

PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN DEL
SISTEMA DE GASODUCTOS GIBRALTAR-BUCARAMANGA Y
BARRANCABERMEJA-PAYOA-BUCARAMANGA DE PROMIORIENTE
UTILIZANDO EL SOFTWARE WINFLOW-WINTRAN.

ANDRES ALBERTO LEON CHACON

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERIA DEL GAS
BUCARAMANGA

2015

PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN DEL
SISTEMA DE GASODUCTOS GIBRALTAR-BUCARAMANGA Y
BARRANCABERMEJA-PAYOA-BUCARAMANGA DE PROMIORIENTE
UTILIZANDO EL SOFTWARE WINFLOW-WINTRAN.

ANDRES ALBERTO LEON CHACON

Trabajo de Grado para optar el título de
Especialista en Ingeniería del Gas

Director

FAUSTINO CAMARGO SARMIENTO

Ingeniero de Petróleos

Especialista en Ingeniería del Gas Natural

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERIA DEL GAS
BUCARAMANGA

2015

A mi esposa por su comprensión y apoyo durante la realización de esta especialización.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la empresa Promioriente, especialmente a la Ingeniera Isabel Cristina Gálvez por brindarme el tiempo necesario para la realización de esta especialización y por permitirme el uso de información propia de la compañía para el desarrollo de esta Monografía.

CONTENIDO

	Pag
INTRODUCCIÓN	16
1. PRINCIPIOS QUE RIGEN LA DINÁMICA DE FLUJO EN TUBERÍAS A PRESIÓN.....	23
1.1 LA ECUACIÓN DE BERNOULLI. FUNDAMENTO DE LAS ECUACIONES DE FLUJO	23
1.1.1 Principio de Conservación de Masa.....	24
1.1.2 Segunda Ley de Newton.....	25
1.2 PÉRDIDA DE ENERGÍA O CABEZA DEBIDO A LA FRICCIÓN DEL FLUIDO.....	28
1.3 FACTOR DE FRICCIÓN.....	30
1.4 ECUACIÓN GENERAL DE FLUJO.....	37
1.4.1 Factor de Transmisión.....	40
1.4.2 Ecuaciones que no dependen del factor de fricción o de transmisión.....	42
1.4.3 Ecuaciones que dependen del factor de fricción o de transmisión.....	42
1.4.4 La Ecuación con el mejor ajuste.	53
1.5 FACTOR DE EFICIENCIA	59
1.6 SENSIBILIDAD DE LOS RESULTADOS.....	61
2. PARAMETROS O VARIABLES CRÍTICAS PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN EN WINFLOW-WINTRAN	64
2.1 PARÁMETROS O VARIABLES A TENER EN CUENTA AL MOMENTO DE DEFINIR LAS CARACTERÍSTICAS Y LAS CONDICIONES DE UN MODELO DE SIMULACIÓN.....	64
2.1.1 Parámetros Geométricos o de la Tubería.	65
2.1.2 Parámetros de las Características del Gas.....	72
2.1.3 Parámetros de Operación del sistema.	81
3. REVISIÓN DE LOS VALORES DE LOS PARAMETROS O VARIABLES REQUERIDAS PARA EL MODELO.....	87

3.1	VERIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS O PROPIOS DE LA TUBERÍA.....	87
3.1.1	Diámetro Interno.....	87
3.1.2	Longitud.	90
3.1.3	Rugosidad.....	91
3.2	VERIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL GAS.....	93
3.2.1	Gravedad Específica.....	93
3.2.2	Compresibilidad.....	96
3.3	VERIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DEL SISTEMA DE TRANSPORTE.....	103
3.3.1	Caudales de salida y entrada.....	103
3.3.2	Temperatura.....	105
3.3.3	Presión de Operación:.....	115
3.3.4	Cambios en la elevación.	118
3.3.5	Condiciones Base.	119
3.3.6	Presión Barométrica.....	120
4.	CALIBRACIÓN Y AJUSTE DEL MODELO NUEVO DE SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DE PROMIORIENTE	121
4.1	RECONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN	121
4.2	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN LUEGO DE AJUSTADO EL MODELO	133
5.	ALTERNATIVAS DE OPTIMIZACIÓN Y AUMENTO DE CAPACIDAD DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DE PROMIORIENTE	150
5.1	CONDICIONES DE SIMULACIÓN	150
5.2	DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD MÁXIMA ACTUAL DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DE PROMIORIENTE	151
5.3	ALTERNATIVAS DE AUMENTO DE CAPACIDAD DE TRANSPORTE DEL SISTEMA DE PROMIORIENTE.....	153
5.3.1	Construcción de un Loop de 8 pulgadas de diámetro en el tramo entre Payoa y Barrancabermeja.	153
5.3.2	Construcción de una estación compresora en Bucaramanga.	154

5.3.3	Construcción de un Loop de 8 pulgadas de diámetro en el tramo entre Payoa y Barrancabermeja y construcción de una estación compresora en Bucaramanga.....	155
5.3.4	Resumen de la capacidad máxima de transporte del sistema actual y de los escenarios de aumento de capacidad de transporte.....	155
6.	CONCLUSIONES.....	157
7.	RECOMENDACIONES	160
	BIBLIOGRAFIA.....	162

LISTA DE TABLAS

	pag
Tabla 1. Valores de Rugosidad Efectiva. Finch J. C. y Ko D. W.....	31
Tabla 2. Valores Típicos de Rugosidad Efectiva en la Industria.	32
Tabla 3. Ecuaciones de Flujo y su Factor de Transmisión.....	41
Tabla 4. Ecuaciones de Flujo y su Aplicabilidad	56
Tabla 5. Parámetros Geométricos o de la Tubería	66
Tabla 6. Parámetros de las Características del Gas.....	73
Tabla 7. Parámetros Operacionales	82
Tabla 8. Distribución de Espesores de Tubería GGB 12"	88
Tabla 9. Distribución de Espesores de Tubería GBP 8"	89
Tabla 10. Distribución de Espesores de Tubería GPB 8"	89
Tabla 11. Distribución de Espesores de Tubería GPB 6"	90
Tabla 12. Longitud de Tubería	90
Tabla 13. Tabulación Histograma Registros de Gravedad Específica	95
Tabla 14. Registros CO2 de junio de 2014	98
Tabla 15. Registros N2 de junio de 2014.....	100
Tabla 16. Puntos de Entrada y Salida del Nuevo Modelo.....	103
Tabla 17. Comparación Temperatura Galán vs COGB y E. Uno vs Payoa	107
Tabla 18. Registros de Temperatura del mes de Junio de 2014.....	111
Tabla 19. Variación de Temperatura Máxima durante un día de Gas de Junio de 2014.....	114
Tabla 20. Variación de Temperatura Máxima durante el mes de Junio de 2014 .	114
Tabla 21. Resumen Revisión Datos de Presión.....	117
Tabla 22. Resumen Características Segmentos Modelo Nuevo (Parte I).....	122
Tabla 23. Resumen Características Segmentos Modelo Nuevo (Parte II).....	123
Tabla 24. Resumen Características Segmentos Modelo Nuevo (Parte III)	124
Tabla 25. Resumen Características Segmentos Modelo Nuevo (Parte IV)	125
Tabla 26. Resumen Características Segmentos Modelo Nuevo (Parte V)	126
Tabla 27. Resumen Características Segmentos Modelo Nuevo (Parte VI)	127
Tabla 28. Resumen Características Segmentos Modelo Nuevo (Parte VII)	128
Tabla 29. Resumen Capacidad Máxima Actual y Escenarios Aumento de Capacidad de Transporte	156

LISTA DE FIGURAS

	pag
Figura 1. Plano de Ubicación General del Sistema de Transporte de Promioriente.....	17
Figura 2. Plano de Ubicación Gasoducto Gibraltar-Bucaramanga.....	18
Figura 3. Plano de Ubicación Gasoducto Barrancabermeja-Payoa-Bucaramanga.....	19
Figura 4. Estructura Típica de un Software de Simulación de Flujo.....	20
Figura 5. Esquema Principio Conservación de Masa	24
Figura 6. Esquema de las fuerzas sobres una partícula de fluido.....	25
Figura 7. Diagrama de Moody	36
Figura 8. Grafico Factor de Arrastre vs Índice de Curva del Ducto.....	49
Figura 9. Gráfico Numero de Reynolds Crítico vs Rugosidad Tubería	52
Figura 10. Relación entre el Factor de Transmisión y el Número de Reynolds	54
Figura 11. Rugosidad Relativa vs Eficiencia Equivalente de la Tubería	61
Figura 12. Sensibilidad de la Caída de Presión al Cambio en el Flujo.....	63
Figura 13. Perfil de Elevación Sistema de Transporte de Promioriente.....	92
Figura 14. Histograma Registros de Gravedad Específica	94
Figura 15. Resultados modelo sin tener en cuenta los gases contaminantes.....	97
Figura 16. Resultados modelo teniendo en cuenta los gases contaminantes.....	97
Figura 24. Esquema General Modelo de Simulación.....	129
Figura 25. Detalle I Modelo de Simulación	129
Figura 26. Detalle II Modelo de Simulación	130
Figura 27. Detalle III Modelo de Simulación	131
Figura 28. Detalle IV Modelo de Simulación	132
Figura 29. Gráfico Comparativo Presiones Válvula La Virgen	134
Figura 30. Gráfico Comparativo Presiones Válvula Labateca.....	135
Figura 31. Gráfico Comparativo Presiones Válvula Chitagá	136
Figura 32. Gráfico Comparativo Presiones Válvula Berlín	137
Figura 33. Gráfico Comparativo Presiones Válvula Cristales	138
Figura 34. Gráfico Comparativo Presiones Válvula Granadillo	139
Figura 35. Gráfico Comparativo Presiones Válvula La Hormiga.....	140
Figura 36. Gráfico Comparativo Presiones Estación Palenque	141

Figura 37. Gráfico Comparativo Presiones Válvula Aeropuerto.....	142
Figura 38. Gráfico Comparativo Presiones Válvula Líbano	143
Figura 39. Gráfico Comparativo Presiones Válvula Centenario	144
Figura 40. Gráfico Comparativo Presiones Estación Uno	145
Figura 41. Gráfico Comparativo Presiones Válvula El Rodeo.....	146
Figura 42. Gráfico Comparativo Presiones Estación Galán.....	147
Figura 43. Gráfico Comparativo Volúmenes Estación Gibraltar.....	149

GLOSARIO

FACTOR DE ARRASTRE: es el parámetro de resistencia al flujo equivalente a la rugosidad efectiva en flujo parcialmente turbulento.

FLUIDO COMPRESIBLE: es aquel cuya densidad varía significativamente ante un cambio de presión.

FLUJO ESTABLE: es aquel en el cual condiciones como Presión, Temperatura, Caudal o velocidad no varían en el tiempo en un punto determinado.

FLUJO INESTABLE: es aquel en el cual las condiciones como Presión, Temperatura, Caudal o velocidad varían en el tiempo en un punto determinado.

FLUJO NO UNIFORME: es a en el cual la velocidad no se mantiene constante con relación a la distancia en cualquier instante de tiempo.

FLUJO TRANSIENTE: es aquel que cambia de un estado estable a otro.

FLUJO UNIFORME: es aquel en el cual la velocidad se mantiene constante con relación a la distancia en cualquier instante de tiempo.

MPCDS: Unidad de Medida de volumen de gas que significa “Millones de Pies Cúbicos Día Estándar”

NUMERO DE REYNOLDS CRÍTICO: entre 2000 y 4000

RUGOSIDAD ABSOLUTA: rugosidad interna de la pared de la tubería.

RUGOSIDAD EFECTIVA: parámetro que refleja el efecto compuesto de la rugosidad interna de la pared de la tubería y la rugosidad inducida por resistencia al flujo de accesorios como codos, curvas, soldaduras, material particulado, etc.

RUGOSIDAD RELATIVA: es la relación entre la rugosidad Absoluta o la rugosidad Efectiva y el diámetro interno de la tubería

RESUMEN

TITULO: PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE GASODUCTOS GIBRALTAR-BUCARAMANGA Y BARRANCABERMEJA-PAYOA-BUCARAMANGA DE PROMIORIENTE UTILIZANDO EL SOFTWARE WINFLOW-WINTRAN.*

AUTOR: ANDRES ALBERTO LEON CHACON **

PALABRAS CLAVES: GASODUCTO, ECUACIÓN DE FLUJO, SIMULACION, MODELO.

DESCRIPCIÓN :

Quizá la incógnita más importante e indispensable de resolver para cualquier operador de un sistema de transporte de fluidos por tuberías, es el comportamiento real del fluido al interior de dicha tubería, es decir el entendimiento absoluto de la interacción entre las propiedades del fluido, las características del sistema de transporte y la calidad del fluido transportado, correlacionados de tal manera que sea posible el modelamiento del comportamiento y la determinación de la capacidad del sistema de transporte bajo diferentes condiciones, permitiendo la toma de decisiones acertadas y en el momento justo, para lograr la mayor rentabilidad del negocio, manteniendo la confiabilidad y la integridad del sistema de transporte. Esta necesidad se hace aún más profunda para los operadores de sistemas de transporte de fluidos compresibles, ya que por su naturaleza, presentan un desafío mayor para la predicción de su comportamiento.

El objetivo de este trabajo es el definir la ecuación de flujo que mejor representa las condiciones del gasoducto Gibraltar-Bucaramanga y Barrancabermeja-Payoa-Bucaramanga propiedad de Promioriente y ajustar el modelo de simulación que actualmente utiliza Promioriente de tal manera que se establezca con certeza la capacidad máxima de transporte del sistema bajo la metodología CREG y definir alternativas para el aumento de la capacidad de transporte de la manera más eficiente posible.

Para desarrollar este trabajo de grado se utilizó el Software Winflow-Wintran, el cual fue suministrado por Promioriente, y se usó información histórica de la compañía para realizar comparaciones directas entre los resultados del modelo y los datos reales del sistema de transporte con el fin de alcanzar el mejor ajuste posible para el modelo de simulación.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Petróleos. Especialización en Ingeniería del Gas.
Director: Faustino Camargo, Ingeniero de Petróleos.

ABSTRACT

TITLE: OPTIMIZATION PROPOSAL FOR THE SIMULATION MODEL OF GIBRALTAR-BUCARAMANGA GAS PIPELINE AND BARRANCABERMEJA-PAYOA-BUCARAMANGA GAS PIPELINE, BOTH OF THEM PROPERTY OF PROMIORIENTE, USING WINFLOW-WINTRAN SOFTWARE. *

AUTHOR: ANDRES ALBERTO LEON CHACON **

KEY WORDS: GAS PIPELINE, FLOW EQUATION, SIMULATION, MODEL.

DESCRIPTION :

Perhaps the most important and indispensable unknown to solve for any operator of a system of fluid transportation pipeline, is the actual behavior of the fluid into the pipe, the complete understanding of the interaction between the fluid properties, characteristics transportation system and the quality of the fluid transported, correlated in a way so that would be possible the modeling of behavior and determining the capacity of the transport system under different conditions, allowing making the right decisions at the right time, to achieve greater profitability, maintaining the reliability and integrity of the transport system. This need becomes even more important for compressible fluids transport systems operators, since by their nature, present a greater challenge to predict their behavior.

The objective of this work is to define the flow equation that best represents the conditions of the pipeline Gibraltar-Bucaramanga and Barrancabermeja-Payoa Bucaramanga, Property of Promioriente, and adjust the simulation model currently used by Promioriente such a manner that, by the use of the CREG methodology, it is established with certainty the maximum transport capacity of the system, and it is defined alternatives for increasing the transport capacity in the most efficient way.

The Winflow-Wintran Software, which was supplied by Promioriente, was used to develop this paper grade, also historical information was used to make direct comparisons between model results and actual data of the transport system in order to achieve the best possible fit in the simulation model.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Petróleos. Especialización en Ingeniería del Gas.
Director: Faustino Camargo, Ingeniero de Petróleos.

INTRODUCCIÓN

El gas natural es un recurso natural no renovable que consiste en una mezcla de hidrocarburos livianos, especialmente metano, etano y propano, además puede tener otros compuestos contaminantes como dióxido de carbono, agua, ácido sulfhídrico, helio y nitrógeno.

Dentro de la cadena productiva del gas natural en Colombia se encuentra el Productor, el Comercializador, el Transportador, el distribuidor y finalmente el Usuario.

Transoriente nació en 1994 como la empresa transportadora de gas del oriente colombiano y a partir de enero de 2014 pasó a llamarse Promioriente.

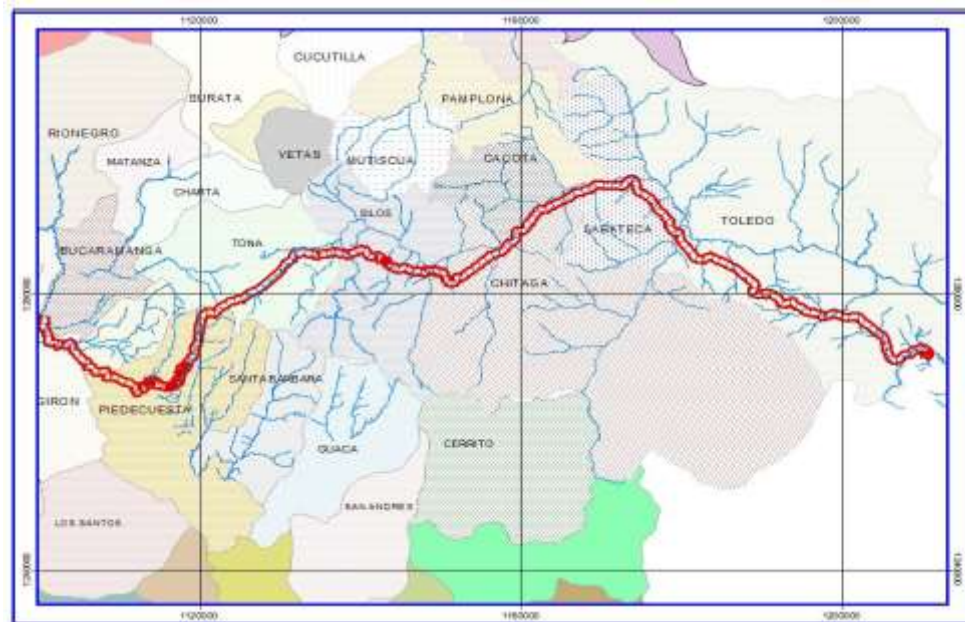
El sistema de transporte de gas natural propiedad de Promioriente está conformado por el Gasoducto Gibraltar-Bucaramanga y el Gasoducto Barrancabermeja-Payoa-Bucaramanga el cual incluye el loop Payoa-Bucaramanga.

El gas Natural proveniente del campo Gibraltar atiende la demanda de los mercados domiciliario, industrial y Gas Natural Vehicular Comprimido en los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón, Piedecuesta, Lebrija entre otros, así mismo atiende una porcentaje importante de la demanda de gas de la Refinería de Ecopetrol en la ciudad de Barrancabermeja y en esa misma ciudad entrega gas al sistema nacional de transporte para ser conducido hasta el centro del país.

A continuación se presenta un plano general de la Ubicación del sistema de Transporte de Promioriente.

A continuación se presenta el plano de ubicación general del Gasoducto Gibraltar-Bucaramanga.

Figura 2. Plano de Ubicación Gasoducto Gibraltar-Bucaramanga.



