen escoger las 25 corridas que tengan los Meter Factor más cercano entre sí, es decir el grupo de corridas que tengan menor desviación estándar.

2.5 Linearización de los Meter Factor

La linearización de los factores del medidor consiste básicamente en hallar los meter factor promedio a diferentes rangos de flujo típicos de la aplicación elegida. Es decir, que a través de un minucioso análisis estadístico elegir los rangos de flujo a los cuales el medidor trabaja y calcular el meter factor a dicho rango, esto con el objetivo de disminuir de la incertidumbre del sistema de medición asociada al meter factor, cuyo impacto es altísimo en las liquidaciones volumétricas.

Ahora, para lograr esto, es necesario en primer lugar hacer el cálculo de la incertidumbre asociada del meter factor promedio de las 25 corridas, con base en el API MPMS CAP 13 SECCIÓN 2 “Methods of evaluation meter proving data” la cual dice:

La incertidumbre de mediciones individuales en un conjunto de datos en relación con el verdadero valor es el producto de la desviación estándar y el factor de conversión de desviación estándar a incertidumbre tal como se muestra a continuación:

$$a(\bar{x}) = [T(\%, k)][s(\bar{x})]$$

Donde,

$T(\%, k)$, factor de conversión de desviación estándar a incertidumbre.

$s(\bar{x})$, desviación estándar del conjunto de datos.

Para conjunto de datos muy largos (más de 25) de mediciones aleatorias independientes, las variaciones estadísticas en la data usualmente sigue una distribución normal (Gaussiana).

Para conjuntos de datos cortos (25 o menos), el cual es este caso en específico, los valores de la distribución-t puede ser aplicada a la desviación estándar para estimar la incertidumbre. Mostradas a continuación:

Tabla 4 Distribución t, tomada del API MPMS Cap. 13.2.

Number of Sets or Measurements, n or k	$T(\%, n \text{ or } k)$ Versus Confidence Level			
	90%	95%	99%	99.5%
2	6.314	12.706	63.657	127.320
3	2.920	4.303	9.925	14.089
4	2.353	3.182	5.841	7.453
5	2.132	2.770	4.604	5.598
6	2.015	2.571	4.032	4.773
7	1.943	2.447	3.707	4.317
8	1.895	2.365	3.499	4.029
9	1.860	2.306	3.355	3.833
10	1.833	2.262	3.250	3.690
11	1.812	2.228	3.169	3.581
12	1.796	2.201	3.106	3.497
13	1.782	2.179	3.055	3.428
14	1.771	2.160	3.012	3.372
15	1.761	2.145	2.977	3.326
16	1.753	2.131	2.947	3.286
17	1.746	2.120	2.921	3.252
18	1.740	2.110	2.898	3.222
19	1.734	2.101	2.878	3.197
20	1.729	2.093	2.861	3.174
21	1.725	2.086	2.845	3.153
22	1.721	2.080	2.831	3.135
23	1.717	2.074	2.819	3.119
24	1.714	2.069	2.807	3.104
25	1.711	2.064	2.797	3.091
∞	1.645	1.960	2.576	2.807

Para aplicaciones de estadística de mediciones de transferencia de custodia un porcentaje de nivel de confianza del 95% es tradicionalmente usado para

análisis y reportes de incertidumbres. Sin embargo otros niveles de confianza pueden ser usados para mediciones específicas. En este caso en particular se usará un nivel de confianza del 95 %.

2.5.1 Cálculo de Meter Factor Promedio de las 25 Corridas y su incertidumbre asociada.

Teniendo seleccionadas las 25 corridas que cumplan los criterios anteriormente mencionados se procede a calcular el Meter Factor Promedio de la siguiente forma:

$$\overline{MF}_{Sistema} = \sum_{i=1}^{25} MF_i / 25 \quad (1)$$

Luego, se calcula la desviación estándar de las 25 corridas de la forma:

$$s(\overline{MF}_{Sistema}) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (MF_k - \overline{MF})^2}{n - 1}} \quad (2)$$

Donde

MF_k : Meter factor de cada reporte de calibración individual.

$\overline{MF}$: Meter factor promedio.

Por último, la incertidumbre seria de la forma:

$$\alpha(\overline{MF}_{Sistema}) = [T(95\%, 25)][s(\overline{MF}_{Sistema})] \quad (3)$$

Donde

$$T(95\%, 25) = 2,064 \text{ , según Figura 10.}$$

2.5.2 Análisis estadístico para la selección de rangos de Flujo óptimos para linearización.

El objetivo principal del análisis estadístico es el elegir los rangos de flujo principales descritos por las corridas de calibración hechas de tal forma que la desviación estándar de cada uno de los rangos sea mínima y así poder disminuir la incertidumbre asociada al MF.

Este procedimiento se hace de forma manual, en primer lugar generando las particiones de rangos de flujo donde se identifique un cambio de al menos 0.001 en el Meter Factor.

NOTA: El número de rangos de flujo está limitado a la capacidad de rangos de flujo de linearización del computador de flujo.

Una vez se hayan generado los n rangos de flujo, se procede a calcular la desviación estándar de los Meter factor asociados. Se podrá iterar agregando un MF de un grupo a otro subsiguiente y recalculando la desviación estándar del rango, esto con el único objetivo de disminuir al máximo la incertidumbre asociada.

2.5.3 Cálculo de los Meter Factor Promedio para cada rango de flujo óptimo.

Si se tienen n rangos de flujo seleccionados, y cada rango de flujo tiene k meter factors asociados, se calcularía la incertidumbre asociada a cada rango de la siguiente forma:

$$\overline{MF}_n = \sum_{i=1}^k MF_i / k \quad (1)$$

Luego, se calcula la desviación estándar de las k corridas de la forma:

$$s(\overline{MF}_n) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^k (MF_j - \overline{MF}_n)^2}{k - 1}} \quad (2)$$

Donde

MF_j : Meter factor de cada reporte de calibración individual del rango n .

$\overline{MF}_n$: Meter factor promedio del rango n .

Por último, la incertidumbre sería de la forma:

$$a(\overline{MF}_n) = [T(95\%, k)][s(\overline{MF}_n)] \quad (3)$$

Donde

$T(95\%, k)$: Se toma de la tabla asociada a la figura 10.

Finalmente es recomendable tabular la información resultante de cada sistema de medición de la siguiente forma:

Tabla 5 Consolidado MF Linearizados

SISTEMA DE MEDICIÓN DINÁMICA X		
RANGOS DE FLUJO	MF (i)	Incertidumbre (i)
Rango 1	MF (1)	α (1)
Rango 2	MF (2)	α (2)
Rango 3	MF (3)	α (3)
.	.	.
.	.	.
.	.	.
Rango n	MF (n)	α (n)

2.5.4 Elaboración de Cartas de Control

Ahora, teniendo seleccionado los rangos de flujo óptimos para la linearización, es necesario elaborar las cartas de control tanto del MF promedio de las 25 corridas, como de los rangos de flujo linearizados.

2.5.5 Comparación de incertidumbres de Meter Factor linearizados vs Incertidumbre de Meter Factor Promedio de las 25 corridas.