Fuente: Promioriente

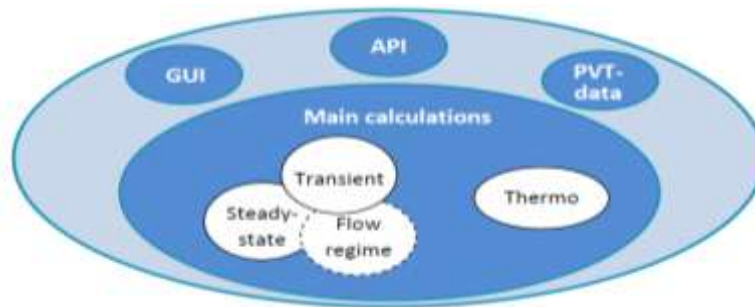
El gasoducto Barrancabermeja-Payoa-Bucaramanga de 8 pulgadas de diámetro y 108.150 kilómetros de Longitud y el loop Payoa-Bucaramanga de 6 pulgadas de diámetro y 49.5 kilómetros de longitud transportan en promedio Veintiséis (26) Millones de Pies Cúbicos estándar al día de gas natural desde la City Gate El Palenque en la ciudad de Bucaramanga.

A lo largo de su recorrido el diámetro interno y por lo tanto la capacidad de transporte de gas varía en cada uno de los tramos dependiendo del espesor de tubería encontrado, la línea presenta espesores que van desde 0.188 pulgadas (4.78 milímetros) hasta 0.5 pulgadas (12.7 milímetros).

El gasoducto cuenta con válvulas de seccionamiento distribuidas de acuerdo a los requerimientos de la normatividad vigente. Estas válvulas permiten tener un

Interface de uso gráfico (GUI Graphical User Interface), debe incluir una interface para inclusión y cálculo de propiedades físicas y químicas del fluido (PVT-data), debe contener una interface de programación (API Application Programming Interface) y un módulo computacional.³

Figura 4. Estructura Típica de un Software de Simulación de Flujo.



Fuente: Pipe Flow 1 Single-Phase Flow Assurance-2009 de OVE BRATLAND.

Dentro de los parámetros que afectan el análisis de las condiciones de flujo que realiza el Software Winflow-Wintran se encuentran: El diámetro, el espesor de pared, la rugosidad, la longitud, la gravedad específica, la compresibilidad, la viscosidad, los factores de transferencia de calor, la temperatura del suelo, la conductividad térmica del suelo, aislamiento tubería, cambios en la elevación, temperatura de operación entre otros. Todos estos parámetros o variables afectan los resultados de la simulación en mayor o menor grado y por lo tanto algunos de estos son más críticos para la obtención de un modelo óptimo que refleje el comportamiento real del sistema de transporte.⁴

Uno de los parámetros más importantes que debe ser definido en el modelo de simulación es la ecuación de flujo. Dentro de las opciones de ecuaciones que ofrecen el Software Winflow-Wintran las más utilizadas son: Smooth-Pipe Law, Rough-Pipe Law, Weymouth, Panhandle A, Panhandle B, Colebrook-White, AGA y AGA Fully Turbulent. Cada una de estas ecuaciones se basa en la Ecuación

³ BRATLAND O. Pipe Flow 1, Single-Phase Flow Assurance. 2009

⁴ GREGG ENGINEERING. GEI 2011 Training – Modeling Equations. Febrero 2011

General de Flujo derivada de la ecuación de Bernoulli. La única diferencia entre estas ecuaciones es la forma como se determina el Factor de Transmisión, el cual depende del factor de fricción, del número de Reynolds, del diámetro de la tubería o de una combinación de estos parámetros. La determinación de la ecuación a utilizar depende del régimen de flujo y de otras características del sistema simulado.⁵

Es importante entender el comportamiento que describe la ecuación fundamental, la ecuación de estado y el factor de fricción, así como también es importante conocer y entender las ecuaciones prácticas, su alcance y eficiencia para simular sistemas de transporte de gas.⁶

Cuando se habla de flujo de gas y en general de flujo de fluidos compresibles a través de tuberías, inmediatamente se relaciona con un flujo no estable o flujo Transiente debido a que el comportamiento de la presión y el flujo másico varían en función del tiempo y de la distancia.

Es importante resaltar que, en una tubería que transporta un fluido compresible y más exactamente un gas, el comportamiento del flujo y la presión estarán regulados por la demanda de gas en los puntos de salida del ducto y por la presión de entrega en los puntos de entrada del ducto. Esta es la razón por la cual se explica la dinámica constante de empaquetado y vaciado que sufren este tipo de ductos, en donde la presión en la tubería se reduce a mayor consumo o demanda y por el contrario la presión en la tubería se aumenta a menor consumo o demanda de gas.

Estas condiciones de flujo Transiente en las tuberías de gas (Gasoductos), sumado a la variabilidad que presentan casi la totalidad de los puntos de entrega

⁵ GREGG ENGINEERING. GEI 2011 Winflow Training User Manual. Febrero 2011

⁶ Schroeder D.W. A Tutorial on Pipe Flow Equations Pipeline Simulation Interest Group Annual Meeting. Bonita Springs, Florida (Mayo 11-14 2010)

de gas de un sistema de transporte, hacen difícil el control detallado del comportamiento de la presión y la velocidad del gas en la tubería. Es ahí donde cobra gran importancia el contar con un modelo de simulación preciso que utilice la ecuación de flujo adecuada y que permita al operador conocer y predecir las variables más importantes que determinan el comportamiento de los gasoductos.

1. PRINCIPIOS QUE RIGEN LA DINÁMICA DE FLUJO EN TUBERÍAS A PRESIÓN

Quizá la incógnita más importante e indispensable de resolver para cualquier operador de un sistema de transporte de fluidos por tuberías, es el comportamiento real del fluido al interior de dicha tubería, es decir el entendimiento absoluto de la interacción entre las propiedades del fluido, las características del sistema de transporte y la calidad del fluido transportado, correlacionados de tal manera que sea posible el modelamiento del comportamiento y la determinación de la capacidad del sistema de transporte bajo diferentes condiciones, permitiendo la toma de decisiones acertadas y en el momento justo, para lograr la mayor rentabilidad del negocio manteniendo la confiabilidad y la integridad del sistema de transporte.

Esta necesidad se hace aún más profunda para los operadores de sistemas de transporte de fluidos compresibles, ya que por su naturaleza, presentan un desafío mayor para la predicción de su comportamiento.

1.1 LA ECUACIÓN DE BERNOULLI. FUNDAMENTO DE LAS ECUACIONES DE FLUJO⁷

Entender y aplicar dos principios básicos permiten realizar la derivación de la Ecuación general de flujo, que toma forma de la ecuación de Bernoulli, la cual puede ser desarrollada a partir del principio de conservación de Masa y de la Segunda Ley de Newton.

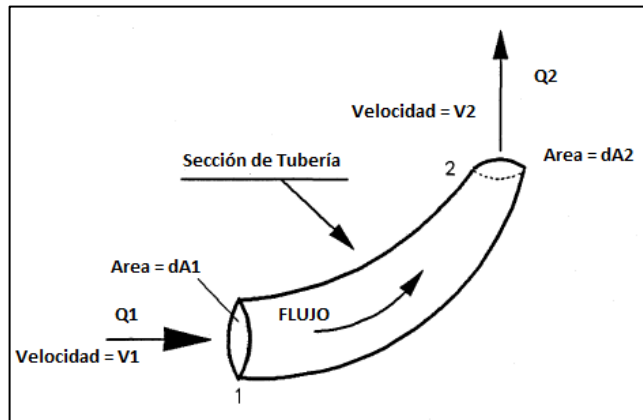
⁷ Finch J. C. y Ko D. W. Fluid Flow Formulas. Pipeline Simulation Interest Group Annual Meeting. Toronto, Ontario, Canada (Octubre 20-21-1988).

1.1.1 Principio de Conservación de Masa.

Este principio establece que el flujo de masa en cualquier punto de un sistema debe ser constante. El principio provee la continuidad del flujo.

Considere la siguiente figura:

Figura 5. Esquema Principio Conservación de Masa



En la Figura 5. Esquema Principio Conservación de Masa, el flujo va desde el punto 1 y hacia el punto 2 en condiciones de flujo permanente (Steady). La velocidad en el punto 1 y el punto 2 son normales a las áreas de corte transversal de cada uno de los puntos.

La masa por unidad de tiempo a través de la sección 1 es:

$$dM_1 = \rho_1 v_1 dA_1$$

EC 1

La masa por unidad de tiempo a través de la sección 2 es:

$$dM_2 = \rho_2 v_2 dA_2$$

EC 2

Teniendo en cuenta que el flujo es permanente, la cantidad de masa por unidad de tiempo a través de las secciones de la tubería no varía y por lo tanto:

$$\rho_1 v_1 dA = \rho_2 v_2 dA_2 = \text{Constante}$$

EC 3

Teniendo en cuenta un sistema de flujo cualquiera de área definida, se puede expresar la ecuación de la siguiente manera.

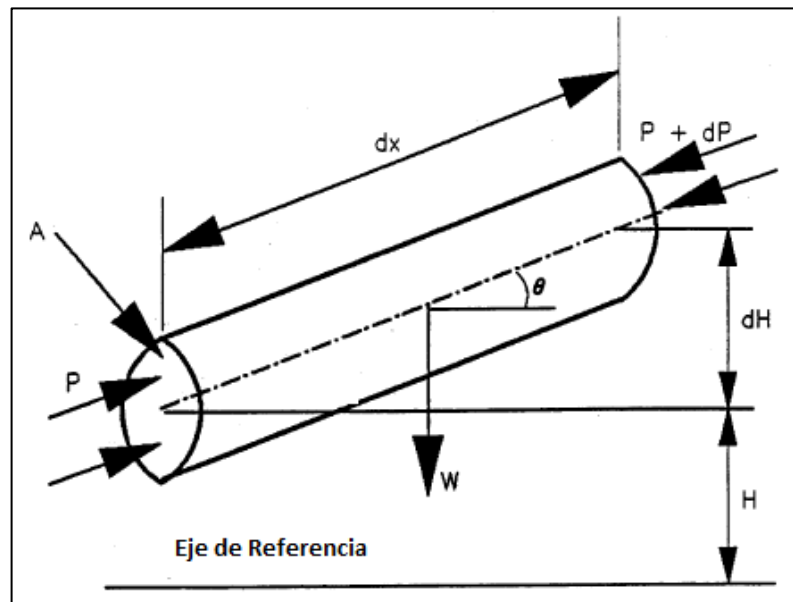
$$M = \rho_1 v_1 A = \rho_2 v_2 A_2 \text{ Ecuación de Continuidad}$$

EC 4

1.1.2 Segunda Ley de Newton.

La relación entre la velocidad y la presión en un sistema de flujo permanente debe ser estudiada utilizando la segunda ley de Newton. Esta ley establece que, dada una partícula de fluido, la fuerza actuando sobre esa partícula es igual a la masa de la partícula multiplicada por la aceleración de la partícula. Considere la partícula de la siguiente figura la cual es parte de una pequeña sección de tubería.

Figura 6. Esquema de las fuerzas sobre una partícula de fluido



La partícula tiene una sección transversal **A**, longitud **dx**, velocidad **v** y aceleración **a**. Las fuerzas externas actuando sobre la partícula son debidas al peso **W** de la partícula y la presión **P** del fluido.

Considerando que no hay fricción y que las únicas fuerzas a ser tenidas en cuenta están en la misma dirección del movimiento de la partícula:

$$\text{La fuerza resultante debida a la presión es: } PA - (P + dP)A = -dPA \quad \text{EC 5}$$

$$\text{El peso W de la partícula es: } W = A \times dx \times \rho \times g \quad \text{EC 6}$$

La componente de la gravedad en la dirección del movimiento es:

$$-W \text{Sen} \theta = -(\rho \times g \times A \times dx) \left(\frac{dH}{dx} \right), \text{ donde H es la altura de referencia}$$

De acuerdo a la segunda ley de newton la suma de las fuerzas externas generada por la presión y la gravedad son iguales a la masa M multiplicada por la aceleración de la partícula:

$$F = Ma \quad \text{EC 7}$$

Donde,

$$M = \rho \times A \times dx, \quad a = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \frac{dx}{dt} = v \frac{dv}{dx} \quad \text{EC 8}$$

$$-dPA - (\rho \times g \times A \times dx) \left(\frac{dH}{dx} \right) = \rho \times A \times dx \times v \frac{dv}{dx} \quad \text{EC 9}$$

Dividendo todos los factores por $\rho \times g \times A \times dx$ y reorganizando la ecuación, se obtiene la Ecuación de EULER:

$$\frac{1}{\rho g} \frac{dP}{dx} + \frac{v}{g} \frac{dv}{dx} + \left(\frac{dH}{dx} \right) = 0 \quad \text{EC 10}$$

Si se considera la densidad, ρ , constante o como una función de la presión, entonces la ecuación de EULER puede ser integrada con respecto a X , y se obtiene la ecuación de **Bernoulli** para un fluido ideal, sin fricción, incompresible y en condiciones de flujo permanente (Steady):

$$\frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + H = \text{Constante} \quad \text{EC 11}$$

Los tres términos en la ecuación de Bernoulli, representan la cantidad de energía por unidad de peso de fluido, en donde, la cabeza de presión representa la habilidad del fluido para hacer un trabajo en virtud de su presión, la cabeza de velocidad representa la energía cinética del fluido y la cabeza de potencial representa la energía potencial del fluido dado un nivel de referencia.

Para que la ecuación de Bernoulli pueda representar el comportamiento de fluidos reales, es decir fluidos viscosos y compresibles, se requiere realizar algunos ajustes. En el flujo de un fluido real, pueden ocurrir pérdidas de energía debido a la fricción, la separación y la turbulencia o arremolinamiento del fluido, por lo tanto la cabeza de energía total no será constante, sino que disminuirá en dirección del flujo. La mayor parte de la pérdida de esta energía es debida a la fricción del fluido viscoso, por lo tanto, el término **hf** debe ser adicionado a la ecuación básica de Bernoulli para tener en cuenta las pérdidas de cabeza debidas a la fricción.

$$\frac{P_1}{\rho g_1} + \frac{V_1^2}{2g} + H_1 = \frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{V_2^2}{\rho g_2} + H_2 + hf \quad \text{EC 12}$$

Donde:

Los subíndices 1 y 2 designan las condiciones en las secciones de entrada y de salida, respectivamente.

H: Energía potencial por unidad de peso de fluido, debida a su posición, medida por su altura por encima de un nivel de referencia asumido.

$P/\rho g$: Energía mecánica exigida para pasar la unidad de peso de fluido a través de la sección de tubería. Donde P es la presión absoluta del fluido y γ es el peso específico del fluido a la presión P , que a su vez es el inverso del volumen específico v , que representa el volumen de la unidad de peso del fluido a la presión P .

$V^2/2g$: Energía cinética por unidad de peso del fluido. Donde V es la velocidad del fluido en la sección de tubería y g es la gravedad.

h_f : Pérdida de Energía o Cabeza. Trabajo (energía) mecánico desarrollado por la unidad de peso de fluido en vencer la resistencia cortante de la fricción entre las secciones de entrada y salida del tramo considerado.

1.2 PÉRDIDA DE ENERGÍA O CABEZA DEBIDO A LA FRICCIÓN DEL FLUIDO⁸

Para flujo en tuberías circulares, la pérdida de cabeza debida a la fricción del fluido con la pared de la tubería, está relacionada con la cabeza de velocidad, la longitud del segmento de tubería, el diámetro de la tubería, el número de Reynolds y la rugosidad relativa.

⁸ Finch J. C. y Ko D. W. Fluid Flow Formulas. Pipeline Simulation Interest Group Annual Meeting. Toronto, Ontario, Canada (Octubre 20-21-1988).

En 1850 Henry D'Arcy, un ingeniero francés y Julius Weisbach, un profesor alemán, desarrollaron la fórmula de Darcy-Weisbach la cual relaciona la cabeza de velocidad, la longitud y el diámetro con la pérdida de cabeza debida a la fricción.

Esta fórmula también introduce el factor de fricción, f , el cual es adimensional y está en función del Número de Reynolds y de la rugosidad Relativa de la tubería.

A continuación se presenta la ecuación de Darcy-Weisbach.

$$hf = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad \text{EC 13}$$

Cuarenta años más tarde y de manera independiente, Fanning desarrolló una relación similar, la cual presenta la misma forma de la ecuación de Darcy-Weisbach con la diferencia que el factor de fricción de Fanning equivale a un cuarto del factor de fricción de Darcy-Weisbach. A continuación se presenta la ecuación desarrollada por Fanning.

$$hf = 4f_F \frac{L V^2}{D 2g} = f_F \frac{2L V^2}{D g} \quad \text{EC 14}$$

El factor de fricción de Fanning es ampliamente utilizada en la industria de las tuberías de gas, mientras que el factor de fricción de Darcy-Weisbach es más utilizado en la industria de los fluidos líquidos.

1.3 FACTOR DE FRICCIÓN⁹

Para determinar el valor del factor de fricción se han desarrollado gran cantidad de ecuaciones, las cuales pueden depender del Número de Reynolds y/o de la rugosidad relativa.

- **El Número de Reynolds**, es un número adimensional que caracteriza el flujo de un fluido por medio de la relación entre las fuerzas cinéticas y las fuerzas viscosas que actúan sobre dicho fluido. A continuación se presenta la ecuación básica del Número de Reynolds, *Nre*:

$$Nre = \frac{DV\rho}{\mu} \quad \text{EC 15}$$

Donde,

Nre = Numero de Reynolds (Adimensional)

D = Diámetro Interno de la Tubería (Pies)

V = Velocidad media del Fluido (Pies/Segundo)

p = Densidad del Fluido (Lbm/pie²)

μ = Viscosidad dinámica del Fluido (Lbm/Segundo-Pie)

Teniendo en cuenta el grupo de unidades utilizadas para la definición de la ecuación General de Flujo y realizando algunas sustituciones, obtenemos la siguiente ecuación modificada del número de Reynolds:

$$Nre = \frac{0.015379 \times Q \times g \times P_b}{\mu \times D \times T_b} \quad \text{EC 16}$$

Donde,

⁹ Donald W. Schroeder, Jr. Stoner Associates, Inc, Carlisle, A Tutorial on Pipe Flow Equations. Pennsylvania 17013-0086. Agosto 16 de 2001.

Nre = Numero de Reynolds (Adimensional)

D = Diámetro de la Tubería (Pulgadas)

g = Gravedad Específica del Gas (adimensional)

Pb = Presión Base (psia)

Q = Rata de flujo del Gas (SCFD)

Tb = Temperatura Base (°R)

μ = Viscosidad del Fluido (Lbf-Sec/Pie²)

- **La rugosidad Relativa** es la relación entre la Rugosidad Absoluta o la rugosidad efectiva y el diámetro interno de la tubería

A continuación se presentan algunos valores típicos de rugosidad efectiva en sistemas de tuberías según Finch J. C. y Ko D. W.¹⁰.

Tabla 1. Valores de Rugosidad Efectiva. Finch J. C. y Ko D. W.

Condiciones del sistema de tuberías	Rugosidad (MicroPulgadas)
Tubería Nueva	800-1200
Tubería sucia	2000 – 3000
Tubería con gran cantidad de suciedad	3500 – 4500
Algún otro tipo de restricciones	Mayores a 5000

Otros valores de rugosidad efectiva establecidos por entidades importantes de la industria son¹¹:

¹⁰ Finch J. C. y Ko D. W. Fluid Flow Formulas. Pipeline Simulation Interest Group Annual Meeting. Toronto, Ontario, Canada (Octubre 20-21-1988).

Tabla 2. Valores Típicos de Rugosidad Efectiva en la Industria.