Esta comparación consiste en validar si la incertidumbre de los Meter Factor linearizados es realmente menor que la del Meter Factor Promedio de las 25 corridas, tal como se puede observar a continuación:

Tabla 6 Comparación Incertidumbres Linearización vs Incertidumbre MF Promedio

SISTEMA DE MEDICIÓN DINÁMICA X						
	Linearizados		Sin Linearizar		Comparación	
RANGOS DE FLUJO	MF (i)	Incertidumbre (i)	MF Promedio	Incertidumbre Promedio	Diferencia MF	% Diferencia U
Rango 1	MF (1)	α (1)	MF (p)	α (p)	MF(p) - MF (1)	$[\alpha (1)/\alpha (p)] - 1$
Rango 2	MF (2)	α (2)	MF (p)	α (p)	MF(p) - MF (2)	$[\alpha (2)/\alpha (p)] - 1$
Rango 3	MF (3)	α (3)	MF (p)	α (p)	MF(p) - MF (3)	$[\alpha (3)/\alpha (p)] - 1$
.	.	.	.	.		
.	.	.	.	.		
.	.	.	.	.		
Rango n	MF (n)	α (n)	MF (p)	α (p)	MF(p) - MF (n)	$[\alpha (n)/\alpha (p)] - 1$

Donde:

% Diferencia U, se refiere al porcentaje de disminución (si es negativo) o aumento (si es positivo) de la incertidumbre del Meter Factor Linearizado vs el No Linearizado.

3. ANÁLISIS TÉCNICO DE LA LINEARIZACIÓN DE LOS METER FACTOR PARA LOS MEDIDORES DE FLUJO TIPO CORIOLIS DE LOS BRAZOS 1 Y 2 DEL CARGADERO DE CARROTANQUES DE CPF1 CAMPO RUBIALES.

Las corridas de calibración hechas en el brazo 1 y 2 del cargadero de carro tanques de CPF1 fueron hechas con el probador compacto Daniel con número de serie 0908-358252-10-1 con la filosofía propuesta, la cual básicamente consiste en hacer el mayor número de corridas posibles en un día normal de operación con todas las condiciones operacionales posibles (número de carro tanques, número de bombas activas, nivel de la cabeza del tanque), para así poder identificar los rangos de flujo a los cuales son sometidos los medidores de flujo tipo Coriolis en su operación cotidiana.

Las corridas de calibración de los brazos 1 y 2 fueron hechas de 7:00 am a 5:00 pm aproximadamente, a condiciones normales de operación y diferentes condiciones de proceso.

A continuación se mostrarán los datos obtenidos

Brazo 1

Tabla 7 Resumen de resultados Corridas de Calibración Brazo 1.

Brazo 1		
# Corrida	Flujo (GPH)	MF
1	9736,9	1,0125
2	11270,7	1,0122
3	11284,2	1,0123
4	10397,7	1,0122
5	11852,1	1,0125
6	11113,5	1,0125
7	10462,3	1,0124
8	11436,6	1,0126
9	14451,8	1,0123
10	15838,8	1,0122
11	13432,1	1,0119
12	11978	1,0118
13	12040,1	1,0121
14	12053,6	1,0121
15	11248,6	1,0129
16	11269,2	1,0125
17	11283,9	1,0123
18	11298,9	1,0122
19	11900,1	1,0129
20	11903,1	1,0123
21	13635	1,0123
22	13631	1,0122
23	13798	1,0120
24	16911,5	1,0120
25	16239,6	1,0120
26	11809	1,0120
27	4901,3	1,0131
28	4816,2	1,0129
29	4790,2	1,0130
30	11068	1,0124

Tal como se puede observar en el brazo 1, se obtuvieron corridas de calibración en un amplio rango de flujo aproximadamente de 4.500 GPH a 17.000 GPH.

Ahora organizando la información de los reportes de calibración tenemos que:

Tabla 8 Resultados Corridas de Calibración Brazo 1.

Número de Reporte	BRAZO 1							
	Meter	MEDIDOR		PROVER		Gravity	Flow Rate	Temp M vs P
	Factor	Temp. [°F]	Press [PSI]	Temp. [°F]	Press [PSI]	°API	[GPH]	[°F]
1	1.0125	172.8	9.9	171.7	9.9	13.2	9736.9	1.1
2	1.0122	173.8	12.2	172.9	12.2	13.2	11270.7	0.9
3	1.0123	173.8	12.2	173.4	12.1	13.2	11284.2	0.4
4	1.0122	174.1	10.8	173.6	10.8	13.2	10397.7	0.5
5	1.0125	174.8	12.9	174.6	12.9	13.2	11852.1	0.2
6	1.0125	174.6	11.5	175.0	11.5	13.2	11113.5	0.4
7	1.0124	175.0	10.4	175.0	10.4	13.2	10462.3	0
8	1.0126	175.0	12.0	175.7	12.0	13.2	11436.6	0.7
9	1.0123	171.1	17.6	173.3	17.6	13.2	14451.8	2.2
10	1.0122	175.3	19.7	177.4	19.7	13.2	15838.8	2.1
11	1.0119	175.9	15.2	178.2	15.2	13.2	13432.1	2.3
12	1.0118	175.2	12.8	177.3	12.8	13.2	11978	2.1
13	1.0121	175.8	12.7	178.0	12.7	13.2	12040.1	2.2
14	1.0121	176.0	12.7	178.2	12.7	13.2	12053.6	2.2
15	1.0129	173.5	11.9	174.9	11.9	13.2	11248.6	1.4
16	1.0125	174.5	11.9	176.0	11.9	13.2	11269.2	1.5
17	1.0123	174.7	11.8	176.5	11.8	13.2	11283.9	1.8
18	1.0122	175.0	11.8	176.8	11.8	13.2	11298.9	1.8
19	1.0129	176.2	13.0	176.2	13.0	13.2	11900.1	0
20	1.0123	176.3	13.0	177.4	13.0	13.2	11903.1	1.1
21	1.0123	176.5	16.1	178.1	16.6	13.2	13635	1.6
22	1.0122	176.5	16.1	178.2	16.1	13.2	13631	1.7
23	1.0120	176.5	16.4	178.3	16.4	13.2	13798	1.8
24	1.0120	177.0	22.6	178.0	22.6	13.2	16911.5	1
25	1.0120	177.6	21.1	179.6	21.1	13.2	16239.6	2
26	1.0120	176.7	13.2	178.5	13.2	13.2	11809	1.8
27	1.0131	175.3	5.2	174.2	5.2	13.2	4901.3	1.1
28	1.0129	174.8	5.1	173.6	5.1	13.2	4816.2	1.2
29	1.0130	174.7	5.2	173.2	5.2	13.2	4790.2	1.5
30	1.0124	173.9	12.6	175.5	12.6	13.2	11068	1.6

Tal como se puede observar, las 30 corridas de calibración pasaron el criterio de temperatura máxima entre el probador y el medidor. Por lo tanto son aptas para seguir con el proceso de linearización.

Brazo 2

Tabla 9 Resumen de resultados Corridas de Calibración Brazo 2.

Brazo 2		
# Corrida	Flujo (GPH)	MF
1	12793	1,0182
2	10530	1,02
3	10097,8	1,0202
4	10762,8	1,02
5	12222,5	1,0182
6	11139	1,0192
7	13741,4	1,0179
8	12163,9	1,0185
9	10092,5	1,019
10	10095,3	1,019
11	10820,9	1,0182
12	9639,3	1,0185
13	10837,3	1,0184
14	10203,4	1,0184
15	11190,3	1,0178
16	11798,8	1,0173
17	11800,6	1,0174
18	11798,9	1,0172
19	6143,4	1,0227
20	6817,9	1,0218
21	6160,2	1,023
22	8274	1,0201
23	7815,3	1,0212
24	21709,7	1,0155
25	21464,8	1,0156
26	21250,1	1,0156
27	21335,9	1,0153

Tal como se puede observar en el brazo 2, se obtuvieron corridas de calibración en un amplio rango de flujo aproximadamente de 6.000 GPH a 22.000 GPH.

Ahora organizando la información de los reportes de calibración tenemos que:

Tabla 10 Resultados Corridas de Calibración Brazo 2.

Número de Reporte	Meter Factor	BRAZO 2						
		MEDIDOR		PROVER		Gravity	Flow	Diferencia Temp
		Temp. [°F]	Press [PSI]	Temp. [°F]	Press [PSI]	°API	[GPH]	M vs P [°F]
1	1.0183	174.4	14.5	175.0	14.5	13.2	12835.4	0.6000
2	1.02	175.8	10.6	176.1	10.6	13.2	10530	0.3000
4	1.02	177.7	10.1	177.9	10.1	13.2	10762.8	0.2000
5	1.0182	179.0	12.2	179.7	12.2	13.2	12222.5	0.7000
7	1.0179	179.9	14.8	180.6	14.8	13.2	13741.4	0.7000
8	1.0185	179.8	12.0	180.5	12.0	13.2	12163.9	0.7000
9	1.019	179.7	9.2	180.1	9.2	13.2	10092.5	0.4000
10	1.019	179.7	9.2	180.2	9.2	13.2	10095.3	0.5000
11	1.0182	179.2	10.2	180.6	10.2	13.2	10820.9	1.4000
12	1.0185	179.7	8.5	180.2	8.5	13.1	9639.3	0.5000
13	1.0184	179.8	10.2	180.3	10.2	12.8	10837.3	0.5000
14	1.0184	179.8	9.8	180.1	9.8	12.8	10203.4	0.3000
15	1.0178	180.0	11.1	180.4	11.1	12.8	11190.3	0.4000
16	1.0173	180.2	12.0	180.8	12.0	12.8	11798.8	0.6000
17	1.0174	180.1	12.0	180.7	12.0	12.8	11800.6	0.6000
18	1.0172	180.0	12.0	180.7	12.0	12.8	11798.9	0.7000
19	1.0227	171.3	4.7	170.7	4.7	12.9	6143.4	0.6000
20	1.0218	171.3	5.4	170.5	5.4	13.0	6817.9	0.8000
21	1.023	171.0	4.7	170.0	4.7	13.0	6160.2	1.0000
22	1.0201	171.3	7.1	172.1	7.1	13.0	8274	0.8000
23	1.0212	172.2	6.5	172.6	6.5	13.0	7815.3	0.4000
24	1.0155	176.5	33.2	177.4	33.2	12.8	21709.7	0.9000
25	1.0156	177.0	32.4	178.0	32.4	12.8	21464.8	1.0000
26	1.0156	174.6	32.3	175.6	32.3	12.8	21250.1	1.0000
27	1.0153	175.6	32.3	176.7	32.3	12.8	21335.9	1.1000

Tal como se puede observar, las 27 corridas de calibración pasaron el criterio de temperatura máxima entre el probador y el medidor. Por lo tanto son aptas para seguir con el proceso de linearización.

3.1 Linearización de los meter factor de los medidores del brazo 1 y 2 del cargadero de carrotanques del cp1 – campo rubiales.

3.1.1 Incertidumbre Brazo 1

Teniendo en cuenta lo anterior, de las 30 corridas de calibración se escogen las 25 más cercanas entre sí para así asegurar una desviación estándar más baja. A continuación se muestran las escogidas organizadas de menor flujo a mayor:

Tabla 11 Resultados 25 Corridas de Calibración Brazo 1 con Desviación Estándar más baja.

# Corrida	Flujo	MF
29	4790,2	1,0130
28	4816,2	1,0129
27	4901,3	1,0131
1	9736,9	1,0125
7	10462,3	1,0124
30	11068	1,0124
6	11113,5	1,0125
15	11248,6	1,0129
16	11269,2	1,0125
17	11283,9	1,0123
3	11284,2	1,0123
8	11436,6	1,0126
5	11852,1	1,0125
19	11900,1	1,0129
20	11903,1	1,0123
13	12040,1	1,0121
14	12053,6	1,0121
11	13432,1	1,0119
22	13631	1,0122
21	13635	1,0123
23	13798	1,0120
9	14451,8	1,0123
10	15838,8	1,0122
25	16239,6	1,0120
24	16911,5	1,0120

Las cuales arrojan un meter factor promedio calculado de la forma:

$$\overline{MF}_{brazo\ 1} = \sum_{i=1}^{25} MF_i / 25 = 1,0124$$

Se calcula la desviación estándar de las 25 corridas de la forma:

$$s(\overline{MF}_{brazo\ 1}) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (MF_k - \overline{MF})^2}{n - 1}} = 0.00033$$

Ahora, la incertidumbre sería de la forma:

$$a(\overline{MF}_{brazo\ 1}) = [T(95\%, 25)] [s(\overline{MF}_{brazo\ 1})]$$

Donde

$$T(95\%, 25) = 2,064 \text{ , según la tabla 3.}$$

$$s(\overline{MF}_{brazo\ 1}) = 0.00033$$

Por lo tanto,

$$a(\overline{MF}_{brazo\ 1}) = 0,06946\%$$

3.1.2 Análisis Estadístico Brazo 1

El objetivo principal del análisis estadístico es el elegir los 4 rangos de flujo principales descritos por las corridas de calibración hechas de tal forma que la desviación estándar de cada uno de los rangos sea mínima y así poder disminuir la incertidumbre asociada al MF.

Analizando minuciosamente los datos, se eligieron los siguientes rangos de flujo:

$$Rango1_{brazo1} = 0 - 5000 \text{ GPH}$$

$$Rango2_{brazo1} = 5000 - 12000 \text{ GPH}$$

$$Rango3_{brazo1} = 12000 - 16000 \text{ GPH}$$

$$Rango4_{brazo1} = 16000 - 22000 \text{ GPH}$$

Rango 1:

Tabla 12 Rango de Flujo 1 Brazo 1.

# Corrida	Flujo	MF
29	4790,2	1,0130
28	4816,2	1,0129
27	4901,3	1,0131

Las cuales arrojan un meter factor promedio calculado de la forma:

$$\overline{MF}_{rango1} = 1,0130$$

Se calcula la desviación estándar de las 3 corridas de la forma:

$$s(\overline{MF}_{rango1}) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (MF_k - \overline{MF})^2}{n-1}} = 0.0001$$

Ahora, la incertidumbre seria de la forma:

$$a(\overline{MF}_{rango1}) = [T(95\%, 3)][s(\overline{MF}_{rango1})]$$

Donde

$$T(95\%, 3) = 4,303 \text{ , según la tabla 3.}$$

Por lo tanto,

$$a(\overline{MF}_{rango1}) = 0,04303\%$$

Rango 2:

Tabla 13 Rango de Flujo 2 Brazo 1.

# Corrida	Flujo	MF
-----------	-------	----

1	9736,9	1,0125
7	10462,3	1,0124
30	11068	1,0124
6	11113,5	1,0125
15	11248,6	1,0129
16	11269,2	1,0125
17	11283,9	1,0123
3	11284,2	1,0123
8	11436,6	1,0126
5	11852,1	1,0125
19	11900,1	1,0129
20	11903,1	1,0123

Las cuales arrojan un meter factor promedio calculado de la forma:

$$\overline{MF}_{rangoz} = 1,0125$$

Se calcula la desviación estándar de las 12 corridas de la forma:

$$s(\overline{MF}_{rangoz}) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (MF_k - \overline{MF})^2}{n - 1}} = 0.00021$$

Ahora, la incertidumbre seria de la forma:

$$a(\overline{MF}_{rangoz}) = [T(95\%, 12)][s(\overline{MF}_{rangoz})]$$

Donde

$$T(95\%, 12) = 2,179, \text{ según la tabla 3.}$$

Por lo tanto,

$$a(\overline{MF}_{rango2}) = 0,045\%$$

Rango 3:

Tabla 14 Rango de Flujo 3 Brazo 1.