	Rugosidad (MicroPulgadas)	
	Tubería No Recubierta	Tubería Recubierta
AGA	500 – 1000	200 – 300
TransContinental Gas Pipeline Corp	740 - 1100	280
Refugio Co-operative Test	>912	>180
Sask. Powe Corp	880	210
TCPL/TW/FGT	750 - 900	250 - 300

El comportamiento del flujo de un fluido se puede analizar en cuatro zonas principalmente: Laminar, Crítica, Parcialmente Turbulenta y Totalmente Turbulenta.

- Zona Laminar: En esta zona el factor de fricción es totalmente dependiente del Número de Reynolds e independiente de la Rugosidad Relativa de la tubería. En esta franja se encuentran los sistemas con tasas de flujo muy bajas, altas viscosidades o Número de Reynolds menores o iguales a 2000.

La Ecuación de Hagen-Poiseuille ofrece un buen ajuste para el cálculo del factor de fricción de Fanning.

$$f = 16 / Nre \qquad \text{EC 17}$$

- La Zona Crítica: En esta zona no existen funciones que describan las condiciones del flujo debido a que este se vuelve muy inestable y muestra varios comportamientos de manera aleatoria.

¹¹ Gregg Engineering Incorporated –GEI 2011 WinFlow User Manual, Pag 42, Capacitation Houston-Texas 2011.

En la zona crítica, las condiciones dependen de la turbulencia inicial debida a factores extraños tales como cambios de sección repentinos, obstrucciones o bordes agudos¹².

- Zona de Flujo Turbulento: En esta zona el factor de fricción es totalmente dependiente de la Rugosidad relativa e independiente del Número de Reynolds. En esta franja se encuentran los sistemas de tuberías rugosas, con ratas de flujo extremadamente altas y/o con bajas viscosidades.

La ecuación de Nikuradse de Tubería Rugosa, puede ser utilizada para describir el comportamiento del factor de fricción en esta zona.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4 \text{Log}(3.7D / K) \quad \text{EC 18}$$

- Zona de Flujo Parcialmente Turbulento: En esta zona el factor de fricción es dependiente tanto de la Rugosidad Relativa como del Número de Reynolds, en esta franja se encuentran los sistemas de tuberías lisas y/o con ratas de flujo moderadamente altas.

La ecuación de Von Karman y Prandtl de tubería Lisa, desarrollada en los años 1900s, puede ser utilizada para describir el comportamiento del factor de fricción en esta zona.

$$4 \text{Log}\left(Nre / 1.25 \sqrt{1/f}\right) \quad \text{EC 19}$$

En 1956 el US Bureau of Mines realizó algunos experimentos que condujeron a ajustes en los coeficientes de la ecuación de Von Karman y Prandtl. La nueva ecuación desarrollada por el US Bureau es:

¹² Lewis F. Moody, Peper Friction Factors for Pipe Flow, Princeton, N. J.

$$4\text{Log}\left(Nre/1.4126\sqrt{1/f}\right)$$

EC 20

Las zonas de flujo parcialmente turbulento y totalmente turbulento son las regiones operativas más comúnmente utilizadas en la industria de transporte y distribución de gas. En 1939, Colebrook propuso una ecuación que combinaba la ley de tubería Rugosa y la ley de tubería Lisa.

La ecuación de Colebrook describe el factor de fricción con un comportamiento asintótico a la ley de tubería lisa a bajos números de Reynolds y un comportamiento asintótico a la ley de tubería rugosa en altos números de Reynolds. En 1956 el US Bureau of Mines ajustó la ecuación de Colebrook teniendo en cuenta los cambios realizados a la ecuación de tubería lisa¹³.

$$-4\text{Log}\left(\frac{Ke}{3.7D} + \frac{1.4\sqrt{1/f}}{Nre}\right)$$

EC 21

La Ecuación de Colebrook fue utilizada junto con la ecuación de Hagen-Poiseville para desarrollar en 1944 el diagrama de Moody, que representa una alternativa gráfica para calcular el valor del factor de fricción sin necesidad de realizar cálculos complejos e iterativos necesarios para desarrollar la ecuación de Colebrook, los cuales para la época representaban un dificultad importante.

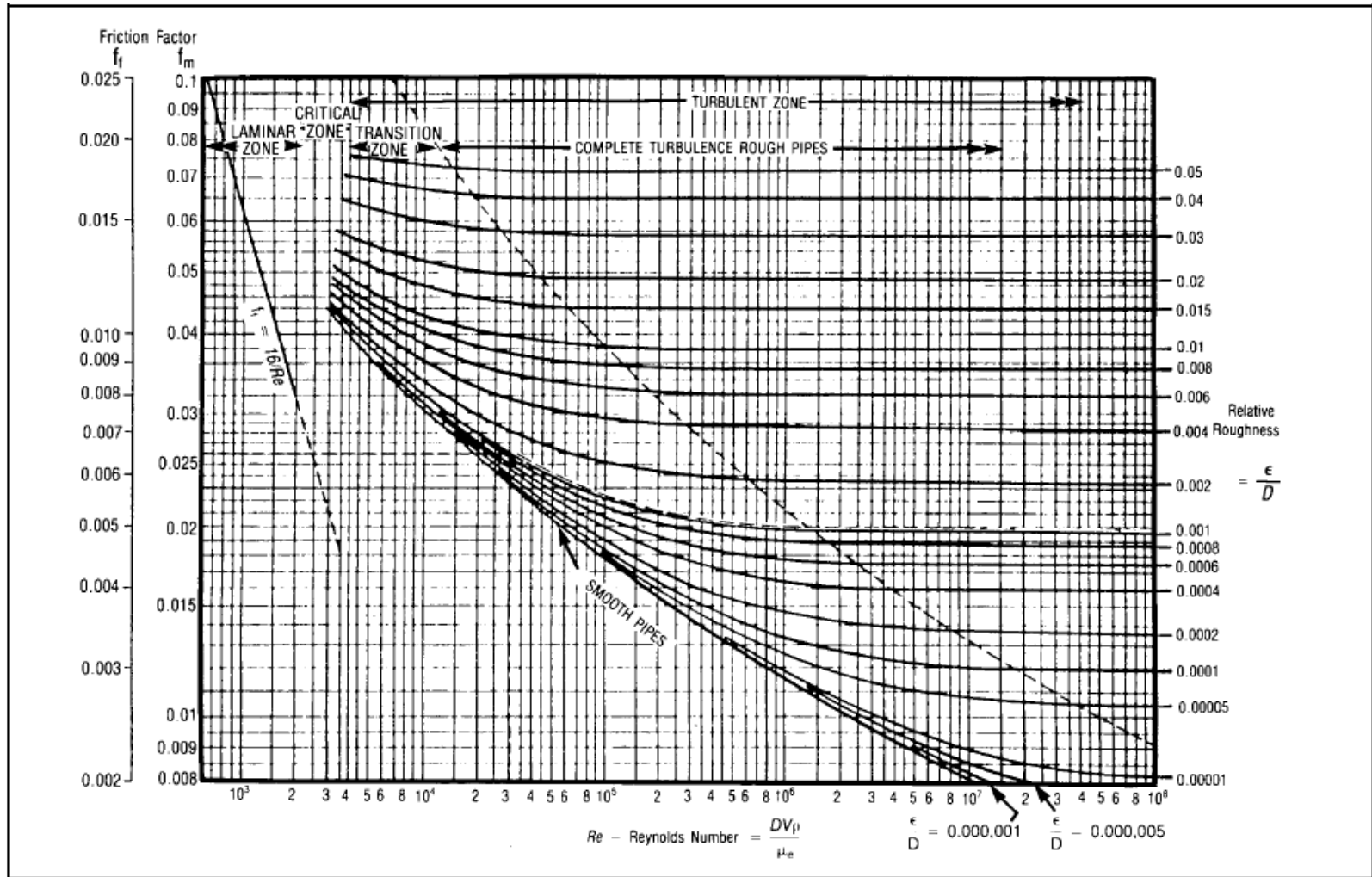
¹³ Finch J. C. y Ko D. W. Fluid Flow Formulas. Pipeline Simulation Interest Group Annual Meeting. Toronto, Ontario, Canada (Octubre 20-21-1988).

Figura 7. Diagrama de Moody, en el sector de transición entre la condición de flujo Parcialmente Turbulento a Flujo Totalmente Turbulento, la ecuación de Colebrook muestra una curva que se aleja un poco del comportamiento predicho por las ecuaciones de Tubería Lisa y Tubería rugosa. Algunos autores recomiendan que en lugar de buscar un comportamiento como el que muestra la ecuación de Colebrook, es mejor proyectar la línea que describe al flujo completamente turbulento, sobre la línea que describe al flujo parcialmente turbulento, de esta manera se obtiene un punto de intersección, el cual se convierte en el punto de inflexión o de cambio en el régimen de flujo.

Como se demostrará más adelante con las ecuaciones de AGA para el caso de transporte y distribución de Gas Natural, tener un punto de inflexión como punto de cambio del régimen de flujo, ofrece mayor precisión en el cálculo del factor de fricción, pero exige el uso de dos ecuaciones diferentes en cada uno de los regímenes de flujo. Por otro lado, las ecuaciones como la de Colebrook, permiten utilizar una única ecuación en todo el rango del régimen parcialmente turbulento y totalmente turbulento, con la consecuente pérdida de precisión en la zona de transición al predecir factores de fricción mayores a los reales, esta es la razón por la cual se considera que la ecuación de Colebrook-White es una ecuación conservadora para algunos casos específicos.

Como mencionamos anteriormente, el mayor inconveniente con el uso de las ecuaciones de AGA, es que es preciso definir el punto donde ocurre el cambio entre flujo parcialmente turbulento y flujo totalmente turbulento con el fin de poder utilizar la ecuación de flujo más apropiada para cada caso. Una de las ventajas operativas del software Winflow-Wintran es que permite elegir la opción de "Ecuación AGA" y mediante cálculos del número de Reynolds, el software establece la ecuación más apropiada a ser utilizada, es decir la ecuación AGA Parcialmente Turbulento o la ecuación AGA Totalmente Turbulento.

Figura 7. Diagrama de Moody



Fuente: GPSA Engineering Data Book, 12th Edition (Electronic). 2004

1.4 ECUACIÓN GENERAL DE FLUJO

La ecuación de Bernoulli de continuidad puede ser utilizada para derivar fórmulas aplicables a gran cantidad de condiciones de flujo, teniendo en cuenta que se busca derivar la ecuación general para el flujo de gas natural, el cual es un fluido compresible, podemos utilizar la ecuación de Bernoulli (Que se deriva del Principio de conservación de Masa y de la segunda ley de Newton), la ley de gases reales y la fórmula de Darcy-Weisbach.

Para poder derivar la ecuación general de flujo es necesario realizar las siguientes asunciones¹⁴:

- El flujo es Permanente (Steady) a lo largo de la Tubería, es decir que el mismo peso de gas pasa por cada sección de la tubería durante un intervalo de tiempo.
- El flujo es Isotérmico o que casi alcanza una condición Isotérmica, por lo tanto la temperatura del fluido se puede caracterizar por un valor medio o promedio.
- La compresibilidad del gas es constante o con una variación que puede ser caracterizada como un valor constante a través de la tubería a una presión media y una temperatura media.
- La variación en la Energía Cinética en la tubería es despreciable, por lo tanto la Energía Cinética puede ser eliminada de la expresión inicial de Bernoulli.
- Las pérdidas por fricción se mantienen a través de la tubería.
- La velocidad de flujo se puede caracterizar por la Velocidad media de masa aparente. La Presión, en la cabeza de energía potencial, es igual a la presión promedio en la longitud de la tubería.

¹⁴ Gregg Engineering Incorporated –GEI. 2011 Training –Modeling Equations, Capacitation Houston-Texas 2011.

- El factor de fricción es constante a lo largo de toda la tubería. El coeficiente de fricción es independiente de la densidad del fluido.
- El cambio de la presión con la elevación es caracterizado como una función de una densidad media constante a la presión media.
- Se ignoran las pérdidas de calor debido a remolinos u otras irregularidades en el flujo.

En 1935, el US Bureau of Mines presentó la Ecuación de Flujo General como la fórmula para predecir la caída de presión de un fluido compresible. La ecuación fue desarrollada a partir de la ecuación de Bernoulli, el equivalente Hidrodinámico de la primera ley de la Termodinámica. La forma usual de la Ecuación General de Flujo es la siguiente¹⁵:

$$Q_b = C_1 \frac{T_b}{P_b} \sqrt{\frac{1}{f} \left[\frac{P_1^2 - P_2^2 - E}{GLTZ} \right]^{0.5}} D^{2.5}, \text{ donde, } E = \frac{C_2 P_{av} G (H_2 - H_1)}{ZT} \quad \text{EC 22}$$

Donde,

Q = Flujo (SCF/D)

f = Factor de Fricción de Fanning (Adimensional). Dependiendo de la literatura que se esté estudiando, también es posible encontrar este factor como el Factor de Fricción de Darcy-Weisbach, en estos casos es muy importante tener en cuenta que la constante C1 cambiaría de valor.

Tb = Temperatura Base (°R)

Pb = Presión Base (psia)

P1 = Presión en el punto de entrada (psia)

P2 = Presión en el punto de salida (psia)

¹⁵ Gregg Engineering Incorporated –GEI. 2011 Training –Modeling Equations, Capacitation Houston-Texas 2011.

P_{av} = Presión Promedio (psia)

G = Gravedad Específica (Adimensional)

H₁ = Elevación en el punto de entrada, con respecto a un punto de referencia (pies)

H₂ = Elevación en el punto de salida, con respecto a un punto de referencia (pies)

Z = Compresibilidad del Gas (Adimensional)

T = Temperatura promedio del Gas (°R)

L = Longitud de la Tubería (Millas)

D = Diámetro Interno de la Tubería (Pulgadas)

P = Densidad del Gas (lb/pie³)

C₁, C₂ son constantes y son dependientes del sistema de unidades utilizado

Esta ecuación puede ser utilizada para modelar sistemas de transporte de gas natural en los siguientes casos¹⁶:

- Dimensionamiento de nuevas líneas.
- Determinación de requerimientos de potencia.
- Efectos de los anillos o Loops
- Determinación de presiones de entrega a clientes
- Tiempos de duración del proceso de limpieza interna con raspatabos
- Efectos de variar la composición del gas.
- Efectos de variación de la rugosidad efectiva, para definir frecuencias de corrida de herramientas de limpieza.

¹⁶ Finch J. C. y Ko D. W. Fluid Flow Formulas. Pipeline Simulation Interest Group Annual Meeting. Toronto, Ontario, Canada (Octubre 20-21-1988).

Sin embargo no puede ser utilizada o debe ser utilizada con precaución bajo los siguientes escenarios de simulación de sistemas de transporte¹⁷:

- Determinar la posibilidad de superar los picos de consumo con la ayuda del Empaquetamiento del ducto. En estos casos se debe utilizar un análisis de flujo transiente, por ejemplo utilizando el Software Wintran.
- Grandes cambio en la elevación de la tubería en distancias cortas, ya que los cambios de presión podrían tener un efecto sobre la asunción de que la presión es igual a la presión promedio del tramo ($P = P_{av}$). En estos casos se podría llegar a utilizar la ecuación de flujo pero teniendo en cuenta los cambios en la presión atmosférica.
- Puentes, debido a que la condición Isotérmica podría no existir.
- Cualquier condición en la tubería que contribuya con cambios de velocidad significativos, tal como venteos, algunas derivaciones, medidores y reguladores

A excepción del Factor de Fricción, todos los parámetros de la Ecuación General de Flujo están bien definidos y son fácilmente determinados. La definición del Factor de fricción ha sido objeto de controversia entre los estudiosos de este tema y dependiendo de su definición, la ecuación de flujo puede ser transformada en alguna de las ecuaciones de flujo más conocidas y utilizadas en la industria.

1.4.1 Factor de Transmisión.

Este factor refleja el grado de transmisibilidad del gas a través de la tubería y puede ser expresado en términos del factor de fricción. La expresión básica del

¹⁷ Finch J. C. y Ko D. W. Fluid Flow Formulas. Pipeline Simulation Interest Group Annual Meeting. Toronto, Ontario, Canada (Octubre 20-21-1988).

Factor de Transmisión es: $\sqrt{\frac{1}{f}}$, sin embargo como veremos más adelante, este factor se puede expresar de diversas maneras.

A continuación se presentan diferentes definiciones de Factor de Transmisión que generan las diversas ecuaciones de flujo disponibles para la industria del transporte de gas natural:

Tabla 3. Ecuaciones de Flujo y su Factor de Transmisión

FACTOR DE TRANSMISIÓN $\sqrt{\frac{1}{f}}$	ECUACIÓN DE FLUJO ESTABLECIDA
No depende de un factor de transmisión	Muller
$18.815 / \sqrt{(1 + (3.6/D) + 0.03D)}$	Spitglass
$11.18D^{0.167}$	Weymouth
$6.87Nre^{0.07305}$	Panhandle A
$16.49Nre^{0.01961}$	Panhandle B
$4.619Nre^{0.1}$	IGT Distribution
$4\text{Log}(Nre/1.4126\sqrt{1/f})$	Smooth Pipe Law (Para tuberías lisas)
$4\text{Log}(3.7D / K)$	Rough Pipe Law (Para Tuberías Rugosas)
$-4\text{Log}\left(\frac{Ke}{3.7D} + \frac{1.4\sqrt{1/f}}{Nre}\right)$	Colebrook-White
$4Df \times \text{Log}(Nre/1.4126\sqrt{1/f})$	AGA Partially Turbulent
$4\text{Log}(3.7D / Ke)$	AGA Fully Turbulent

1.4.2 Ecuaciones que no dependen del factor de fricción o de transmisión.

Muller¹⁸: Esta ecuación no depende de un factor de fricción y fue desarrollada para gas a presiones por encima de 1 psig y hasta 20 psig. La ecuación asume que el gas está fluyendo a través de una tubería lisa. Este caso se da en tuberías de cobre, plástico, vidrio entre otros materiales lisos.

$$Q_b = \frac{490.7597 D^{2.725} \left(\frac{P_1^2 - P_2^2}{ZL} \right)^{0.575}}{G^{0.425}}$$

Adicionalmente, esta ecuación asume una temperatura base de 60°F, una presión base de 14.7 psia y una temperatura de flujo de 60°F.

La ecuación de Muller sigue la ley de tubería Lisa cuando se presentan números de Reynolds entre 500.000 y 5.000.000. Luego de números de Reynolds de 5.000.000, la desviación de la ley de tubería lisa se hace muy grande.

Si se utiliza un factor de eficiencia, la ecuación puede desplazarse de manera paralela para ajustarse aún más al comportamiento de la ecuación de tubería lisa, sin embargo el rango aplicable para este tipo de factores de eficiencia está limitado para el flujo parcialmente turbulento, ya que a medida que el flujo se hace más turbulento, la ecuación se vuelve menos aplicable.

1.4.3 Ecuaciones que dependen del factor de fricción o de transmisión.

Estas ecuaciones pueden ser clasificadas en tres grandes grupos: De factor de fricción constante, de factor de fricción dependiente del diámetro y de factor de fricción dependiente del número de Reynolds.

¹⁸ Finch J. C. y Ko D. W. Fluid Flow Formulas. Pipeline Simulation Interest Group Annual Meeting. Toronto, Ontario, Canada (Octubre 20-21-1988).

- Ecuaciones de factor de fricción constante.

Estas ecuaciones pueden ser utilizadas únicamente en condiciones de flujo turbulento y en tuberías con una relación Diámetro-Rugosidad especificada. Hoy en día se utilizan muy poco debido a su poca flexibilidad.

- Ecuaciones de factor de Fricción dependiente del diámetro.

Spitzglass¹⁹: Fue publicada en 1912 y es probablemente la ecuación más antigua que aún es utilizada en la industria. Esta ecuación presenta un factor de transmisión que está en función del Diámetro de la tubería.