# Corrida	Flujo	MF
13	12040,1	1,0121
14	12053,6	1,0121
11	13432,1	1,0119
22	13631	1,0122
21	13635	1,0123
23	13798	1,0120
9	14451,8	1,0123
10	15838,8	1,0122

Las cuales arrojan un meter factor promedio calculado de la forma:

$$\overline{MF}_{rango2} = 1,0121$$

Se calcula la desviación estándar de las 8 corridas de la forma:

$$s(\overline{MF}_{rango3}) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (MF_k - \overline{MF})^2}{n - 1}} = 0.00014$$

Ahora, la incertidumbre seria de la forma:

$$a(\overline{MF}_{rango3}) = [T(95\%, 8)][s(\overline{MF}_{rango3})]$$

Donde

$$T(95\%, 8) = 2,447, \text{ según la tabla 3.}$$

Por lo tanto,

$$a(\overline{MF}_{Rango3}) = 0,03445\%$$

Rango 4:

Tabla 15 Rango de Flujo 4 Brazo 1.

# Corrida	Flujo	MF
25	16239,6	1,0120
24	16911,5	1,0120

Las cuales arrojan un meter factor promedio calculado de la forma:

$$\overline{MF}_{Rango4} = 1,0120$$

Se calcula la desviación estándar de las 2 corridas de la forma:

$$s(\overline{MF}_{Rango4}) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (MF_k - \overline{MF})^2}{n - 1}} = 0.00001$$

Ahora, la incertidumbre seria de la forma:

$$a(\overline{MF}_{Rango4}) = [T(95\%, 2)][s(\overline{MF}_{Rango4})]$$

Donde:

$$T(95\%, 2) = 12,706 \text{ , según la tabla 3.}$$

Por lo tanto,

$$a(\overline{MF}_{Rango4}) = 0,01271\%$$

Resumiendo tenemos que:

Tabla 16 MF Linearizados Brazo 1.

SISTEMA DE MEDICIÓN DINÁMICA BRAZO 1 - CARGADERO		
CPF1		
Rangos de Flujo	Incertidumbre	MF
Rango 1(0-5000 GPH)	1.0130	0.04303%
Rango 2(5000-12000GPH)	1.0125	0.04500%
Rango 3(12000-16000GPH)	1.0121	0.03445%
Rango 4 (16000-inf GPH)	1.0120	0.01271%

Ahora como se puede observar, el cambio del meter factor del rango 3 con el del rango 4 es mínimo (1 diezmilésima), entonces se decide tener un único tercer rango que comprenda (12000-22000 GPH) con un MF promedio de los datos correspondientes al nuevo rango.

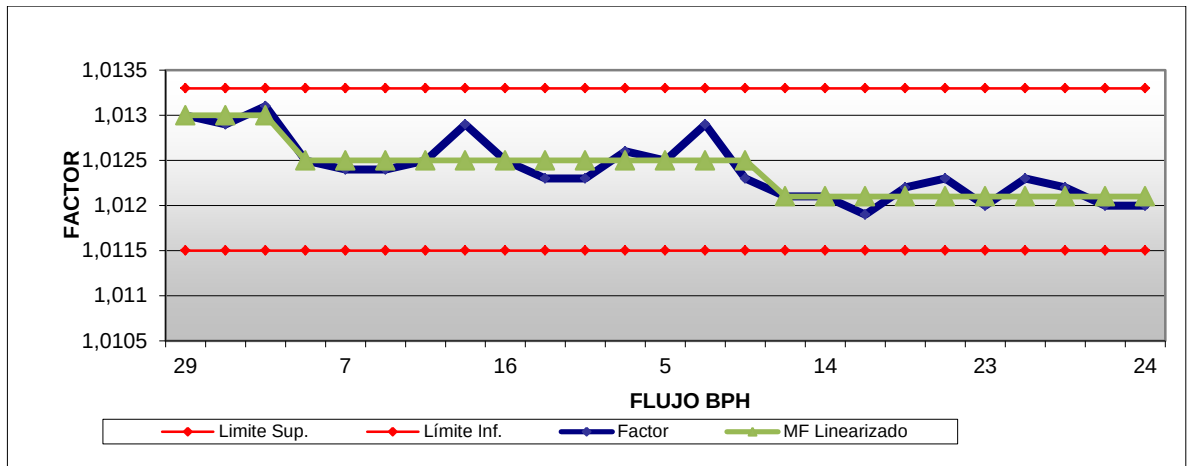
Por lo tanto, resumiendo sería de la forma:

Tabla 17 Resumen Final MF Linearizados Brazo 1.

SISTEMA DE MEDICIÓN DINÁMICA BRAZO 1 - CARGADERO		
CPF1		
Rangos de Flujo	MF	Incertidumbre
Rango 1(0-5000 GPH)	1.0130	0.04303%
Rango 2(5000-12000GPH)	1.0125	0.04500%
Rango 3(12000-22000GPH)	1.0121	0.03100%

Y su respectiva carta de control según el API MPMS CAP 13.2 :

Ilustración 3-1 Carta de Control MF Linearizados Brazo 1.



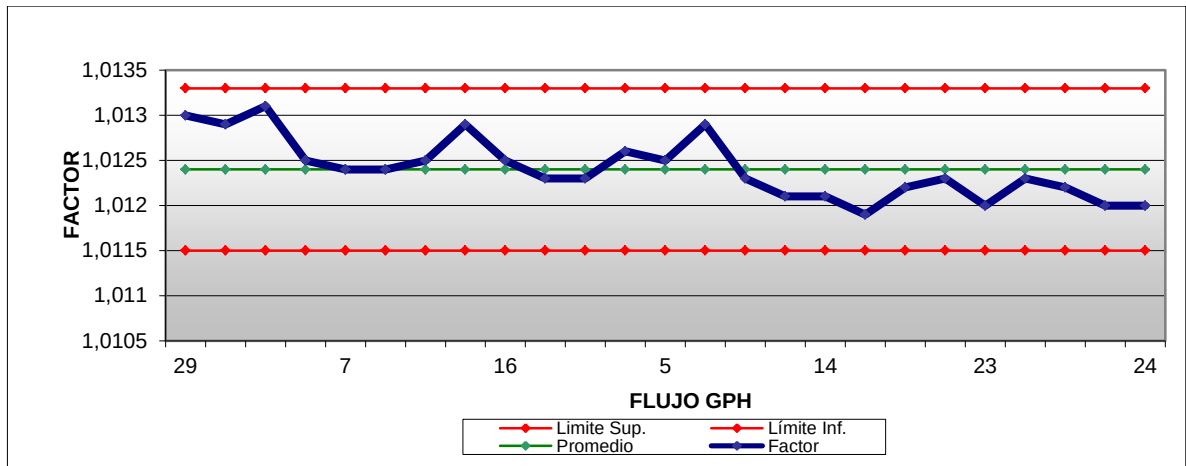
Donde se puede observar, que el MF Linearizado toma meter factor con menor dispersión en los 3 rangos de flujo antes mencionados. Para mayor información acerca de la carta de control, por favor revisar anexo “Carta de Control Brazo 1” como archivo en Excel.

Tabla 18 Resumen Meter Factor Promedio Brazo 1.

	Incertidumbre	MF
Rango Total (0-22000 GPH)	0,06946%	1,0124

Y su respectiva carta de control según el API MPMS CAP 13.2 :

Ilustración 3-2 Carta de Control MF promedio 25 corridas Brazo 1.



3.1.3 Comparación de incertidumbres de Meter Factor linearizados vs Incertidumbre de Meter Factor Promedio de las 25 corridas.

Tabla 19 Comparación Incertidumbres Linearizados Brazo 1.

SISTEMA DE MEDICIÓN DINÁMICA BRAZO 1 - CARGADERO CPF1						
	Linearizados		Sin Linearizar		Comparación	
RANGOS DE FLUJO	MF (i)	Incertidumbre (i)	MF Promedio	Incertidumbre Promedio	Diferencia MF	% Diferencia U
Rango 1	1.0130	0.04303%	1.0124	0.06946%	0.0006	-38.05%
Rango 2	1.0125	0.04500%	1.0124	0.06946%	0.0001	-35.22%
Rango 3	1.0121	0.03100%	1.0124	0.06946%	0.0003	-55.38%

Ahora, analizando las incertidumbres encontradas por la linearización del meter factor del brazo 1, se puede encontrar que la incertidumbre es significativamente menor al elegir rangos de flujo con su respectivo meter factor promedio correspondiente a todo el rango de flujo (hasta un 55.38% menor), que tomando un único meter factor para las 25 corridas de calibración. De tal forma se prueba matemáticamente siguiendo el API MPMS CAP 13 SECCIÓN 2 que el método propuesto si reduce significativamente la incertidumbre asociada al meter factor.

3.1.4 Incertidumbre Brazo 2

Teniendo en cuenta lo anterior, de las 27 corridas de calibración se escogen las 25 más cercanas entre sí para así asegurar una desviación estándar más baja. A continuación se muestran las escogidas organizadas de menor flujo a mayor:

Tabla 20 Resultados 25 Corridas de Calibración Brazo 2 con Desviación Estándar más baja.

# Corrida	Flujo (GPH)	MF
19	6143,4	1,0227
21	6160,2	1,023
20	6817,9	1,0218
23	7815,3	1,0212
22	8274	1,0201
12	9639,3	1,0185
9	10092,5	1,019
10	10095,3	1,019
14	10203,4	1,0184
2	10530	1,02
4	10762,8	1,02
11	10820,9	1,0182
13	10837,3	1,0184
15	11190,3	1,0178
16	11798,8	1,0173
18	11798,9	1,0172
17	11800,6	1,0174
8	12163,9	1,0185
5	12222,5	1,0182
1	12793	1,0182
7	13741,4	1,0179
26	21250,1	1,0156
27	21335,9	1,0153
25	21464,8	1,0156
24	21709,7	1,0155

Las cuales arrojan un meter factor promedio calculado de la forma:

$$\overline{MF}_{brazo\ 2} = \sum_{i=1}^{25} MF_i / 25 = 1,0186$$

Se calcula la desviación estándar de las 25 corridas de la forma:

$$s(\overline{MF}_{brazo\ 2}) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (MF_k - \overline{MF})^2}{n - 1}} = 0.00209$$

Ahora, la incertidumbre seria de la forma:

$$a(\overline{MF}_{brazo\ 2}) = [T(95\%, 25)][s(\overline{MF}_{brazo\ 2})]$$

Donde

$$T(95\%, 25) = 2,064 \text{ , según la tabla 3.}$$

$$s(\overline{MF}_{brazo\ 2}) = 0.003365$$

Por lo tanto, la incertidumbre del MF del brazo 2 sería:

$$a(\overline{MF}_{brazo\ 2}) = 0,06946\%$$

3.1.5 Análisis Estadístico Brazo 2

El objetivo principal del análisis estadístico es el elegir los 4 rangos de flujo principales descritos por las corridas de calibración hechas de tal forma que la desviación estándar de cada uno de los rangos sea mínima y así poder disminuir la incertidumbre asociada al MF.

Analizando minuciosamente los datos, se eligieron los siguientes rangos de flujo:

$$Rango1_{brazo1} = 0 - 9000 \text{ GPH}$$

$$Rango2_{brazo1} = 9000 - 11000 \text{ GPH}$$

$$Rango3_{brazo1} = 11000 - 14000 \text{ GPH}$$

$$Rango4_{brazo1} = 14000 - 22000 \text{ GPH}$$

Rango 1:

Tabla 21 Rango de flujo 1 Brazo 2.

# Corrida	Flujo (GPH)	MF
19	6143,4	1,0227
21	6160,2	1,023
20	6817,9	1,0218
23	7815,3	1,0212
22	8274	1,0201

Las cuales arrojan un meter factor promedio calculado de la forma:

$$\overline{MF}_{rango1} = 1,0218$$

Se calcula la desviación estándar de las 5 corridas de la forma:

$$s(\overline{MF}_{rango1}) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (MF_k - \overline{MF})^2}{n - 1}} = 0.001172$$

Ahora, la incertidumbre seria de la forma:

$$a(\overline{MF}_{rango1}) = [T(95\%, 5)][s(\overline{MF}_{rango1})]$$

Donde:

$$T(95\%, 5) = 2,77 \text{ , según la tabla 3.}$$

Por lo tanto,

$$\alpha(\overline{MF}_{rang\ 1}) = 0,32457\%$$

Rango 2:

Tabla 22 Rango de flujo 2 Brazo 2.

# Corrida	Flujo	MF
12	9639,3	1,0185
9	10092,5	1,019
10	10095,3	1,019
14	10203,4	1,0184
2	10530	1,02
4	10762,8	1,02
11	10820,9	1,0182
13	10837,3	1,0184

Las cuales arrojan un meter factor promedio calculado de la forma:

$$\overline{MF}_{rang\ 2} = 1,0189$$

Se calcula la desviación estándar de las 8 corridas de la forma:

$$s(\overline{MF}_{rang\ 2}) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (MF_k - \overline{MF})^2}{n - 1}} = 0.00715$$

Ahora, la incertidumbre seria de la forma:

$$a(\overline{MF}_{rango2}) = [T(95\%, 8)] [s(\overline{MF}_{rango2})]$$

Donde

$$T(95\%, 8) = 2,365, \text{ según la tabla 3.}$$

Por lo tanto,

$$a(\overline{MF}_{rango2}) = 0,16910\%$$

Rango 3:

Tabla 23 Rango de flujo 3 Brazo 2.

# Corrida	Flujo	MF
15	11190,3	1,0178
16	11798,8	1,0173
18	11798,9	1,0172
17	11800,6	1,0174
8	12163,9	1,0185
5	12222,5	1,0182
1	12793	1,0182
7	13741,4	1,0179

Las cuales arrojan un meter factor promedio calculado de la forma:

$$\overline{MF}_{rango3} = 1,0178$$

Se calcula la desviación estándar de las 8 corridas de la forma:

$$s(\overline{MF}_{rango3}) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (MF_k - \overline{MF})^2}{n-1}} = 0.00047$$

Ahora, la incertidumbre seria de la forma:

$$a(\overline{MF}_{rango3}) = [T(95\%, 8)][s(\overline{MF}_{rango3})]$$

Donde

$$T(95\%, 8) = 2,365, \text{ según la tabla 3.}$$

Por lo tanto,

$$a(\overline{MF}_{rango3}) = 0,11267\%$$

Rango 4:

Tabla 24 Rango de flujo 4 Brazo 2.