Esta ecuación se presenta en dos formas, una para alta presión y otra para muy baja presión. A continuación se presenta la ecuación desarrollada para Alta Presión.

$$Q_b = 729.45D^{2.5} \left(\frac{(P_1^2 - P_2^2)}{LG \left(1 + \frac{3.6}{D + 0.03D} \right)} \right)^{0.5} \quad \text{EC 23}$$

Esta ecuación es válida para tuberías con diámetro alrededor de 10 pulgadas cuando la rugosidad es 1000 micropulgadas o muy próxima a este valor²⁰.

¹⁹ A Tutorial on Pipe Flow Equations. Donald W. Schroeder, Jr. Stoner Associates, Inc, Carlisle, Pennsylvania 17013-0086. Agosto 16 de 2001.

²⁰ Finch J. C. y Ko D. W. Fluid Flow Formulas. Pipeline Simulation Interest Group Annual Meeting. Toronto, Ontario, Canada (Octubre 20-21-1988).

Weymouth²¹:

Esta ecuación fue desarrollada en 1912 y establece que el factor de fricción es función del diámetro de la tubería.

Es útil para modelar diámetros de tubería de 36 pulgadas en flujo totalmente turbulento y con una rugosidad equivalente de 1000 micropulgadas. Cuando la ecuación es usada en tubería menor o igual a 30 pulgadas y con una rugosidad efectiva de 1000 micropulgadas, el factor de fricción obtenido es demasiado grande y solo puede ser ajustado por el uso de un factor de eficiencia que son mayores a 1 o 100%. Otro ejemplo de buenos resultados de modelamiento de la ecuación de Weymouth es cuando se realiza sobre tuberías de 24 pulgadas con una rugosidad efectiva cercana a 1800 Micropulgadas.²²

La ecuación de Weymouth es normalmente utilizada para evaluar el cambio en el desempeño de una tubería existente. No es recomendable para diseñar o dimensionar una tubería nueva. En general, para flujo totalmente turbulento, y dadas las condiciones de diámetro y la rugosidad equivalente, la ecuación de Weymouth podría ser utilizada siempre y cuando se cuente con suficiente información histórica del comportamiento del flujo de gas a través de la tubería, con el fin de establecer el factor de eficiencia adecuado. Es importante resaltar que esta ecuación no entrega buenos resultados cuando se utiliza para modelar flujos parcialmente turbulentos

La Ecuación de flujo basada en Weymouth es:

$$Q_b = 432.7 \frac{T_b}{P_b} \left[\frac{P_1^2 - P_2^2 - E}{GLTZ} \right]^{0.5} \times D^{2.667} \quad \text{EC 24}$$

²¹ Gregg Engineering Incorporated –GEI. 2011 Training –Modeling Equations, Capacitation Houston-Texas 2011.

²² Finch J. C. y Ko D. W. Fluid Flow Formulas. Pipeline Simulation Interest Group Annual Meeting. Toronto, Ontario, Canada (Octubre 20-21-1988).

- Ecuaciones de factor de Fricción dependiente del Número de Reynolds.

Panhandle A²³:

Esta ecuación fue desarrollada con base en datos operacionales del Gasoducto TEXAS PANHANDLE en Chicago. Este gasoducto fue operado a presiones de hasta 900 psia y a ratas de flujo en el régimen parcialmente turbulento. La ecuación de Panhandle A es una expresión dependiente del Número de Reynolds y se aproxima mucho al comportamiento de la ley de Tubería Lisa. La ecuación de flujo basada en Panhandle A se expresa como:

$$Q_b = 435.9 \left(\frac{T_b}{P_b} \right)^{1.0788} \times 6.87 Nre^{0.07305} \times \left[\frac{P_1^2 - P_2^2 - E}{G^{0.8539} LTZ} \right]^{0.5394} \times D^{2.6182} \quad \text{EC 25}$$

Usualmente se utiliza un Factor de Eficiencia con la Ecuación Panhandle A para proveer un buen ajuste de los datos operativos en un régimen de flujo Parcialmente Turbulento.

La Ecuación Panhandle A, no es adecuada como herramienta de planificación o diseño porque un buen estimado del factor de eficiencia solo puede alcanzarse por medio de comparación con datos históricos de operación.

Panhandle B²⁴:

Esta ecuación, también llamada Panhandle Modificado, fue desarrollada con base en datos operacionales obtenidos de tuberías que operaban a altas ratas de flujo y por lo tanto tubería cuyo flujo se encontraba en el régimen Totalmente Turbulento.

²³ Gregg Engineering Incorporated –GEI. 2011 Training –Modeling Equations, Capacitation Houston-Texas 2011.

²⁴ Gregg Engineering Incorporated –GEI. 2011 Training –Modeling Equations, Capacitation Houston-Texas 2011.

La ecuación Panhandle B es una expresión dependiente del Número de Reynolds aunque en menor proporción que la ecuación Panhandle A, e incluye un valor implícito de rugosidad de la tubería para cada diámetro en la cual la ecuación es aplicada. La ecuación de flujo basada en Panhandle B se expresa como:

$$Q_b = 737 \left(\frac{T_b}{P_b} \right)^{1.020} \times 16.49 Nre^{0.01961} \times \left[\frac{P_1^2 - P_2^2 - E}{G^{0.961} LTZ} \right]^{0.510} \times D^{2.530} \quad \text{EC 26}$$

Usualmente se utiliza un Factor de Eficiencia con la Ecuación Panhandle B para proveer un buen ajuste de los datos operativos en un régimen de flujo Totalmente Turbulento.

La Ecuación Panhandle B no es adecuada como herramienta de planificación o diseño porque un buen estimado del factor de eficiencia solo puede alcanzarse por medio de comparación con datos históricos de operación.

IGT Distribution- Institute of Gas Technology²⁵:

Cuando se tienen sistemas con números de Reynolds entre 20.000 y 1.000.000, la ecuación IGT se ajusta mucho mejor a la ley de tubería lisa que cualquiera de las ecuaciones de Panhandle

$$Q_b = 38.77 \frac{T_b}{P_b} \left[\frac{P_1^2 - P_2^2 - E}{GLTZ} \right]^{0.5} \times 4.619 Nre^{0.1} \times D^{2.5} \quad \text{EC 27}$$

²⁵ Finch J. C. y Ko D. W. Fluid Flow Formulas. Pipeline Simulation Interest Group Annual Meeting. Toronto, Ontario, Canada (Octubre 20-21-1988).

Smooth Pipe Law (Tubería lisa)²⁶:

Esta ecuación establece que el factor de fricción depende únicamente del Número de Reynolds. En el flujo por tuberías lisas, una capa viscosa, junto a la pared de la tubería, rodea un fluido turbulento. La ecuación de flujo basada en la ley de tubería Lisa se expresa como:

$$Q_b = 38.77 \frac{T_b}{P_b} \left[\frac{P_1^2 - P_2^2 - E}{GLTZ} \right]^{0.5} \times 4 \text{Log} \left(Nre / 1.4126 \sqrt{1/f} \right) \times D^{2.5} \quad \text{EC 28}$$

Esta ecuación solo es utilizada en condiciones ideales o de laboratorio y no debería ser utilizada para diseñar facilidades, sin embargo, si se utiliza el Factor de Arrastre dentro de la ecuación, esta podría ser utilizada para predecir el comportamiento del fluido en sistemas de tubería operando en un régimen de flujo Parcialmente Turbulento.

Rough Pipe Law (Tubería Rugosa)²⁷:

Esta ecuación establece que el factor de fricción es función únicamente del área de sección transversal de la tubería. De esta manera, el factor de fricción depende de la rugosidad relativa de la tubería (Relación entre el diámetro y la rugosidad de la superficie) y no de las propiedades del fluido o de la rata de flujo. La ecuación de flujo basada en la ley de tubería rugosa se expresa como:

$$Q_b = 38.77 \frac{T_b}{P_b} \left[\frac{P_1^2 - P_2^2 - E}{GLTZ} \right]^{0.5} \times 4 \text{Log} (3.7D / K) \times D^{2.5} \quad \text{EC 29}$$

²⁶ Gregg Engineering Incorporated –GEI. 2011 Training –Modeling Equations, Capacitation Houston-Texas 2011.

²⁷ Gregg Engineering Incorporated –GEI. 2011 Training –Modeling Equations, Capacitation Houston-Texas 2011.

Esta ecuación predice el comportamiento de un fluido ideal en un régimen de flujo totalmente turbulento. Para poder aplicar esta ecuación en un sistema real, se requiere convertir la Rugosidad Absoluta K , en términos de una rugosidad efectiva o rugosidad operativa.

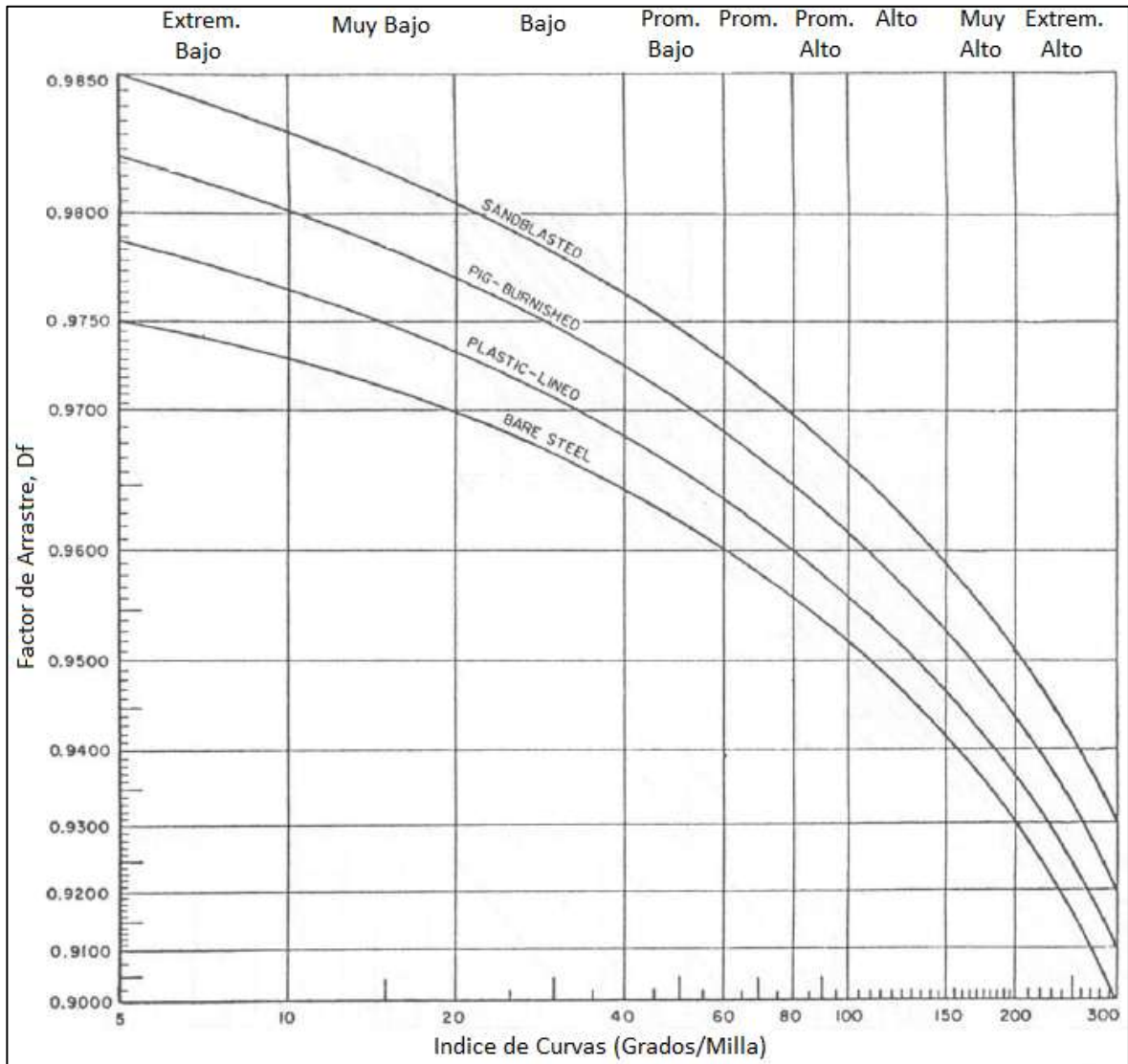
AGA Parcialmente Turbulento y AGA Totalmente Turbulento²⁸:

Los estudios realizados por AGA muestran Factores de Fricción mayores que los predichos por la ley de Tubería Lisa y la ley de Tubería Rugosa. Estos estudios confirmaron que para flujos turbulentos a bajas ratas de flujo (Flujo Parcialmente Turbulento), el factor de fricción es dependiente del Número de Reynolds, y para flujo turbulento y altas ratas de flujo (Flujo Totalmente Turbulento), el factor de fricción es una función de la rugosidad relativa de la tubería.

Para flujo Parcialmente Turbulento (Bajas ratas de flujo de gas), el factor de fricción es un múltiplo constante del factor definido por la ley de tubería Lisa. La constante de proporcionalidad es una función del Factor de Arrastre D_f , y refleja la contribución de la caída de presión por fricción en los accesorios, curvas, soldaduras, etc del sistema de tubería. El Factor de Arrastre varía entre 92% y 98% dependiendo del número y el grado de inducción de arrastre de los elementos presentes. Utilizando la Figura 8. Grafico Factor de Arrastre vs Índice de Curva del Ducto, se puede realizar una primera aproximación del valor correspondiente al Factor de Arrastre.

²⁸ Gregg Engineering Incorporated –GEI. 2011 Training –Modeling Equations, Capacitation Houston-Texas 2011.

Figura 8. Grafico Factor de Arrastre vs Índice de Curva del Ducto



Fuente: Glenn A. R. Which Flow Equation-Does It Matter?. Pipeline Simulation Interest Group Annual Meeting. Detroit, Michigan, EEUU (Octubre 27-28-1983).

La ecuación de flujo basada en **AGA Parcialmente Turbulento** se expresa como:

$$Q_b = 38.77 \frac{T_b}{P_b} \left[\frac{P_1^2 - P_2^2 - E}{GLTZ} \right]^{0.5} \times 4Df \times \text{Log} \left(Nre / 1.4126 \sqrt{1/f} \right) \times D^{2.5} \quad \text{EC 30}$$

Para flujo Totalmente Turbulento (Números de Reynolds mayores a 1.000.000), la teoría y los experimentos han demostrado que el factor de fricción es independiente de la rata de flujo. El comportamiento del flujo bajo condiciones totalmente turbulentas se aproxima mucho a la ley de Tubería Rugosa. De esta manera, el factor de Fricción es una función únicamente de la Rugosidad Relativa K/D .

En la ecuación AGA Totalmente Turbulento, la rugosidad se define como la Rugosidad Efectiva o Rugosidad Operativa, la cual refleja el efecto compuesto de la rugosidad interna y la rugosidad inducida por el arrastre de accesorios, curvas, soldaduras etc. Por lo tanto es opuesto a la ley de Tubería Rugosa, en donde K se define como la Rugosidad Absoluta y refleja solo la condición interna de la pared de la tubería.

La ecuación de flujo basada en **AGA Totalmente Turbulento** se expresa como:

$$Q_b = 38.77 \frac{T_b}{P_b} \left[\frac{P_1^2 - P_2^2 - E}{GLTZ} \right]^{0.5} \times 4 \text{Log}(3.7D / Ke) \times D^{2.5} \quad \text{EC 31}$$

Donde **Ke** es la Rugosidad Efectiva

Para determinar la rata de flujo donde se presenta el punto de inflexión entre flujo parcialmente turbulento y flujo totalmente turbulento, se debe igualar la ecuación de flujo totalmente turbulento y la ecuación de flujo en tubería lisa y resolver la incógnita del número de Reynolds, este número de Reynolds puede entonces ser utilizado para calcular la rata de flujo del punto de inflexión utilizando la ecuación AGA parcialmente turbulento²⁹.

²⁹ Glenn A. R. Which Flow Equation-Does It Matter?. Pipeline Simulation Interest Group Annual Meeting. Detroit, Michigan, EEUU (Octubre 27-28-1983).

Una vez realizadas las igualdades propuestas anteriormente y despejando el Numero de Reynolds, se obtiene la siguiente ecuación

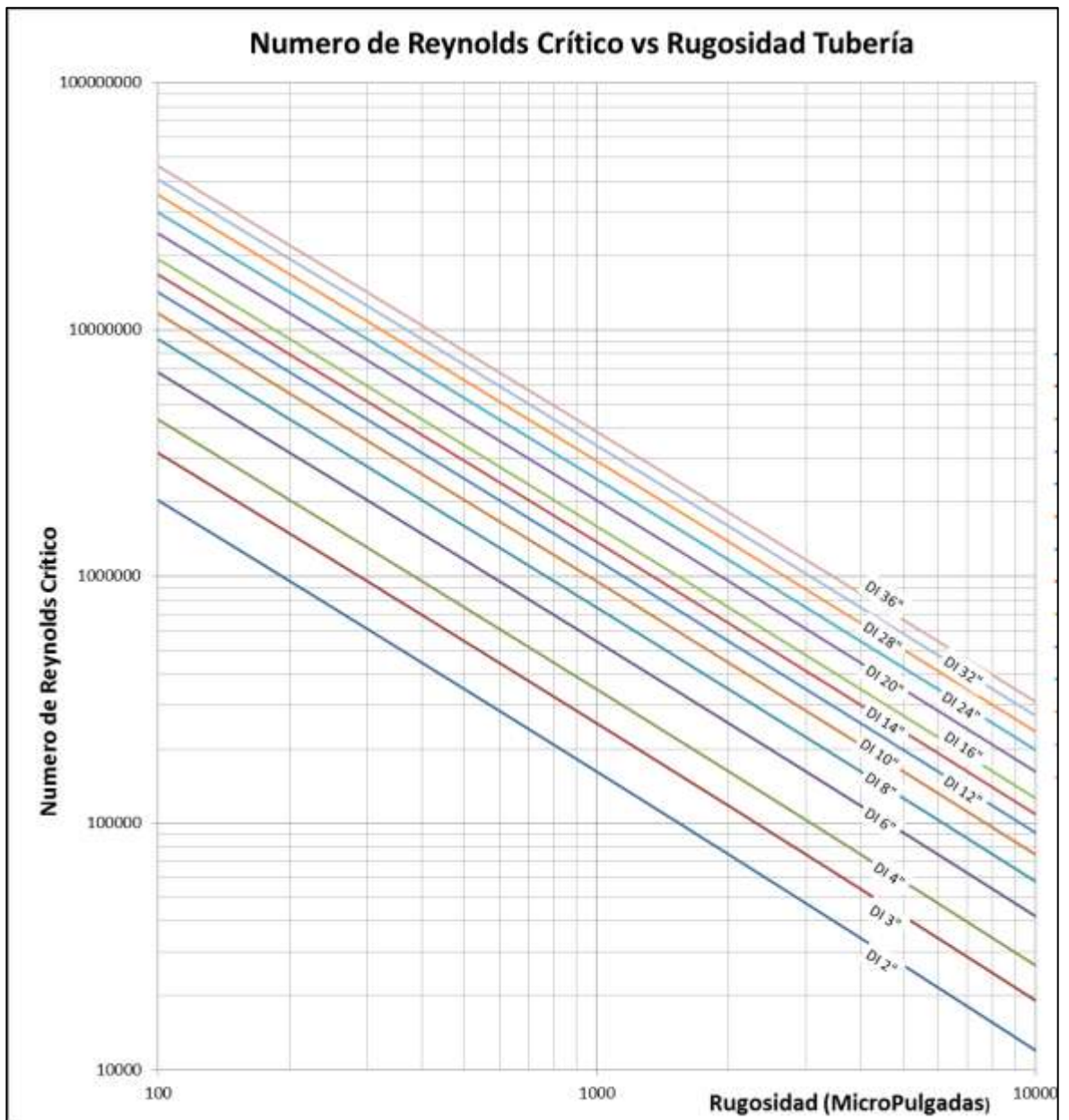
$$N_{Re} = \frac{20.91 \times D}{Ke} \text{Log} \frac{3.7 \times D}{Ke} \quad \text{EC 32}$$

Con la ecuación anterior se puede calcular el número de Reynolds en el cual ocurre el cambio entre comportamiento Parcialmente Turbulento y Totalmente Turbulento.