# Corrida	Flujo	MF
26	21250,1	1,0156
27	21335,9	1,0153
25	21464,8	1,0156
24	21709,7	1,0155

Las cuales arrojan un meter factor promedio calculado de la forma:

$$\overline{MF}_{rango4} = 1,0155$$

Se calcula la desviación estándar de las 4 corridas de la forma:

$$s(\overline{MF}_{rango4}) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (MF_k - \overline{MF})^2}{n-1}} = 0.00014$$

Ahora, la incertidumbre seria de la forma:

$$a(\overline{MF}_{rang04}) = [T(95\%, 4)] [s(\overline{MF}_{rang04})]$$

Donde

$$T(95\%, 4) = 3,182 \text{ , según la tabla 3.}$$

Por lo tanto,

$$a(\overline{MF}_{rang04}) = 0,045\%$$

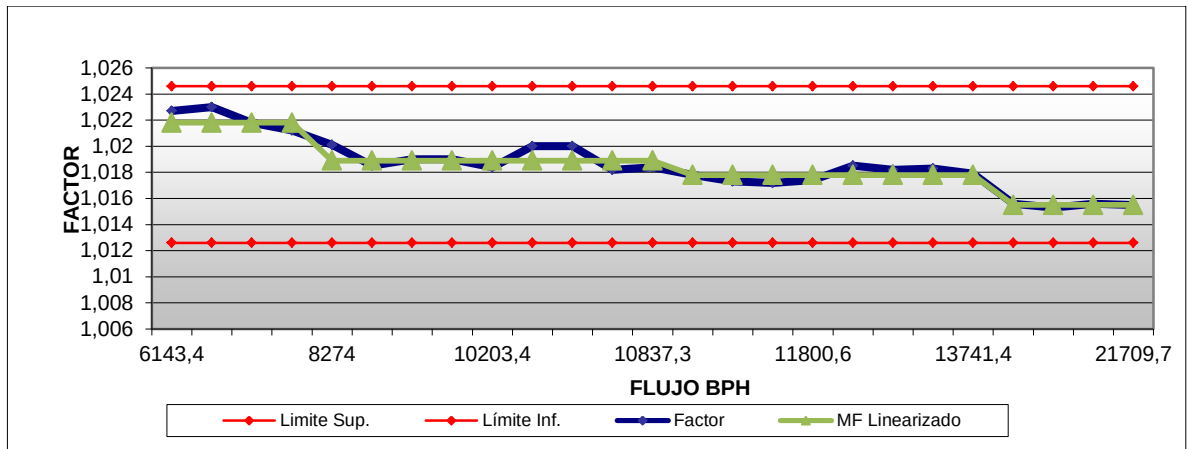
Resumiendo tenemos que:

Tabla 25 Resumen Final MF Linearizados Brazo 2.

SISTEMA DE MEDICIÓN DINÁMICA BRAZO 2 - CARGADERO CPF1		
Rangos de Flujo	MF	Incertidumbre
Rango 1 (0-9000 GPH)	1.0218	0.32457%
Rango2 (9000-11000 GPH)	1.0189	0.16910%
Rango 3 (11000-14000 GPH)	1.0178	0.13196%
Rango 4 (14000-22000 GPH)	1.0155	0.04500%

Y su respectiva carta de control según el API MPMS CAP 13.2 :

Ilustración 3-3 Carta de Control MF Linearizados Brazo 2.

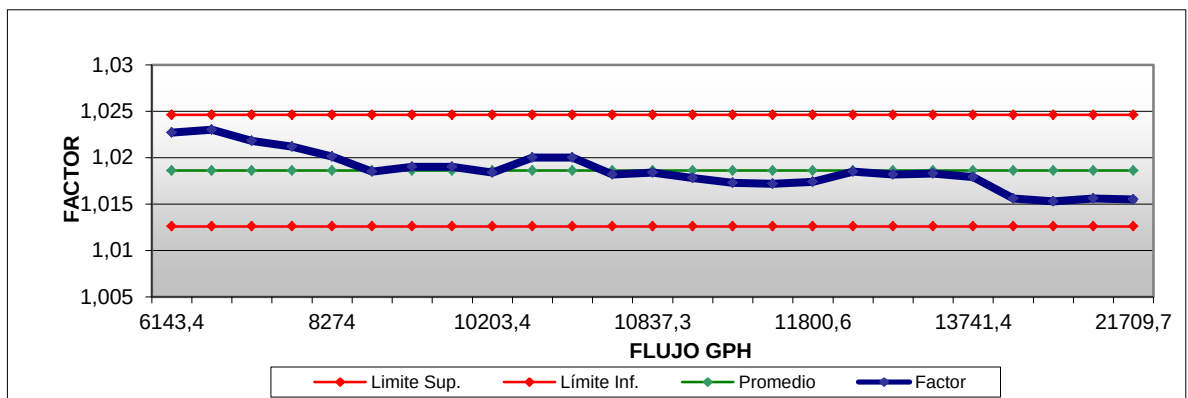


Donde se puede observar, que el MF Linearizado toma meter factor con menor dispersión en los 4 rangos de flujo antes mencionados. Para mayor información acerca de la carta de control, por favor revisar anexo “Carta de Control Brazo 2” como archivo en Excel.

Tabla 26 Resumen Meter Factor Promedio Brazo 2.

	Incertidumbre	MF
Rango Total (0-22000 GPH)	0,43163%	1,0155

Ilustración 3-4 Carta de Control MF promedio de las 25 corridas Brazo 2.



3.1.6 Comparación de incertidumbres de Meter Factor linearizados vs Incertidumbre de Meter Factor Promedio de las 25 corridas.

Tabla 27 Comparación Incertidumbres Linearizados Brazo 2.

SISTEMA DE MEDICIÓN DINÁMICA BRAZO 2 - CARGADERO CPF1						
	Linearizados		Sin Linearizar		Comparación	
RANGOS DE FLUJO	MF (i)	Incertidumbre (i)	MF Promedio	Incertidumbre Promedio	Diferencia MF	% Diferencia U
Rango 1	1.0218	0.32457%	1.0186	0.43149%	0.0032	-24.78%
Rango 2	1.0189	0.16910%	1.0186	0.43149%	0.0003	-60.81%
Rango 3	1.0178	0.13196%	1.0186	0.43149%	0.0008	-69.42%
Rango 4	1.0155	0.04500%	1.0186	0.43149%	0.0031	-89.57%

Ahora, analizando las incertidumbres encontradas por la linearización del meter factor del brazo 1, se puede encontrar que la incertidumbre es significativamente menor al elegir rangos de flujo con su respectivo meter factor promedio correspondiente a todo el rango de flujo (hasta un 89.57% menor), que tomando un único meter factor para las 25 corridas de calibración. De tal forma se prueba matemáticamente siguiendo el API MPMS CAP 13 SECCIÓN 2 que el método propuesto si reduce significativamente la incertidumbre asociada al meter factor.

3.1.7 Implementación Meter Factors En El Dan Load 6000

El computador de flujo Dan Load 6000 permite hasta 4 meter factor diferentes correspondientes a 4 rangos de flujo correspondientes. Tal como se muestra a continuación el manual del fabricante:

Tabla 28 Funciones de Configuración Dan Load 6000

PC # / Function (Four Components)	Range <Default> OR Option (* = Default)
169 Number of factors/component	1 to 4 <2>
170 Meter factor method	0 Fixed * 1 Linear
171 / 182 / 193 / 204 Nominal K-factor	0.5 to 2000.0 <23.0>
172 / 183 / 194 / 205 Master meter factor	0.5000 to 2.0000 <1.0000>
173 / 284 / 195 / 206 Stop rate	0 to 99999 <120>

Tabla 29 Parámetros de configuración de Dan Load 6000.