A continuación se presenta una gráfica diseñada a partir de la ecuación EC 32, la cual permite encontrar fácilmente el valor del número de Reynolds en el punto de inflexión.

Como se mencionó anteriormente, escogiendo la opción de ecuación “AGA”, el software Winflow-Wintran puede realizar este cálculo automáticamente para cada rata de flujo y determinar en qué casos se debe utilizar la ecuación AGA Parcialmente Turbulento y en cuales la ecuación AGA Totalmente Turbulento.

Figura 9. Gráfico Numero de Reynolds Crítico vs Rugosidad Tubería



Colebrook-White³⁰:

Esta ecuación combina tanto la ley de Tubería Lisa como la ley de Tubería Rugosa, convirtiéndose en el primer intento exitoso en definir el factor de fricción en todo el régimen turbulento con una sola ecuación, está basada en análisis de datos de una tubería de agua de diámetro pequeño con rugosidades absolutas creadas artificialmente.

Colebrook utiliza datos extrapolados en el régimen totalmente turbulento y no tiene un método independiente para determinar la rugosidad relativa de las piezas de tubería experimentales.

La Ecuación de Colebrook está caracterizada por una curva suave en los límites de transición entre el flujo parcialmente turbulento y el flujo totalmente turbulento. Esta ecuación entrega una estimación de caída de presión conservadora, generalmente predice altas caídas de presión, por encima de las predichas por las ecuaciones de AGA.

La ecuación de flujo basada en Colebrook se expresa como:

$$Q_b = 38.77 \frac{T_b}{P_b} \left[\frac{P_1^2 - P_2^2 - E}{GLTZ} \right]^{0.5} \times 4 \text{Log} \left(\frac{Ke}{3.7D} + \frac{1.4\sqrt{1/f}}{Nre} \right) \times D^{2.5} \quad \text{EC 33}$$

1.4.4 La Ecuación con el mejor ajuste.

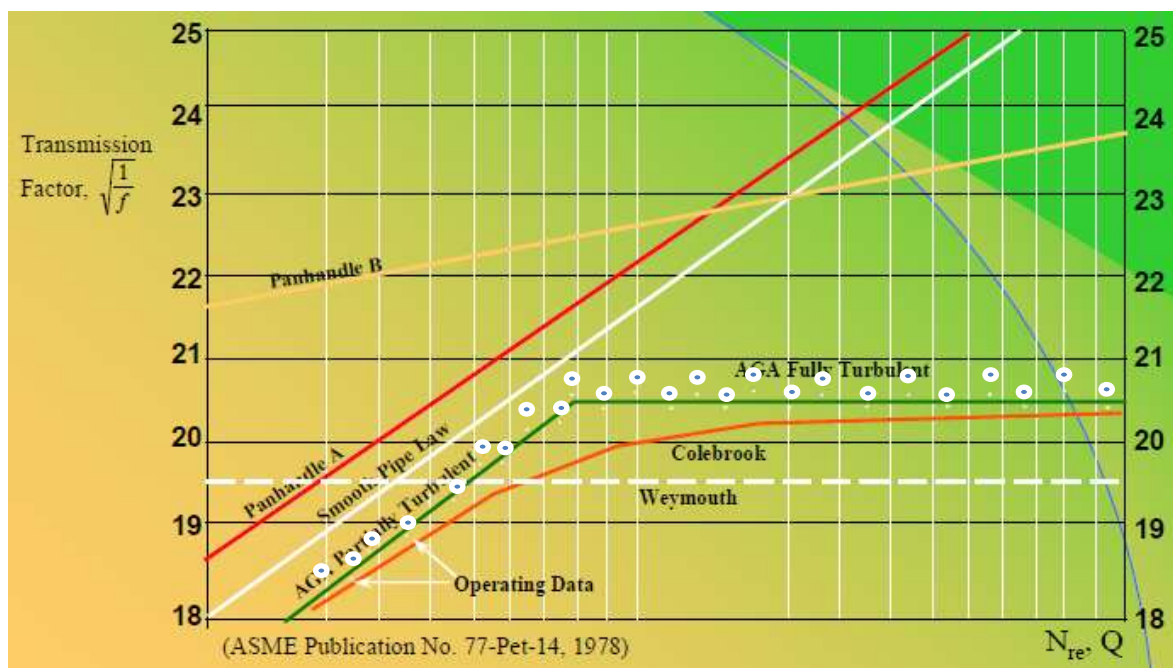
En primer lugar es importante aclarar que cualquier ecuación que sea utilizada, debe ser verificada con pruebas de simulación, comparando los resultados del modelo contra la información documentada del comportamiento real del sistema de conducción.

³⁰ Gregg Engineering Incorporated –GEI. 2011 Training –Modeling Equations, Capacitation Houston-Texas 2011.

El uso de la ecuación general de flujo con el factor de fricción definido por la ecuación de Colebrook no tiene límites, es decir, puede ser utilizado con buenos resultados tanto en la zona de flujo parcialmente turbulento como en la de flujo totalmente turbulento, cualquier otra ecuación tendrá un rango límite de aplicabilidad y por lo tanto es necesario conocer muy bien el comportamiento del sistema para evitar errores en la simulación del comportamiento del flujo.

La siguiente figura muestra la relación entre el Factor de Transmisión y el Número de Reynolds con base en la Ecuación General de Flujo y utilizando datos operacionales históricos de 40 compañías operadoras de tuberías de Crudo y Gas en Norte América³¹.

Figura 10. Relación entre el Factor de Transmisión y el Número de Reynolds



Fuente: Gregg Engineering Incorporated –GEI. 2011 Training – Winflow Training User Manual, Capacitation Houston-Texas 2011.

De la figura anterior se puede concluir lo siguiente:

³¹ Gregg Engineering Incorporated –GEI. 2011 Training –Modeling Equations, Capacitation Houston-Texas 2011.

- Claramente se evidencia que las ecuaciones AGA proveen el mejor ajuste a los datos operacionales tanto en el régimen de flujo parcialmente turbulento como en el régimen totalmente turbulento.
- La ecuación Colebrook muestra valores más bajos del factor de Transmisión que las ecuaciones de AGA, especialmente en la zona de transición entre flujo parcialmente turbulento y totalmente turbulento, y consecuentemente predice mayores caídas de presión.
- Utilizando un Factor de Eficiencia apropiado, valor menor a 1, la ecuación Panhandle A podría entregar un buen ajuste en el régimen parcialmente turbulento con respecto a los datos operacionales, de la misma manera que lo haría la ecuación Panhandle B en el régimen totalmente turbulento.
- **AGA vs COLEBROOK³²:**
 - Ambas ecuaciones tienen perfiles de flujo similares ya que utilizan las mismas ecuaciones base para su desarrollo (ley de Prandtl y ley de Nikuradse), sin embargo la ecuación de Colebrook es más conservadora.
 - Colebrook fue desarrollada en 1939, basa en experimentos en líneas de agua de 2" y con rugosidades creadas artificialmente. AGA fue desarrollada en 1965, basada en 43 pruebas sobre tuberías en operación.
 - Ambas Ecuaciones son semi-empíricas, sin embargo Colebrook es más teórica y AGA es más empírica.
 - La mayoría de las compañías de tuberías utilizan la Ecuación AGA. Considerando que la ecuación puede ofrecer un mejor ajuste, esto

³² Gregg Engineering Incorporated –GEI 2011 WinFlow User Manual, Pag 43, Capacitation Houston-Texas 2011.

implica inversiones optimizadas y mayores márgenes de ganancia para las compañías.

A continuación se presenta una tabla resumen en la cual se describen las aplicaciones recomendadas y las aplicaciones en donde no se recomienda el uso de cada una de las ecuaciones estudiadas en este documento de acuerdo con la información recopilada y la experiencia del autor.

Tabla 4. Ecuaciones de Flujo y su Aplicabilidad

Ecuación	Aplicación Recomendada	Aplicación NO Recomendada
Spitzglass	Diámetros de tubería próximos a 10 pulgadas. Rugosidad efectiva de la tubería cercana a 1000 micropulgadas	Escenarios diferentes a: Diámetros de tubería próximos a 10 pulgadas. Rugosidad efectiva de la tubería cercana a 1000 micropulgadas
Weymouth	Flujo Totalmente Turbulento. Evaluar Cambios en el desempeño de una tubería existente si se cuenta con información histórica para calcular el factor de eficiencia que generalmente es un valor mayor que 1.	Flujo Parcialmente Turbulento. Diseño de sistemas de transporte nuevos o aplicaciones donde no se tenga suficiente información histórica para calcular el factor de eficiencia.
Panhandle A	Flujo Parcialmente Turbulento. Evaluar Cambios en el	Flujo Totalmente Turbulento.

	<p>desempeño de una tubería existente si se cuenta con información histórica para calcular el factor de eficiencia que generalmente es un valor menor que 1</p>	<p>Diseño de sistemas de transporte nuevos o aplicaciones donde no se tenga suficiente información histórica para calcular el factor de eficiencia</p>
<p>Panhandle B</p>	<p>Flujo Totalmente Turbulento. Evaluar Cambios en el desempeño de una tubería existente si se cuenta con información histórica para calcular el factor de eficiencia que generalmente es un valor menor que 1</p>	<p>Flujo Parcialmente Turbulento. Diseño de sistemas de transporte nuevos o aplicaciones donde no se tenga suficiente información histórica para calcular el factor de eficiencia</p>
<p>IGT Distribution</p>	<p>Flujo Parcialmente Turbulento. Con Reynolds menor o igual a 1.000.000. Tuberías de diámetros pequeños y presiones bajas. Especialmente utilizada para redes de distribución más aún cuando son redes de Polietileno. Evaluar Cambios en el desempeño de una tubería existente si se cuenta con información histórica para calcular el factor de eficiencia</p>	<p>Flujo totalmente Turbulento con Reynolds mayor a 1.000.000</p>

<p>Smooth Pipe Law</p>	<p>Flujo Parcialmente Turbulento en condiciones ideales o de laboratorio. Diseños de facilidades con flujo parcialmente Turbulento utilizando el Factor de Arrastre.</p>	<p>Flujo Totalmente Turbulento. Diseños facilidades con flujo parcialmente Turbulento cuando no se utiliza el Factor de Arrastre</p>
<p>Rough Pipe Law</p>	<p>Flujo Totalmente Turbulento en condiciones ideales o de laboratorio. Diseños facilidades con flujo Totalmente Turbulento, utilizando la rugosidad efectiva u operativa en lugar de la rugosidad absoluta</p>	<p>Flujo Parcialmente Turbulento. Diseños facilidades con flujo Totalmente Turbulento cuando no se utiliza la rugosidad efectiva u operativa</p>
<p>AGA Parcialmente Turbulento</p>	<p>Flujo Parcialmente Turbulento</p>	<p>Flujo Totalmente Turbulento</p>
<p>AGA Totalmente Turbulento</p>	<p>Flujo Totalmente Turbulento</p>	<p>Flujo Parcialmente Turbulento</p>
<p>Colebrook-White</p>	<p>Flujo totalmente Turbulento y parcialmente Turbulento, teniendo en cuenta que en la zona de transición se presentaran caídas de presión menores a las predichas por la ecuación.</p>	

1.5 FACTOR DE EFICIENCIA³³

El factor de Eficiencia es normalmente utilizado en los sistemas de tuberías para ajustar los resultados del modelo de simulación. El factor de eficiencia es una expresión multiplicadora del flujo obtenido, mediante la cual se ajustan los resultados de la ecuación hacia los valores reales.

Parte de la industria de transporte y distribución de fluidos por tubería, tienden a usar el valor de la rugosidad de la tubería como un factor de corrección para ajustar las ecuaciones de flujo a la realidad, pese a que para esto se cuenta con el factor de eficiencia. Al hacer esto, se establecen rugosidades que pueden estar por fuera de los rangos normales para sistemas de tuberías de acero comercial (Rugosidades mayores a 5000 micropulgadas). Esta operación puede funcionar bien para determinado segmento de tubería y bajo ciertas características del fluido y del flujo, sin embargo puede no funcionar cuando las condiciones son cambiadas y se desea predecir presiones o flujos en determinados puntos.

Si el término de eficiencia de la tubería es utilizado, incluso en conjunto con incrementos en la rugosidad, se puede lograr un modelo con un amplio rango de operación.

Si observamos en la Figura 10, el comportamiento de la ecuación de Panhandle A, la cual es utilizada para el modelamiento de sistemas en el régimen parcialmente turbulento, podemos ver como al utilizar un factor de eficiencia menor que 1, podríamos obtener un ajuste cercano a los datos reales de operación. De manera similar sucede con la ecuación de Weymouth, en donde para un sistema funcionando en el régimen de flujo totalmente turbulento podemos utilizar un factor de eficiencia mayor que 1 y de esa manera obtener un ajuste muy cercano a los datos reales de operación.

³³ Finch J. C. y Ko D. W. Fluid Flow Formulas. Pipeline Simulation Interest Group Annual Meeting. Toronto, Ontario, Canada (Octubre 20-21-1988).

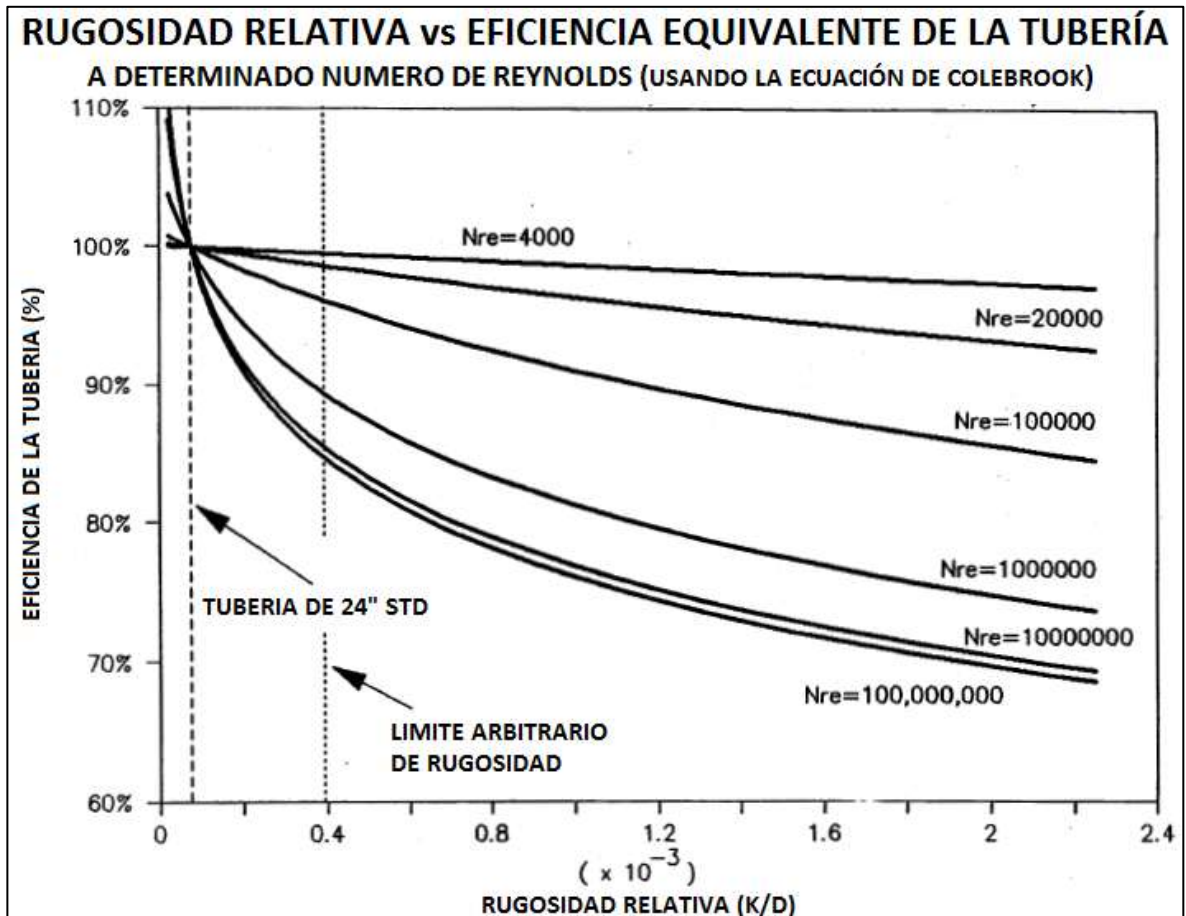
Aplicando el factor de eficiencia, vamos tras una línea de rugosidad relativa en el diagrama de Moody, por lo tanto los cambios en el factor de eficiencia no son tan drásticos como los obtenidos utilizando incrementos en la rugosidad. La Figura 11, muestra que, incrementando el número de Reynolds, pequeños cambios en la rugosidad relativa de la tubería alcanzan variaciones drásticas en la eficiencia de la tubería, lo que genera limitaciones para ajustar el modelo utilizando la rugosidad de la tubería.

Si se utiliza el factor de eficiencia de la tubería para ajustar el modelo, se puede desarrollar un modelo sin sesgo alguno. Adicionalmente el factor de eficiencia de la tubería tiene la ventaja que se comporta como una reducción en el diámetro de la tubería, por lo tanto si la tubería presenta líquidos almacenados en los valles o residuos sólidos pesados, entonces, una reducción en el diámetro, es decir una reducción en la eficiencia de la tubería, modelaría más apropiadamente el sistema.

Por otro lado, si el único requerimiento del operador al modelar el sistema es la determinación del momento en que la tubería requiere limpieza, tanto los cambios de rugosidad como los cambios en el factor de eficiencia son válidos para este proceso.

En resumen siempre es aconsejable que se fije un valor para la rugosidad de cada segmento de tubería estudiado y se realicen variaciones del factor de eficiencia para ajustar el modelo del sistema de transporte o distribución.

Figura 11. Rugosidad Relativa vs Eficiencia Equivalente de la Tubería



Fuente: inch J. C. y Ko D. W. Fluid Flow Formulas. Pipeline Simulation Interest Group Annual Meeting. Toronto, Ontario, Canada (Octubre 20-21-1988)

1.6 SENSIBILIDAD DE LOS RESULTADOS

Tal como se puede inferir de la ecuación EC 16, el Número de Reynolds no es completamente proporcional al flujo, esto debido a los cambios en la densidad del gas a través de las grandes caídas de presión. La sensibilidad de la caída de presión por cambios en el flujo es dependiente del Número de Reynolds y de la Presión Inicial o de aguas arriba. Cuando la presión inicial o de aguas arriba es grande, el incremento en la caída de presión por unidad de flujo adicional es

relativamente bajo hasta que se alcanza un límite en el Número de Reynolds en donde este delta de presión por unidad de flujo empieza a aumentar drásticamente.

En la Figura 12. Sensibilidad de la Caída de Presión al Cambio en el Flujo, se puede apreciar que el incremento en la caída de presión por unidad de flujo, para un sistema con presión inicial de 700 psia, se mantiene inalterado hasta que el número de Reynolds alcanza un valor de 1×10^7 , a partir de este valor la curva se vuelve casi vertical³⁴.