PC # /Function (Four Components)	Range <Default> OR Option (* = Default)
174 / 185 / 196 / 207 Flow rate 1	0 to 99999 <200>
175 / 186 / 197 / 208 Meter factor 1	per PC 215 / PC 216 <1.0000>
176 / 187 / 198 / 209 Flow rate 2	0 to 99999 <600>
177 / 188 / 199 / 210 Meter factor 2	per PC 215 / PC 216 <1.0000>
178 / 189 / 200 / 211 Flow rate 3	0 to 99999 <0>
179 / 190 / 201 / 212 Meter factor 3	per PC 215 / PC 216 <1.0000>
180 / 191 / 202 / 213 Flow rate 4	0 to 99999 <0>
181 / 192 / 203 / 214 Meter factor 4	per PC 215 / PC 216 <1.0000>
215 Master MF %	0.00 to 99.99 <2.00>
216 Adjacent MF %	0.00 to 99.99 <0.25>
217 Gross units mnemonic	6 characters <Gal>
218 Std units mnemonic	6 characters <Gal>
219 Use restart qty	0 No * 1 Yes

Cabe resaltar que según el manual del fabricante, las ratas de flujo correspondientes a cada meter factor a configurar tienen que ser en unidades por minuto, en este caso en particular en Galones por Minuto.

Entonces, teniendo en cuenta estas consideraciones los parámetros del Dan Load se configurarán de la siguiente manera:

Brazo 1

Tabla 30 Parámetros de configuración de Dan Load 6000 para Brazo 1.

BRAZO 1		
PC # Function	Parámetro	Valor
174	Flow rate 1	81
175	Meter Factor 1	1,0130
176	Flow rate 2	187
177	Meter Factor 2	1,0125
178	Flow rate 3	237
179	Meter Factor 3	1,0121

Brazo 2

Tabla 31 Parámetros de configuración de Dan Load 6000 para Brazo 2.

BRAZO 2		
PC # Function	Parámetro	Valor
174	Flow rate 1	117
175	Meter Factor 1	1,0218
176	Flow rate 2	173
177	Meter Factor 2	1,0189

178	Flow rate 3	203
179	Meter Factor 3	1,0178
180	Flow rate 4	357
181	Meter Factor 4	1,0155

3.1.8 Hallazgos Finales A Corregir

Inspeccionándose minuciosamente el sistema de impresión de tickets del cargadero, se encontró que estos no se imprimen directamente del Dan Load, sino que se toman los datos de barriles brutos medidos y temperatura, y mediante un software se re-liquida el ticket del cargue con el dato de gravedad API y BSW hallada en el laboratorio por el método de hidrómetro y Karl Fischer respectivamente.

Adicionalmente, los valores de los meter factor con los cuales se liquidan los volúmenes son tomados de una tabla del programa y no se leen directamente del Dan Load, por lo tanto, en caso tal de modificar los MF en los Dan Load, el programa seguiría liquidando con los MF de la tabla que posee. Por lo tanto la linearización sería inviable.

Por lo tanto, para la implementación de la linearización de los Meter Factor de los medidores de flujo tipo coriolis que componen los brazos de medición dinámica, es necesario hacer el cambio de los computadores de Flujo a Dan Load 8000, y así poder comunicar vía Ethernet el PC del control de cargue, y leer la información directamente, y reliquidar los tickets directamente en el computador de flujo. Esto es necesario debido a la limitación de los Dan Load 6000 en cuanto a comunicaciones.

En la evaluación financiera, se estimará el costo asociado a esta inversión, y evaluaremos si es viable o no hacerla.

4. ANÁLISIS FINANCIERO DE LA LINEARIZACIÓN DE LOS METER FACTOR PARA LOS MEDIDORES DE FLUJO TIPO CORIOLIS DE LOS BRAZOS 1 Y 2 DEL CARGADERO DE CARROTANQUES DE CPF1 CAMPO RUBIALES.

4.1 Estimación Beneficios Económicos

A continuación se planteará el beneficio económico de la linearización de los meter factor del brazo 1 y 2 del cargadero de carro tanques. Estos cálculos se hicieron con base en la siguiente información:

Tabla 32 Datos de Entrada Evaluación Financiera.

DATOS DE ENTRADA		
Carrotanques	145	ctks/día
Volumen promedio Ctk	200	Bbls
Precio de Barril de Crudo	80	USD
Volumen Total Cargadero	29,000	Bbls/día
Volumen Promedio por Brazo	2,071	Bbls/día (Cada Brazo)

En la cual el número de carrotanques es el promedio de flujo de vehículos en los últimos 6 meses en el cargadero, el número de barriles por carro-tanque es el promedio de barriles entre todos los carrotanques que son cargados (2 ejes y 3 ejes).

Ahora, la forma en que se va calcular el beneficio económico consiste básicamente en hallar la diferencia entre la incertidumbre del meter factor sin linearizar de los brazos 1 y 2, y la incertidumbre de los meter factor linearizados a los rangos de flujo detallados anteriormente. Esta diferencia se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Beneficio en } U_{\text{Rango } n} = \overline{UMF_{\text{Actual}}} - \overline{UMF_{\text{Linearizados}}} [\%]$$

Este beneficio se calculará para cada rango de flujo de linearización.

Teniendo esta diferencia, se puede proceder a calcular el promedio de barriles/día que puede manejar cada brazo en cada uno de los meter factors encontrados. Este ponderado se calcula de la siguiente forma:

$$V \text{ Brazo} = \frac{\# \text{ Carrotks} / \text{día} * \# \text{ Bbls} / \text{Carrotk}}{\# \text{ Brazos}_{\text{cargadero}}} [\text{Bbls}]$$

Ahora, para calcular el volumen promedio por rango de cada brazo sería:

$$V \text{ Rango}_{\text{Brazo } n} = \frac{V \text{ Brazo}}{\# \text{ Rangos de Brazo}_n}$$

Teniendo estos dos valores, el beneficio diario por cada rango de flujo se calcularía de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \text{Beneficio Neto}_{\text{Rango } n} \\ = (\text{Beneficio en } U_{\text{Rango } n}) * V \text{ Rango}_{\text{Brazo } n} * \$ \text{ Barril} [\text{USD}] \end{aligned}$$

En resumen, para el brazo 1 se tiene que:

Tabla 33 Cuantificación de Beneficios Económicos - Brazo1.

CUANTIFICACIÓN DE BENEFICIOS ECONÓMICOS - SISTEMA DE MEDICIÓN DINÁMICA BRAZO 1						
	MF LINEARIZADOS	MF SIN LINEARIZAR	BENEFICIO EN INCERTIDUMBRE	Volumen Promedio	Beneficio NETO	Beneficio NETO
RANGOS DE FLUJO	Incertidumbre (i)	Incertidumbre Promedio	Diferencia U (i)	Bbls	Bbls	USD
Rango 1	0.04303%	0.06946%	0.0264%	690.48	0.18	14.60
Rango 2	0.04500%	0.06946%	0.0245%	690.48	0.17	13.51
Rango 3	0.03100%	0.06946%	0.0385%	690.48	0.27	21.25

Beneficio día	\$49.36	USD/día
Beneficio Brazo 1	\$18,017.60	USD/año

En resumen, para el brazo 2 se tiene que:

Tabla 34 Cuantificación de Beneficios Económicos - Brazo2.

CUANTIFICACIÓN DE BENEFICIOS ECONÓMICOS - SISTEMA DE MEDICIÓN DINÁMICA BRAZO 2						
	MF LINEARIZADOS	MF SIN LINEARIZAR	BENEFICIO EN INCERTIDUMBRE	Volumen Promedio	Beneficio NETO	Beneficio NETO
RANGOS DE FLUJO	Incertidumbre (i)	Incertidumbre Promedio	Diferencia U (i)	Bbls	Bbls	USD
Rango 1	0.32457%	0.43149%	0.1069%	517.86	0.55	44.29
Rango 2	0.16910%	0.43149%	0.2624%	517.86	1.36	108.70
Rango 3	0.13196%	0.43149%	0.2995%	517.86	1.55	124.09
Rango 4	0.04500%	0.43149%	0.3865%	517.86	2.00	160.12

Beneficio día	\$392.91	USD/día
Beneficio Brazo 2	\$143,411.90	USD/año

Ahora, para proyectar los beneficios a los 14 brazos de medición dinámica del cargadero de carro tanques, promedio los beneficios económicos al año calculados para el brazo 1 y 2. Sobre este beneficio por brazo promedio calculo el beneficio económico total del cargadero proyectando realizar la linearización en la totalidad de los brazos:

Tabla 35 Cuantificación de Beneficios Económicos - Cargadero Carrotanques.

BENEFICIOS ECONÓMICOS PROMEDIO CARGADERO CARROTANQUES		
Beneficio Promedio Brazo	\$80,714.75	USD/AÑO
Número de Brazos	14	Brazos
Beneficio Cargadero	\$1,130,006.54	USD/AÑO

Total Ingresos por Año	\$1,130,006.54	USD/AÑO
------------------------	----------------	---------

4.2 Estimación Costos Anuales De Operación

Tabla 36 Estimación de costos Anuales de Operación - Cargadero Carro tanques.

ESTIMACIÓN EGRESOS CARGADERO CARROTANQUES			
Descripción	Frecuencia	Costo Unitario (USD)	COSTO / Año (USD)
Calibración Instrumentación.	1 vez/año	\$ 25,000	\$ 25,000
Calibración del Prover	1 vez/3 años	\$ 80,000	\$26,666.67
Mantenimiento - FC	1 vez/6 meses	\$ 50,000	\$ 100,000
Repocisión Instrumentación	1 vez/5 años	\$ 800,000	\$ 160,000
Total Egresos por año	\$ 311,667	USD/Año	

4.3 Flujos De Caja Anuales Del Proyecto

Tabla 37 Flujos de Caja Anuales del Proyecto

Flujos de Caja Anuales	\$ 818,340	USD/Año
-------------------------------	-------------------	----------------

4.4 Estimación De La Inversión

Tabla 38 Estimación de la Inversión.

ESTIMACIÓN DE INVERSIÓN			
Descripción	Costo Unitario (USD)	Cantidad	Costo Global USD
Compra FC Dan Load 8000	\$ 13,000	14	\$ 182,000
Costos de Instalación	\$ 1,000	14	\$ 14,000
Costos de Configuración y Puesta en Marcha	\$ 3,000	14	\$ 42,000
Total Inversión	\$ 238,000	USD	

4.5 Evaluación Financiera

La tasa de descuento utilizada es la de Pacific Rubiales Energy y Ecopetrol, actuales socios del Campo Rubiales. Se realiza a 5 años, pues campo rubiales revierte a Ecopetrol en el 2016, entonces sería el tiempo de inversión de interés para los dos socios.

Realizando la evaluación financiera por el método de TIR y VPN, se tienen los siguientes resultados con base en la estimación de la inversión inicial, y los flujos de caja anuales calculados anteriormente:

Tabla 39 Evaluación financiera del Proyecto.

Tasa de descuento	12%
-------------------	-----

Período AÑOS	Flujos de Caja USD
0	-\$ 238,000
1	\$ 818,340
2	\$ 818,340
3	\$ 818,340
4	\$ 818,340
5	\$ 818,340

TIR	343.64%
VPN	\$ 2,711,932.10

Tal como se puede observar, la TIR del proyecto es de 343.64% la cual es mayor a la tasa de Oportunidad de Pacific Rubiales Energy y Ecopetrol S.A. Y el VPN es de \$2,711, 932.10 USD que es mucho mayor a Cero. Por lo tanto se puede concluir que el proyecto es muy atractivo para los socios inversionistas.

5. CONCLUSIONES

- A través de la aplicación de la metodología propuesta de linearización de los meter factor de los medidores de flujo del cargadero de carrotanques, se pudo demostrar técnicamente que se reduce la incertidumbre considerablemente, generando así beneficios económicos asociados.
- Evaluando financieramente el proyecto, bajo escenarios conservadores, se pudo demostrar que el proyecto es totalmente viable financieramente, y agrega valor en el orden de 2,711,932.10 USD (VPN).
- Con base en esta evaluación técnico-económica, Pacific Rubiales Energy junto con su socio Ecopetrol S.A deciden realizar la inversión de la actualización de los computadores de flujo para todo el cargadero de carrotanques del CPF1 en el año 2013, reduciendo así la incertidumbre asociada a la medición de flujo, reduciendo así las diferencias volumétricas por debajo del 0.3% en toda la cadena de transferencia de custodia.

BIBLIOGRAFIA

- API MPMS CAP 1, VOCABULARIO, SEGUNDA EDICIÓN, JULIO DE 1994.
- API MPMS CAP 4.2 PROVING SYSTEMS, DISPLACEMENT PROVERS, TERCERA EDICIÓN, MARCH 2011.
- API MPMS CAP 4.8 PROVING SYSTEMS, OPERATION OF PROVING SYSTEMS, PRIMERA EDICIÓN, MARCH 2007.
- API MPMS CAP 5.6 METERING, MEASUREMENT OF LIQUID HYDROCARBOS BY CORIOLIS METERS. PRIMERA EDICIÓN, OCTOBER 2002
- API MPMS CAP 6.2 METERING ASSEMBLIES, LOADING RACK METERING SYSTEMS. TERCERA EDICIÓN, FEBRUARY 2004.
- API MPMS CAP 7 TEMPERATURE DETERMINATION. PRIMERA EDICIÓN, JUNE 2001.
- API MPMS CAP 11 PHYSICAL PROPERTIES DATA MAY 2004
- API MPMS CAP 11.1 TEMPERATURE AND PRESSURE VOLUME CORRECTION FACTORS FOR GENERALIZED CRUDE OILS, REFINED PRODUCTS, AND LUBRICATING OILS MAY 2004
- API MPMS CAP 12 CALCULATION OF PETROLEUM QUANTITIES AUGUST 2007.
- API MPMS CAP 12.2.1 CALCULATION OF PETROLEUM QUANTITIES USING DYNAMIC MEASUREMENT METHODS AND VOLUMETRIC CORRECTION FACTORS, MARCH 2002
- API MPMS CAP 13.1 STATISTICAL CONCEPTS AND PROCEDURES IN MEASUREMENTS. FEBRUARY 2011
- API MPMS CAP 13.2 METHODS OF EVALUATING METER PROVING DATA FEBRUARY 2011
- API MPMS CAP 21.2 FLOW MEASUREMENT USING ELECTRONIC METERING SYSTEMS. PRIMERA EDICIÓN, JUNE 1998.

- API MPMS CAP 22.1 TESTING PROTOCOLS GENERAL GUIDELINES FOR DEVELOPING TESTING PROTOCOLS FOR DEVICES USED IN THE MEASUREMENT OF HYDROCARBON FLUIDS NOVEMBER 2006
- MANUAL DE MEDICIÓN DE HIDROCARBUROS ECOPETROL S.A. CAPÍTULO 5 MEDICIÓN DINÁMICA, VERSIÓN 1 DEL 15/01/2008.