En sistemas de transporte que operan en un rango de número de Reynolds de 1×10^6 a 3×10^7 , se deben controlar los cambios en la caída de presión cuando opera a bajas presiones (<400 psig). Adicionalmente se debe tener cuidado cuando se modelen sistemas con caídas de presión mayores a 3 psi/milla (1.9 psi/km) ya que esta caída de presión aumentará rápidamente con pequeños aumentos en el flujo³⁵.

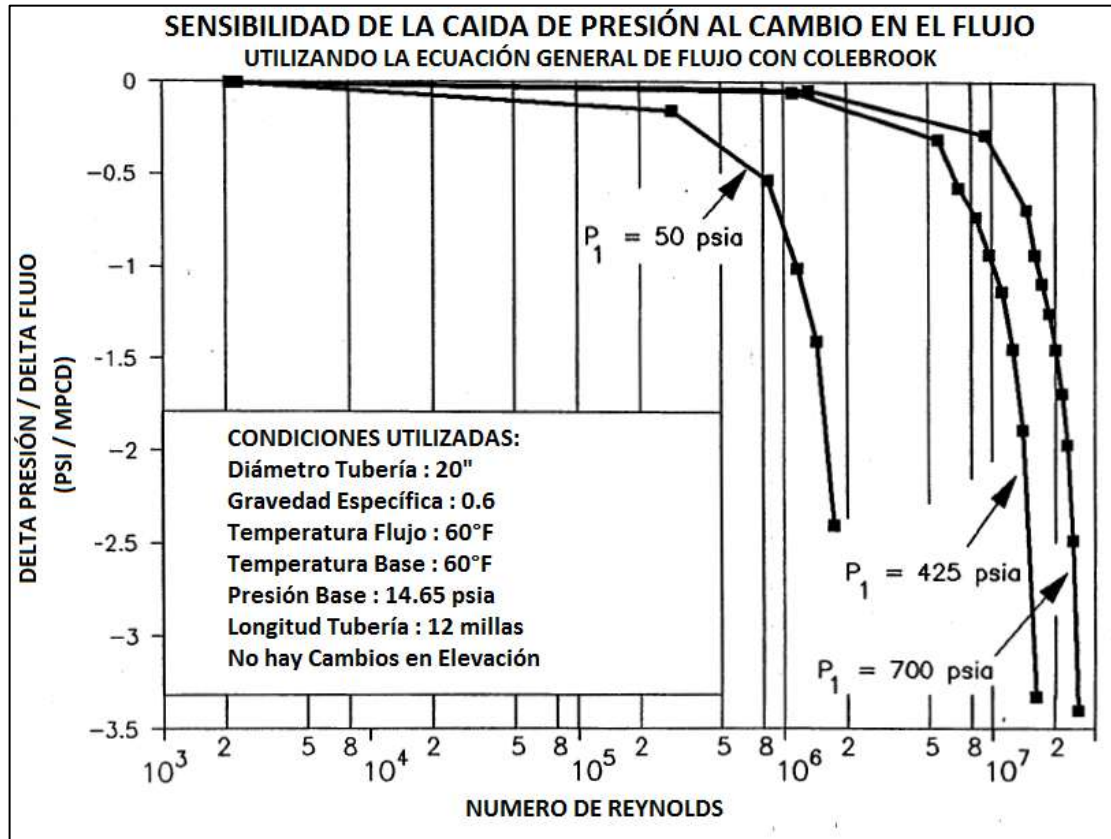
Entre menor sea la presión de operación del sistema, más cerca se tendrá el punto de inflexión de la curva en donde pequeños cambios en el flujo general grandes caídas de presión.

Por lo tanto se debe prestar mucha atención cuando se están realizando modelamientos para aumentar la capacidad de un sistema existente, especialmente si este sistema opera a bajas presiones.

³⁴ Finch J. C. y Ko D. W. Fluid Flow Formulas. Pipeline Simulation Interest Group Annual Meeting. Toronto, Ontario, Canada (Octubre 20-21-1988).

³⁵ Finch J. C. y Ko D. W. Fluid Flow Formulas. Pipeline Simulation Interest Group Annual Meeting. Toronto, Ontario, Canada (Octubre 20-21-1988).

Figura 12. Sensibilidad de la Caída de Presión al Cambio en el Flujo



Fuente: inch J. C. y Ko D. W. Fluid Flow Formulas. Pipeline Simulation Interest Group Annual Meeting. Toronto, Ontario, Canada (Octubre 20-21-1988)

2. PARAMETROS O VARIABLES CRÍTICAS PARA EL DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN EN WINFLOW-WINTRAN

En este capítulo se analizan los parámetros más importantes que intervienen en el desarrollo de un modelo de simulación de un sistema de transporte de gas natural orientado específicamente al uso del software Winflow-Wintran.

Además se revisará cada uno de estos parámetros y variables críticas dentro de un modelo simple desarrollado específicamente para este propósito, se darán las recomendaciones de optimización para el modelo de simulación actual.

2.1 PARÁMETROS O VARIABLES A TENER EN CUENTA AL MOMENTO DE DEFINIR LAS CARACTERÍSTICAS Y LAS CONDICIONES DE UN MODELO DE SIMULACIÓN.

Cuando se desarrolla un modelo de simulación es importante tener en cuenta los siguientes parámetros fundamentales para el buen funcionamiento del modelo.

- Parámetros Geométricos o de la Tubería.
- Parámetros de las características del Gas.
- Parámetros Operacionales.
- Ecuación de Flujo.

A continuación se presenta una descripción de cada uno de los parámetros establecidos anteriormente, se establece una ecuación analítica simple para determinar el impacto potencial sobre el cambio en el flujo de gas, se realiza una validación entre los datos obtenidos por la ecuación analítica simplificada y los resultados del software Winflow y finalmente se definen algunas observaciones o conclusiones.

Para los análisis que dieron origen a las tablas siguientes, se estableció un modelo de ejemplo simple que presenta las siguientes características básicas, algunas de las cuales fueron modificadas en los rangos establecidos con el fin de analizar cada uno de los impactos producidos sobre el modelo. Es importante aclarar que los valores establecidos obedecen a los rangos entre los cuales se encuentran los sistemas de transporte de Promioriente.

- Presión de Operación: Entre 1200 y 250 psig
- Volumen Transportado: Entre 10 y 100 MPCD
- Temperatura de Entrada: 60°F
- Gravedad Específica: Entre 0.564 y 0.641
- Poder Calorífico: 1000 BTU/ft³
- Longitud del Tramo: Entre 10 Km 100 Km
- Diámetro Nominal: Entre 6 y 12 Pulgadas
- Espesor: Entre 0.188 y 0.375 Pulgadas
- Eficiencia de la Tubería: 1
- Rugosidad: Entre 0.0006 y 0.001 Pulgadas
- Ecuación de Flujo: Colebrook y/o AGA
- Temperatura Ambiente/suelo: 60°F
- Altura sobre el nivel del mar: Entre 0 y 1000 metros

2.1.1 Parámetros Geométricos o de la Tubería.

Los parámetros Geométricos críticos incluyen el diámetro, la longitud, el espesor de pared, la rugosidad y factor de arrastre. Estos parámetros dependen exclusivamente de las características de la tubería instalada.

A continuación se presenta un resumen de los parámetros geométricos del modelo.

Tabla 5. Parámetros Geométricos o de la Tubería

PARAMETROS GEOMETRICOS O DE LA TUBERIA						
Parámetro	Variación Unitaria	% Cambio en el Flujo	Ecuación analítica aplicable simplificada	Cambios Utilizando Ecuación Simplificada	Cambios Utilizando Winflow	Observaciones
Diámetro	Un diámetro estándar consecutivo	30-110%	$\frac{Q_2}{Q_1} = 0.98 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{2.5}$	<ul style="list-style-type: none"> • D1=6 Q1=10 MPCD %=100 • D2=8 Q2= 20.11 MPCD %=201.1 • D1=8 Q1=20.1 MPCD %=100 • D2=10 Q2= 34.41 MPCD %=171.2 • D1=10 Q1=34.41 MPCD %=100 • D2=12 Q2= 53.2 MPCD %=154.6 • D1=36 Q1=100 MPCD %=100 	<p style="text-align: center;">Colebrook</p> <ul style="list-style-type: none"> • D1=6 Q1=10 MPCD %=100 • D2=8 Q2= 21.2 MPCD %=212 • D1=8 Q1=21.2 MPCD %=100 • D2=10 Q2= 38 MPCD %=179 • D1=10 Q1=38 MPCD %=100 • D2=12 Q2= 61 MPCD %=161 <p style="text-align: center;">AGA</p> <ul style="list-style-type: none"> • D1=6 Q1=10 MPCD 	<p>Para los diámetros pequeños, se obtienen porcentajes de variación importantes que pueden alcanzar el 100% de aumento o reducción de caudal.</p> <p>A medida que aumenta el diámetro de la tubería, el porcentaje de variación de caudal se va haciendo cada vez menor hasta alcanzar valores de entre 20% y 30%.</p> <p>La diferencia en el Porcentaje obtenido entre la ecuación analítica aplicable y el modelamiento directamente en WinFlow, radica en que el factor de fricción se considera constante</p>

PARAMETROS GEOMETRICOS O DE LA TUBERIA						
Parámetro	Variación Unitaria	% Cambio en el Flujo	Ecuación analítica aplicable simplificada	Cambios Utilizando Ecuación Simplificada	Cambios Utilizando Winflow	Observaciones
				<ul style="list-style-type: none"> D2=40 Q2=127.5 MPCD %=127.5 	<ul style="list-style-type: none"> %=100 D2=8 Q2= 21.1 MPCD %=211 D1=8 Q1=21.2 MPCD %=100 D2=10 Q2= 37.6 MPCD %=178 D1=10 Q1=38 MPCD %=100 D2=12 Q2= 60.3 MPCD %=160 	<p>en la ecuación analítica aplicable simplificada, mientras que el Winflow considera la diferencia entre los dos factores de fricción dependiendo de las condiciones de flujo.</p> $Q_b = C_1 \frac{T_b}{P_b} \sqrt{\frac{1}{f} \left[\frac{P_1^2 - P_2^2 - E}{GLTZ} \right]^{-0.5}} D^{2.5},$ <p>donde, $E = \frac{C_2 P_{av} G (H_2 - H_1)}{ZT}$</p>
Espesor de Pared	+/- 10 %	<2.5%	$\frac{Q_2}{Q_1} = \left[1 - \left(\frac{R-1}{\frac{D_0}{2Wt_1} - 1} \right) \right]^{2.5}$	<p>D0=6.625 t1:0.188" Q1=10 MPCD %=100</p> <ul style="list-style-type: none"> t2:0.219" R=1.16 Q1=9.75 	<p>AGA</p> <p>D0=6.625 t1:0.188" Q1=10 MPCD %=100</p> <ul style="list-style-type: none"> t2:0.219" R=1.16 Q1=9.75 	<p>En la medida en que va aumentando el diámetro de la tubería, se reduce la sensibilidad en el cambio del caudal transportado al cambiar el</p>

PARAMETROS GEOMETRICOS O DE LA TUBERIA						
Parámetro	Variación Unitaria	% Cambio en el Flujo	Ecuación analítica aplicable simplificada	Cambios Utilizando Ecuación Simplificada	Cambios Utilizando Winflow	Observaciones
			R=Wt2/Wt1	MPCD %=97.5 • t2:0.250" R=1.33 Q1=9.51 MPCD %=95 • t2:0.280" R=1.49 Q1=9.27 MPCD %=92.5 • t2:0.312" R=1.66 Q1=9.04 MPCD %=90 D0=12.75 t1:0.250" Q1=53.2 MPCD %=100 • t2:0.281" R=1.12 Q1=52.5 MPCD %=99 • t2:0.312" R=1.25 Q1=51.9 MPCD %=97.5 • t2:0.330" R=1.32 Q1=51.5 MPCD %=96.5 • t2:0.375" R=1.50 Q1=50.53 MPCD %=95	MPCD %=97.5 • t2:0.250" R=1.33 Q1=9.50 MPCD %=95 • t2:0.280" R=1.49 Q1=9.25 MPCD %=92.5 • t2:0.312" R=1.66 Q1=9.00 MPCD %=90 D0=12.75 t1:0.250" Q1=53.2 MPCD %=100 • t2:0.281" R=1.12 Q1=52.5 MPCD %=99 • t2:0.312" R=1.25 Q1=51.8 MPCD %=97.5 • t2:0.330" R=1.32 Q1=51.4 MPCD %=96.5 • t2:0.375" R=1.50 Q1=50.43 MPCD %=95	espesor de la tubería. Si bien es cierto que el cambio en la capacidad de transporte de una tubería es relativamente significativo al cambiar el espesor de la tubería en un diámetro estándar mayor o menor (<2.5%) especialmente cuando nos encontramos en el límite superior de capacidad de transporte del sistema de tuberías, cuando aumentamos considerablemente el espesor de la tubería debido por ejemplo a una clase de localidad 3 o 4, el cambio en la capacidad de transporte podría ser hasta de un 10%, dependiendo del diámetro de la línea, lo cual es muy significativo.

PARAMETROS GEOMETRICOS O DE LA TUBERIA						
Parámetro	Variación Unitaria	% Cambio en el Flujo	Ecuación analítica aplicable simplificada	Cambios Utilizando Ecuación Simplificada	Cambios Utilizando Winflow	Observaciones
Longitud	+/- 1 %	<0.5%	$\frac{Q_2}{Q_1} = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}}$	<p>D=6" L1=10 km Q1=50 MPCD %=100</p> <ul style="list-style-type: none"> • L2= 10.1 km Q1=49.75 MPCD %=99.5 • L2= 11 km Q1=47.67 MPCD %=95.35 <p>D=12" L1=100 km Q1=100 MPCD %=100</p> <ul style="list-style-type: none"> • L2= 101 km Q1=99.5 MPCD %=99.5 • L2= 110 km Q1=95.35 MPCD %=95.35 	<p style="text-align: center;">AGA</p> <p>D=6" L1=10 km Q1=50 MPCD %=100</p> <ul style="list-style-type: none"> • L2= 10.1 km Q1=49.75 MPCD %=99.5 • L2= 11 km Q1=47.64 MPCD %=95.30 <p>D=12" L1=100 km Q1=100 MPCD %=100</p> <ul style="list-style-type: none"> • L2= 101 km Q1=99.5 MPCD %=99.5 • L2= 110 km Q1=95.25 MPCD %=95.25 	Los errores de longitud de tubería encontrados en los levantamientos topográfico o en las corridas con herramientas ILLI, normalmente se encuentran por debajo del 1%, lo que implicaría efectos sobre el caudal transportado menores al 0.5%, lo que podría considerar como un error relativamente insignificante, sin embargo es importante ingresar la información con la mayor precisión posible para obtener los mejores resultados del modelo.

PARAMETROS GEOMETRICOS O DE LA TUBERIA						
Parámetro	Variación Unitaria	% Cambio en el Flujo	Ecuación analítica aplicable simplificada	Cambios Utilizando Ecuación Simplificada	Cambios Utilizando Winflow	Observaciones
Rugosidad	+/- 100 μ	1.5%	$\frac{Q_2}{Q_1} = 1 + \left[\frac{\log\left(\frac{ke_1}{ke_2}\right)}{\log\left(\frac{3.7D}{ke_1}\right)} \right]$	<p>D=6.125 Ke1:0.0006" Q1=10 MPCD %=100</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ke2:0.0007" Q1=9.85 MPCD %=98.5 • Ke2:0.0008" Q1=9.72 MPCD %=97.2 • Ke2:0.0009" Q1=9.61 MPCD %=96.15 • Ke2:0.001" Q1=9.51 MPCD %=95.15 <p>D=12.25 Ke1:0.0006" Q1=53.2 MPCD %=100</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ke2:0.0007" Q1=52.47 MPCD %=98.6 • Ke2:0.0008" Q1=51.84 MPCD %=97.4 	<p>AGA</p> <p>D=6.125 Ke1:0.0006" Q1=10 MPCD %=100</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ke2:0.0007" Q1=9.85 MPCD %=98.5 • Ke2:0.0008" Q1=9.73 MPCD %=97.3 • Ke2:0.0009" Q1=9.61 MPCD %=96.15 • Ke2:0.001" Q1=9.51 MPCD %=95.15 <p>D=12.25 Ke1:0.0006" Q1=53.2 MPCD %=100</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ke2:0.0007" Q1=52.47 MPCD %=98.6 • Ke2:0.0008" Q1=51.84 MPCD %=97.4 	<p>El Impacto sobre el flujo es dependiente de la relación de rugosidades.</p> <p>Teniendo en cuenta la gran incertidumbre que se presenta al momento de establecer la rugosidad interna de la tubería ya que para el diseñador podría ser fácil cambiar indiscriminadamente entre un valor de 0.0006" a un valor de 0.0009", lo cual podría significar una diferencia cercana al 4% en el caudal de transporte, es muy importante la definición de un valor de rugosidad adecuado, especialmente si se quiere llevar el sistema a su límite de capacidad máxima.</p>

PARAMETROS GEOMETRICOS O DE LA TUBERIA						
Parámetro	Variación Unitaria	% Cambio en el Flujo	Ecuación analítica aplicable simplificada	Cambios Utilizando Ecuación Simplificada	Cambios Utilizando Winflow	Observaciones
				<ul style="list-style-type: none"> • Ke2:0.0009" Q1=51.28 MPCD %=96.40 • Ke2:0.001" Q1=50.78 MPCD %=95.45 	<ul style="list-style-type: none"> • Ke2:0.0009" Q1=51.28 MPCD %=96.40 • Ke2:0.001" Q1=50.78 MPCD %=95.45 	
Factor de Arrastre	+/-1 %	1%	$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{Df_2}{Df_1}$	Al ser un factor multiplicador de toda la ecuación de caudal y con exponente 1, la variación de caudal es directamente proporcional a la variación del Factor de Arrastre.	Al ser un factor multiplicador de toda la ecuación de caudal y con exponente 1, la variación de caudal es directamente proporcional a la variación del Factor de Arrastre.	El Factor de Arrastre varía desde 0.92 a 0.98. Típicamente 0.98 para flujo Parcialmente Turbulento. Para efectos del modelamiento en Winflow-Wintran y teniendo en cuenta que tanto el factor de arrastre como el factor de eficiencia, son directamente proporcionales al caudal transportado, el factor de arrastre se tiene en cuenta al momento de definir el factor de eficiencia de la tubería.

2.1.2 Parámetros de las Características del Gas.

Los parámetros críticos que dependen de las características del gas incluyen la densidad relativa o gravedad específica, el peso molecular, la viscosidad, la compresibilidad y el poder calorífico. Estos parámetros dependen exclusivamente de la composición del fluido transportado.

A continuación se presenta un resumen de los parámetros de las características del gas que deben ser tenidos en cuenta en el modelo de simulación.

Tabla 6. Parámetros de las Características del Gas

PARAMETROS DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL GAS						
Parámetro	Variación Unitaria	% Cambio en el Flujo	Ecuación analítica aplicable simplificada	Cambios Utilizando Ecuación Simplificada	Cambios Utilizando Winflow	Observaciones
Gravedad Específica	+/- 0.01	<0.6%	$\frac{Q_2}{Q_1} = \sqrt{\frac{SG_1}{SG_2}}$	<ul style="list-style-type: none"> • SG1=0.636 Q1=50 MPCD %=100 • SG2=0.629 Q2= 50.28 MPCD %=100.55 • SG2=0.641 Q2=49.80 MPCD %=99.61 • SG2=0.564 Q2= 53.09 MPCD %=106.19 	<ul style="list-style-type: none"> • SG1=0.636 Q1=50 MPCD %=100 • SG2=0.629 Q2= 50.185 MPCD %=100.37 • SG2=0.641 Q2=49.87 MPCD %=99.74 • SG2=0.564 Q2= 52.180 MPCD %=104.36 	<p>En condiciones normales de flujo, el sistema de transporte propiedad de Promioriente, transporta gas proveniente del campo Gibraltar, y gas del campo Guajira en caso de contingencias. La gravedad específica del gas del campo Gibraltar oscila entre 0.629 y 0.641 con un valor promedio de 0.636</p> <p>La gravedad específica del gas del campo Guajira es de 0.564, valor muy estable en el tiempo.</p> <p>La diferencia entre los valores obtenidos con la ecuación simplificada y los obtenidos con el modelo, radica en suposiciones de la ecuación simplificada como que la compresibilidad del gas se mantiene constante cuando cambia la gravedad específica, mientras que en el modelo, para</p>

PARAMETROS DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL GAS						
Parámetro	Variación Unitaria	% Cambio en el Flujo	Ecuación analítica aplicable simplificada	Cambios Utilizando Ecuación Simplificada	Cambios Utilizando Winflow	Observaciones
						<p>las condiciones dadas, la compresibilidad del gas aumenta cuando la gravedad específica disminuye y viceversa.</p> <p>Al utilizar un valor de Gravedad específica para el gas Gibraltar igual 0.636, cualquier variación de la gravedad específica en el rango de posibles valores evidenciados de los datos históricos, no representará una diferencia en el caudal transportado de más del 0.4%, lo cual se puede considerar como un efecto relativamente despreciable.</p> <p>Es importante tener claridad sobre el campo que alimenta el gasoducto al momento de realizar cualquier simulación, ya que como se puede observar en los resultados, el cambio en las características entre el gas Gibraltar y el gas Guajira puede generar una variación en el caudal transportado del orden</p>

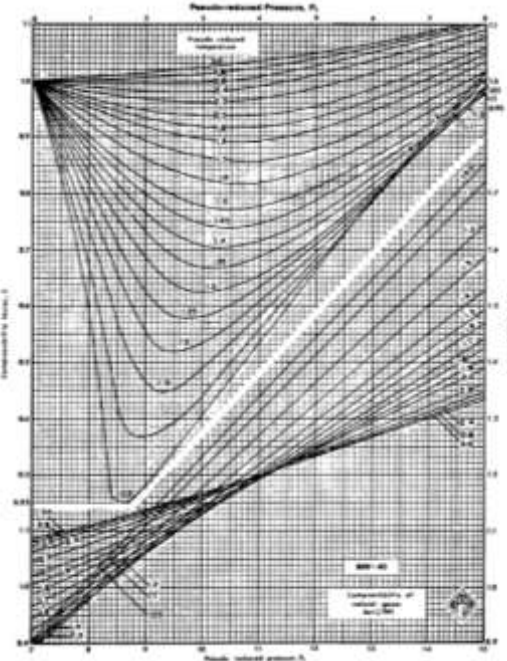
PARAMETROS DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL GAS						
Parámetro	Variación Unitaria	% Cambio en el Flujo	Ecuación analítica aplicable simplificada	Cambios Utilizando Ecuación Simplificada	Cambios Utilizando Winflow	Observaciones
						del 4% al 6%, un valor nada despreciable.
Poder Calorífico	Variable	0%	Independiente	Independiente	<p>AGA</p> <p>D=12"</p> <p>HV=1000btu/pc</p> <p>Q1=100 MPCD</p> <p>%=100</p> <ul style="list-style-type: none"> • HV=1010btu/pc Q1=100 MPCD %=100 • HV=1100btu/pc Q1=100 MPCD %=100 	<p>El caudal transportado es relativamente independiente del valor del poder calorífico, es decir, si bien es cierto que el poder calorífico depende de la composición del gas y que la composición del gas genera variaciones en el caudal transportado, estas variaciones se deben básicamente a cambios en la gravedad específica y no en el poder calorífico del gas.</p> <p>Pese a lo explicado anteriormente, el poder calorífico es un factor importante a tener en cuenta ya que los consumos de gas están referenciados a la energía necesaria y no al volumen requerido, es decir que para un punto de consumo con una demanda constante, la energía de gas entregada será siempre la misma mientras que el volumen de gas entregado puede ser mayor en caso</p>

PARAMETROS DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL GAS						
Parámetro	Variación Unitaria	% Cambio en el Flujo	Ecuación analítica aplicable simplificada	Cambios Utilizando Ecuación Simplificada	Cambios Utilizando Winflow	Observaciones
						de un gas con menor poder calorífico, o menor en caso de un gas con mayor poder calorífico. La situación anterior puede hacer que un pico de consumo diario en el mercado domiciliario sea menor y por lo tanto se podría llegar a aumentar la capacidad de flujo del sistema de transporte.
Compresibilidad	+/- 0.01	0.7%	$\frac{Q_2}{Q_1} = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}$ Para $0.825 \leq Z \leq 0.925$	<ul style="list-style-type: none"> • Z1=0.825 Q1=50 MPCD %=100 • Z2=0.835 Q2= 49.70 MPCD %=99.34 	Esta información NO es Ingresada directamente en el modelo, ya que el paquete habilitado para Promioriente, permite el ingreso de la Gravedad específica y del poder calorífico, las demás propiedades son calculadas directamente por el	El valor de compresibilidad del gas va a depender de las propiedades del gas, es decir de la composición del gas, que en nuestro caso, es calculada a través de los valores de Gravedad Específica y Poder Calorífico, y va a depender también de la presión y la temperatura a cual se encuentre el gas. Teniendo en cuenta que la presión y la temperatura a la cual se encuentra el gas van a depender de una gran cantidad de variables, se supone que estos valores de

PARAMETROS DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL GAS						
Parámetro	Variación Unitaria	% Cambio en el Flujo	Ecuación analítica aplicable simplificada	Cambios Utilizando Ecuación Simplificada	Cambios Utilizando Winflow	Observaciones
					Software mediante una ecuación de estado establecida por el usuario.	<p>presión y temperatura son constantes, entonces la compresibilidad del gas va a depender únicamente de la Gravedad Específica establecida para el gas en cuestión, por lo tanto la variabilidad en la compresibilidad del gas va a depender de la variabilidad de la Gravedad Específica, la cual fue analizada anteriormente.</p> <p>Con el fin de demostrar lo expresado anteriormente, es decir que la compresibilidad depende del valor de la Gravedad Específica, a continuación de presentan las ecuaciones de Brown (1948) para el cálculo de las temperatura y presión Pseudo-Críticas del gas, y las ecuaciones para el cálculo de la temperatura y presión Pseudo-Reducidas del gas.</p>

PARAMETROS DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL GAS						
Parámetro	Variación Unitaria	% Cambio en el Flujo	Ecuación analítica aplicable simplificada	Cambios Utilizando Ecuación Simplificada	Cambios Utilizando Winflow	Observaciones
						$T_{pc} = 168 + 325\gamma_g - 12.5\gamma_g^2 \quad T_{pr} = \frac{T}{T_{pc}}$ $P_{pc} = 677 + 15.0\gamma_g - 37.5\gamma_g^2 \quad P_{pr} = \frac{P}{P_{pc}}$ <p>Utilizando las propiedades Pseudo-Reducidas y la gráfica de Standing y Katz se puede calcular el factor de compresibilidad del gas para unas condiciones de presión y temperatura dadas.</p>

PARAMETROS DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL GAS

Parámetro	Variación Unitaria	% Cambio en el Flujo	Ecuación analítica aplicable simplificada	Cambios Utilizando Ecuación Simplificada	Cambios Utilizando Winflow	Observaciones
						
Viscosidad	+/- 10%	< 1% En Flujo Parcial	No se tiene Ecuación Simplificada	Esta información NO es Ingresada directamente en el modelo, ya que el paquete habilitado para Promioriente,		Las variaciones en la viscosidad presentan un cambio mínimo en flujos Parciamente Turbulentos.

PARAMETROS DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL GAS						
Parámetro	Variación Unitaria	% Cambio en el Flujo	Ecuación analítica aplicable simplificada	Cambios Utilizando Ecuación Simplificada	Cambios Utilizando Winflow	Observaciones
		mente Turbulento		permite el ingreso de la Gravedad específica y del poder calorífico, las demás propiedades son calculadas directamente por el Software mediante una ecuación de estado establecida por el usuario		En flujos Completamente Turbulentos no hay efecto apreciable debido a que el factor de fricción no depende del número de Reynolds y por lo tanto no depende de la viscosidad del gas.
Peso Molecular			No se tiene Ecuación Simplificada	Esta información NO es Ingresada directamente en el modelo, ya que el paquete habilitado para Promioriente, permite el ingreso de la Gravedad específica y del poder calorífico, las demás propiedades son calculadas directamente por el Software mediante una ecuación de estado establecida por el usuario		

2.1.3 Parámetros de Operación del sistema.

Los parámetros de operación críticos incluyen el caudal de entrada y de salida, la presión de entrada y de salida, la temperatura de operación y los cambios en la elevación. Estos parámetros son muy variables y se deben hacer verificaciones periódicas para identificar cambios operacionales que puedan afectar el comportamiento del modelo.

A continuación se presenta un resumen de los parámetros Operacionales que afectan el comportamiento del modelo con mayor relevancia.

Tabla 7. Parámetros Operacionales

PARAMETROS OPERACIONALES						
Parámetro	Variación Unitaria	% Cambio en el Flujo	Ecuación analítica aplicable simplificada	Cambios Utilizando Ecuación Simplificada	Cambios Utilizando Winflow	Observaciones
Temperatura	+/- 1°C	3/D% Diámetro en Centímetros	NA	NA	<p>D=6 Pulgadas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ts=60°F Q1=10 MPCD %=100 • Ts=70°F Q1=9.9 MPCD %=99 <p>D=12 Pulgadas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ts=60°F Q1=50 MPCD %=100 • Ts=70°F Q1=49.70 MPCD %=99.4 	El impacto generado sobre el caudal de gas transportado por el ducto al presentarse una variación de 10°F en la temperatura del gas, puede ser considerado como relativamente insignificante, inclusive en diámetros de tubería tan pequeños como 6 pulgadas el impacto es menor al 1%.
Presión de Operación o Presión de Entrada	+/- 14.5038 psig	2 – 2.4 %	$\frac{Z_2 Q_2^2}{Z_1 Q_1^2} = \frac{P_2^2 - P_d^2}{P_1^2 - P_d^2}$ <p>Pd=Presión Descarga</p>	<ul style="list-style-type: none"> • P1=1200 psig Z1=0.798557 Pd=773.61 psig P2=1185.5 psig 	<p>6 Pulgadas /AGA</p> <ul style="list-style-type: none"> • P1=1200 psig Z1=0.798557 Pd=773.61 psig P2=1185.5 psig 	A Mayor Presión de Operación (Presión de Descarga o presión a la entrada al gasoducto), menor será el Impacto

PARAMETROS OPERACIONALES						
Parámetro	Variación Unitaria	% Cambio en el Flujo	Ecuación analítica aplicable simplificada	Cambios Utilizando Ecuación Simplificada	Cambios Utilizando Winflow	Observaciones
			Ps=Presión Succión Para presiones entre 725 y 1450 psig.	Z2=0.800608 Q1=50 MPCD Q2=48.9 MPCD %=97.8% <ul style="list-style-type: none"> • P1=1200 psig Z1=0.798557 Pd=304.42 psig P2=1185.5 psig Z2=0.800608 Q1=63 MPCD Q2=62.1 MPCD %=98.6% • P1=800 psig Z1=0.860737 Pd=747.432psig P2=785.5 psig Z2=0.863157 Q1=15 MPCD 	Z2=0.800608 Q1=50 MPCD Q2=48.9 MPCD %=97.8% <ul style="list-style-type: none"> • P1=1200 psig Z1=0.798557 Pd=304.42 psig P2=1185.5 psig Z2=0.800608 Q1=63 MPCD Q2=62.1 MPCD %=98.6% • P1=800 psig Z1=0.860737 Pd=747.432psig P2=785.5 psig Z2=0.863157 Q1=15 MPCD 	sobre el caudal transportado. A mayor diferencia entre la presión de entrada y la presión de descarga, menor será el Impacto sobre el caudal transportado. En general se puede afirmar que: una variación ΔP dada a la entrada de un gasoducto, generará un mayor cambio en el caudal transportado que si se generara esa misma variación ΔP a la salida del gasoducto.

PARAMETROS OPERACIONALES						
Parámetro	Variación Unitaria	% Cambio en el Flujo	Ecuación analítica aplicable simplificada	Cambios Utilizando Ecuación Simplificada	Cambios Utilizando Winflow	Observaciones
				Q2=12.69 MPCD %=84.6%	Q2=12.69 MPCD %=84.6%	
Presión de Entrega	+/- 14.5038 psig	1 %	$\frac{Z_2 Q_2^2}{Z_1 Q_1^2} = \frac{P_s^2 - P_2^2}{P_s^2 - P_1^2}$ <p>Pd=Presión Descarga Ps=Presión Succión</p> <p>Para presiones entre 725 y 1450 psig.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • P1=773.61 psig Z1=0.85003 Ps=1200psig P2=759.11psig Z2=0.852041 Q1=50 MPCD Q2=50.60 MPCD %=101.2% • P1=304.39 psig Z1=0.93176 Ps=1200psig P2=289.89psig 	6 Pulgadas /AGA <ul style="list-style-type: none"> • P P1=773.6 psig Z1=0.85003 Ps=1200psig P2=759.11psig Z2=0.852041 Q1=50 MPCD Q2=50.65 MPCD %=101.3% • P1=304.39 psig Z1=0.93176 Ps=1200psig P2=289.89psig 	<p>A menor Presión de entrega (Presión a la salida del gasoducto), menor será el Impacto sobre el caudal transportado.</p> <p>A mayor diferencia entre la presión de entrada y la presión de descarga, menor será el Impacto sobre el caudal transportado.</p>

PARAMETROS OPERACIONALES						
Parámetro	Variación Unitaria	% Cambio en el Flujo	Ecuación analítica aplicable simplificada	Cambios Utilizando Ecuación Simplificada	Cambios Utilizando Winflow	Observaciones
				Z2=0.934794 Q1=63 MPCD Q2=63.1 MPCD %=100.16% • P1=747.32 psig Z1=0.87515 Ps=800psig P2=732.82psig Z2=0.876647 Q1=15 MPCD Q2=16.85 MPCD %=112.3%	Z2=0.934794 Q1=63 MPCD Q2=63.19 MPCD %=100.3% • P1=747.32 psig Z1=0.87515 Ps=800psig P2=732.82psig Z2=0.876647 Q1=15 MPCD Q2=16.85 MPCD %=112.3%	En general se puede afirmar que: una variación ΔP dada a la entrada de un gasoducto, generará un mayor cambio en el caudal transportado que si se generara esa misma variación ΔP a la salida del gasoducto.
Cambios en Elevación	+/- 100 m	1.5 %		No hay ecuación disponible	AGA $\Delta H=0$ m Q=50 MPCD %=100 $\Delta H=100$ m	Para una determinada variación de la altura, el cambio en el caudal transportado puede variar dependiendo de las características del gas

PARAMETROS OPERACIONALES						
Parámetro	Variación Unitaria	% Cambio en el Flujo	Ecuación analítica aplicable simplificada	Cambios Utilizando Ecuación Simplificada	Cambios Utilizando Winflow	Observaciones
					Q=49.45 MPCD %ΔQ=-1.1% ΔH=-100 m Q=50.55 MPCD %ΔQ=1.1% ΔH=1000 m Q=44.2 MPCD %ΔQ=-11.6% ΔH=-1000 m Q=55.2 MPCD %ΔQ=10.4%	<p>transportado. A mayor gravedad específica del gas (mayor masa molar) mayor será la variación en el caudal.</p> <p>En gasoductos que atraviesan zonas de alta montaña, como es el caso del gasoducto Gibraltar-Bucaramanga-Barrancabermeja, el factor de la altura sobre el nivel del mar es una variable muy importante que no puede despreciarse, de lo contrario se inducirán graves errores en los resultados del modelo.</p>

3. REVISIÓN DE LOS VALORES DE LOS PARAMETROS O VARIABLES REQUERIDAS PARA EL MODELO

Con el fin de realizar la verificación de los parámetros utilizados en el modelo actual y definir los parámetros a utilizar en el nuevo modelo a desarrollar, se recolecta toda la información posible de parámetros geométricos, parámetros de las características del gas, así mismo se recolecta información de los parámetros de operación del sistema de transporte en todos los puntos en comunicación por medio del sistema SCADA con el fin de verificar la calibración del modelo y realizar los ajustes requeridos.

3.1 VERIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS O PROPIOS DE LA TUBERÍA.

3.1.1 Diámetro Interno.

El cambio en el diámetro interno es una función del cambio del diámetro exterior y del cambio en el espesor de la tubería. Para la determinación del espesor de la tubería se utiliza el espesor equivalente para cada tramo establecido del ducto. Los tramos se establecen con base en la variabilidad del espesor de pared.

- **Gasoducto Gibraltar-Bucaramanga 12”:** Se utiliza la información del Libro de tubería luego de construido el gasoducto en 2011 (As-Built PipeBook) y se verifica con los certificados de compra y calidad de la tubería.

Se realiza una verificación de los valores utilizados en el modelo actual versus los valores revisados y no se encuentra ninguna diferencia importante.

A continuación se presenta una tabla con la distribución de espesores del modelo nuevo:

Tabla 8. Distribución de Espesores de Tubería GGB 12"

DISTRIBUCIÓN DE ESPESORES DE TUBERIA EN EL GASODUCTO GIBRALTAR-BUCARAMANGA 12"							
TRAMO		ESPESOR REAL (Pulg)					ESPESOR EQUIVALENTE (Pulg)
INICIO	FINAL	0.250	0.312	0.33	0.406	0.500	
PK 0+000	PK 107+044	98.01%	0.00%	0.38%	0.57%	1.04%	0.254
PK 107+044	PK132+992	64.98%	33.43%	0.00%	1.30%	0.28%	0.273
PK132+992	PK152+330	96.49%	0.00%	0.12%	0.71%	2.68%	0.258
PK152+330	PK 159+470	7.35%	0.00%	90.34%	0.00%	2.31%	0.328
PK 159+470	PK 177+152	0.00%	0.00%	0.00%	97.50%	2.50%	0.408

- **Gasoducto Barrancabermeja-Payoa 8"**: Se utiliza la información de la corrida con herramienta inteligente-ILI realizada en el año 2009 y se verifica los certificados de compra y calidad de la tubería.

Se realiza una verificación de los valores utilizados en el modelo actual versus los valores revisados y no se encuentra ninguna diferencia importante.

A continuación se presenta una tabla con la distribución de espesores del modelo nuevo:

Tabla 9. Distribución de Espesores de Tubería GBP 8"

DISTRIBUCIÓN DE ESPESORES DE TUBERIA EN EL GASODUCTO BARRANCA-PAYOA 8"						
TRAMO		ESPESOR REAL (Pulg)				ESPESOR EQUIVALENTE (Pulg)
INICIO	FINAL	0.250	0.312	0.322	0.5	
PK 0+000	PK 59+390	95.89%	0.00%	3.62%	0.49%	0.254

- **Gasoducto Payoa-Bucaramanga 8"**: Se utiliza la información de la corrida con herramienta inteligente–ILI realizada en el año 2007.

Se realiza una verificación de los valores utilizados en el modelo actual versus los valores revisados y se encuentra una diferencia entre el PK 0 y el PK 44, ya que en el modelo actual se tiene un espesor de 0.322, sin embargo la verificación arroja un espesor promedio equivalente de 0.254.

Es importante aclarar que esto no implica que el modelo actual no esté calibrado, ya que para eso se utiliza el “factor de ajuste” o de “eficiencia de la tubería”.

A continuación se presenta una tabla con la distribución de espesores del modelo nuevo:

Tabla 10. Distribución de Espesores de Tubería GPB 8"

DISTRIBUCIÓN DE ESPESORES DE TUBERIA EN EL GASODUCTO PAYOA-BUCARAMANGA 8"						
TRAMO		ESPESOR REAL (Pulg)				ESPESOR EQUIVALENTE (Pulg)
INICIO	FINAL	0.250	0.312	0.322		
PK 0+000	PK 44+000	94.79%	0.00%	5.21%		0.254
PK 44+000	PK 48+742	0.00%	0.00%	100.00%		0.322

- **Gasoducto Payoa-Bucaramanga 6”**: Se utiliza la información de la corrida con herramienta inteligente–ILI realizada en el año 2004.

Se realiza una verificación de los valores utilizados en el modelo actual versus los valores revisados y no se encuentra ninguna diferencia importante.

A continuación se presenta una tabla con la distribución de espesores del modelo nuevo:

Tabla 11. Distribución de Espesores de Tubería GPB 6"

DISTRIBUCIÓN DE ESPESORES DE TUBERIA EN EL GASODUCTO PAYOA-BUCARAMANGA 6"							
TRAMO		ESPESOR REAL (Pulg)					ESPESOR EQUIVALENTE (Pulg)
INICIO	FINAL	0.188	0.219	0.250	0.28	0.500	
PK 0+000	PK 49+500	91.09%	0.33%	4.73%	3.84%		0.195

3.1.2 Longitud.

Se realiza la verificación de la longitud de cada uno de los gasoductos que conforma el sistema de transporte de Promioriente con base en planos AS-Built y resultados de corrida con herramienta Instrumentada. En general no se encuentra ninguna diferencia con relación a la longitud de modelo actual. A continuación se presenta una tabla con el resumen de las longitudes de cada gasoducto.

Tabla 12. Longitud de Tubería

Gasoducto	Longitud (Metros)
Gibraltar - Bucaramanga 12”	177152
Barranca - Payoa 8”	59391
Payoa – Bucaramanga 8”	48742
Payoa – Bucaramanga 6”	49490

3.1.3 Rugosidad.

La rugosidad requerida en el modelo de simulación corresponde con la rugosidad efectiva y no con la rugosidad absoluta, es decir que para su definición no solo se considera la rugosidad propia de las paredes de la tubería sino también el efecto generado por la cantidad y el grado de las curvas en las líneas

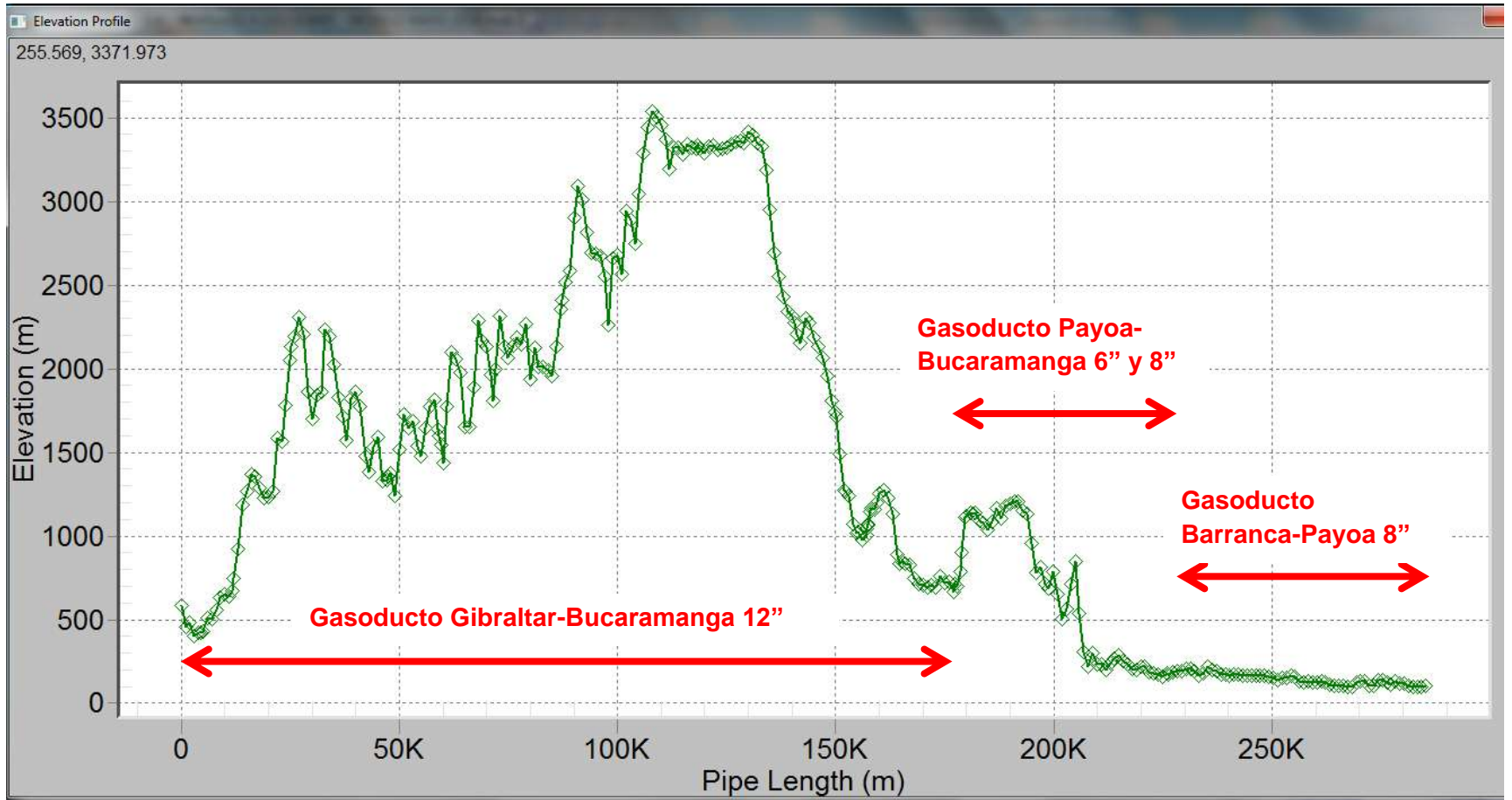
La rugosidad efectiva para una tubería que transporta gas seco y bajo condiciones RUT, a la cual se le realiza limpieza periódica cada 6 meses por medio de herramientas o raspadores de limpieza, puede asemejarse a la rugosidad presente en una tubería nueva o limpia. De acuerdo a lo establecido en el numeral 1.3” Factor de Fricción” de este documento, la rugosidad efectiva podría estar entre 0.0005 y 0.0012 pulgadas.

Teniendo en cuenta las características topográficas que deben superar cada uno de los gasoductos de Promioriente, tal como se aprecia en la Figura 13. Perfil de Elevación Sistema de Transporte de Promioriente, se definen los siguientes valor de rugosidad efectiva.

- Gasoducto Gibraltar-Bucaramanga 12”: 0.001”.
- Gasoducto Payoa-Bucaramanga 8” y 6” : 0.0008”
- Gasoducto Barrancabermeja-Payoa 8” : 0.0006”

El modelo Actual presenta un valor de rugosidad efectiva de 0.0006” para todo el sistema de transporte de Promioriente. Es importante aclarar que esto no implica que el modelo actual no esté calibrado, ya que para eso se utiliza el “factor de ajuste” o de “eficiencia de la tubería”.

Figura 13. Perfil de Elevación Sistema de Transporte de Promioriente



3.2 VERIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL GAS.

3.2.1 Gravedad Específica.

Si bien es cierto que la Gravedad Específica de un gas puede variar considerablemente dependiendo de la composición química del gas en el yacimiento y de los procesos de tratamiento y procesamiento del gas en la planta de procesamiento, es posible obtener un valor promedio o característico de la gravedad específica del gas Gibraltar analizando algunos datos históricos.

Es importante dejar absoluta claridad en que esta variable debe ser monitoreada periódicamente para verificar los cambios en el tiempo y así poder hacer las correcciones respectivas al momento de realizar cualquier simulación con el modelo establecido.

Luego de analizar un total de 2292 registros de Gravedad específica tomados durante el mes de junio de 2014, se obtienen los siguientes resultados:

Figura 14. Histograma Registros de Gravedad Específica

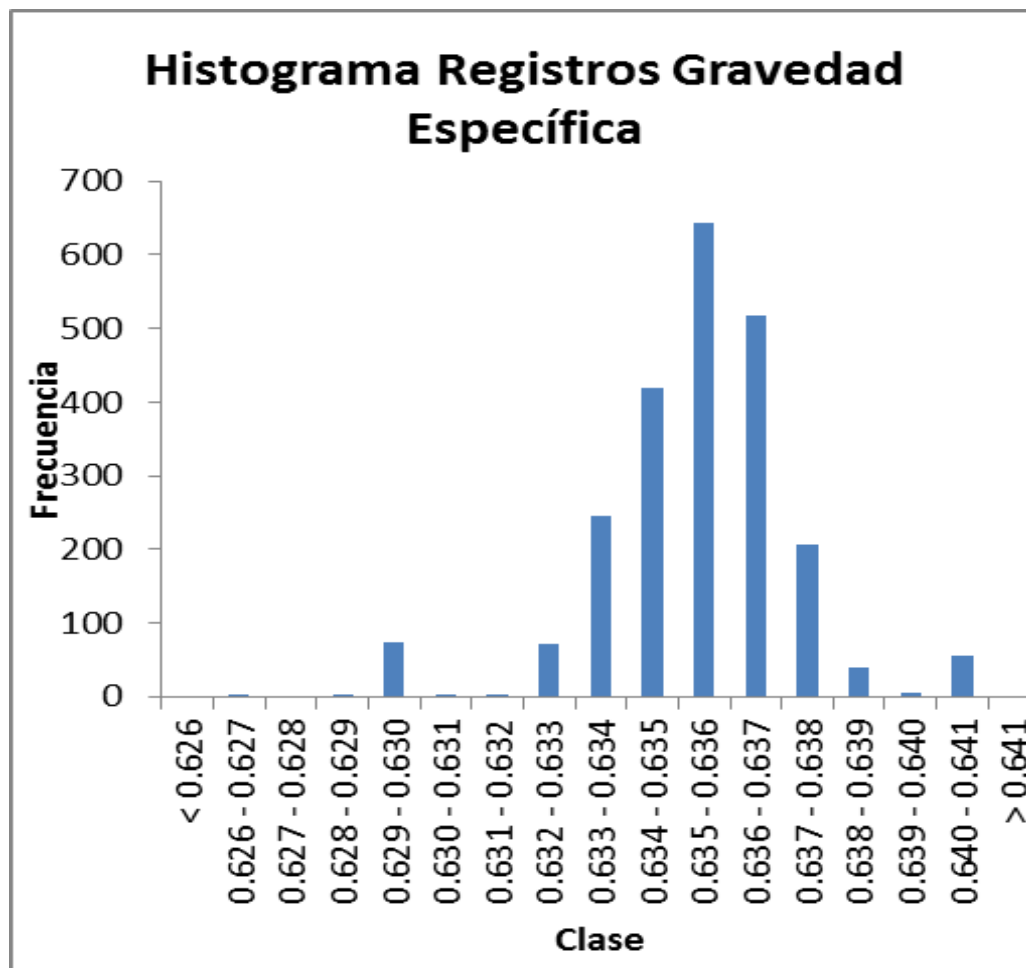


Tabla 13. Tabulación Histograma Registros de Gravedad Específica

Resumen Histograma Registros Gravedad Específica	
Clase	Frecuencia
< 0.626	0
0.626 - 0.627	1
0.627 - 0.628	0
0.628 - 0.629	4
0.629 - 0.630	75
0.630 - 0.631	2
0.631 - 0.632	2
0.632 - 0.633	73
0.633 - 0.634	246
0.634 - 0.635	419
0.635 - 0.636	644
0.636 - 0.637	518
0.637 - 0.638	206
0.638 - 0.639	39
0.639 - 0.640	6
0.640 - 0.641	57
> 0.641	0
MAXIMO	0.6406
PROMEDIO	0.6354
MINIMO	0.6264

La gravedad Específica promedio es 0.6354, adicionalmente y de acuerdo al histograma presentado, el 89% de los registros de gravedad específica se encuentra entre 0.633 y 0.638. Tal como fue demostrado en el capítulo 2 de este documento, una variación de la gravedad específica en este rango, no generará un impacto superior al 0.3% en el caudal transportado.

El valor de Gravedad específica que se toma para el nuevo modelo será de 0.6355 en comparación con el 0.635 del modelo actual.

3.2.2 Compresibilidad.

La compresibilidad de un gas depende de la composición del gas y de la presión y la temperatura a la cual se encuentra. Dentro de los componentes de un gas natural también se encuentran los gases no combustibles y/o compuestos “contaminantes”, los cuales es muy importante tener en cuenta a la hora de establecer la compresibilidad del gas.

Dentro del módulo de simulación WINFLOW, se encuentra la opción para establecer la composición completa del gas y con la ayuda de una ecuación como el AGA 8, calcular las características del gas, sin embargo el módulo habilitado para Promioriente solo permite la opción de ingresar la gravedad específica y el poder calorífico, con base en esta información y utilizando una ecuación como la NX19, el software calcula la compresibilidad del gas. Este software ya está desactualizado a partir de la última publicación del AGA 8

Cuando se utiliza la ecuación NX19, el software da la opción para considerar los compuestos contaminantes CO₂ y N₂. El modelo actual no establece estos valores, así que el nuevo modelo si tendrá en cuenta la cantidad de estos compuestos contaminantes con base en valores promedio de datos históricos.

A continuación se presentan los pantallazos de un modelo sencillo de prueba en donde se aprecia la importancia de determinar los valores de CO₂ o N₂ para el cálculo de la compresibilidad del gas.

En las imágenes se puede apreciar que existe una diferencia de poco más de 22 psig en el punto de entrega, simplemente con la adición de los valores de CO₂ y N₂.

Figura 15. Resultados modelo sin tener en cuenta los gases contaminantes

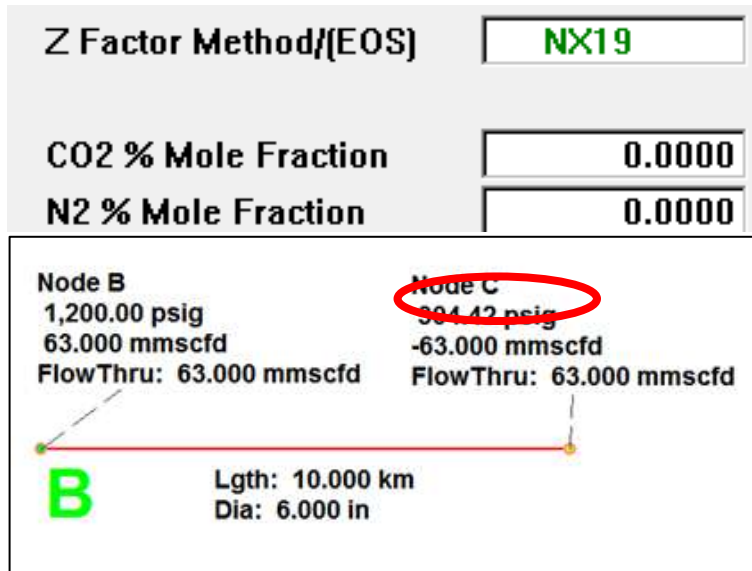
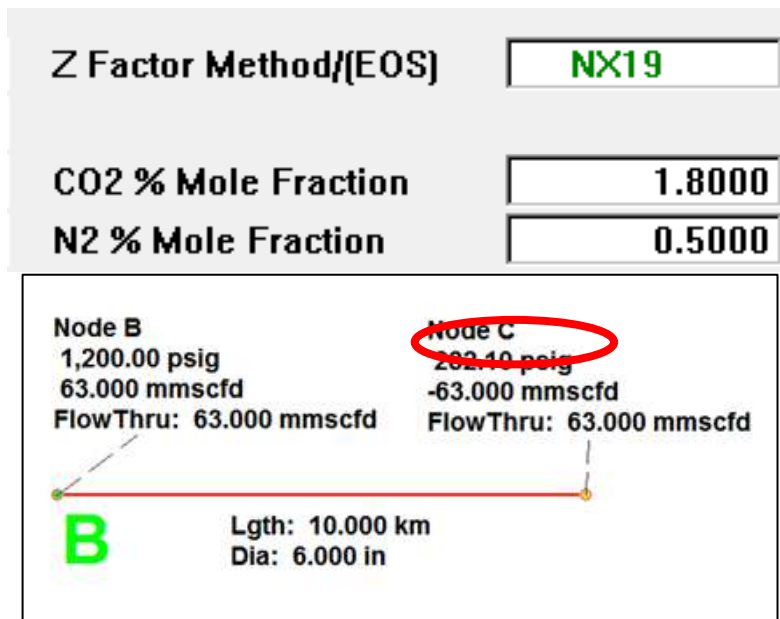


Figura 16. Resultados modelo teniendo en cuenta los gases contaminantes



A continuación se presenta el análisis de los registros de CO2 para determinar su valor promedio.

Tabla 14. Registros CO2 de junio de 2014

CO2 REGISTROS JUNIO 2014											
1.773	1.765	1.78	1.78	1.773	1.782	1.766	1.773	1.772	1.789		
1.788	1.764	1.771	1.786	1.796	1.766	1.767	1.78	1.78	1.774		
1.773	1.786	1.771	1.75	1.773	1.773	1.782	1.788	1.779	1.766		
1.773	1.771	1.77	1.779	1.773	1.788	1.775	1.78	1.779	1.788		
1.759	1.769	1.779	1.778	1.773	1.774	1.782	1.779	1.787	1.781		
1.789	1.789	1.785	1.765	1.765	1.782	1.78	1.771	1.778	1.787		
1.766	1.781	1.779	1.765	1.767	1.782	1.78	1.779	1.778	1.776		
1.78	1.796	1.778	1.801	1.774	1.775	1.765	1.77	1.77	1.772		
1.768	1.771	1.772	1.772	1.774	1.789	1.771	1.789	1.779	1.779		
1.783	1.77	1.771	1.799	1.781	1.788	1.772	1.778	1.754	1.773		
1.771	1.788	1.772	1.795	1.781	1.766	1.763	1.774	1.78	1.772		
1.778	1.773	1.763	1.778	1.789	1.789	1.781	1.756	1.774	1.772		
1.774	1.77	1.778	1.778	1.781	1.775	1.758	1.786	1.762	1.78		
1.772	1.773	1.778	1.779	1.766	1.773	1.789	1.779	1.771	1.773		
1.763	1.788	1.788	1.788	1.774	1.775	1.774	1.772	1.786	1.795		
1.783	1.779	1.781	1.779	1.774	1.773	1.772	1.778	1.788	1.772		
1.774	1.78	1.788	1.773	1.767	1.773	1.774	1.78	1.764	1.781		
1.765	1.773	1.7881	1.781	1.774	1.766	1.775	1.78	1.765	1.782		
1.779	1.765	1.78	1.772	1.789	1.773	1.78	1.778	1.766	1.789		
1.787	1.771	1.787	1.766	1.766	1.789	1.774	1.779	1.773	1.781		
1.786	1.772	1.779	1.781	1.782	1.781	1.757	1.771	1.772	1.781		
1.786	1.781	1.78	1.766	1.775	1.775	1.789	1.765	1.764	1.764		
1.788	1.785	1.789	1.781	1.775	1.768	1.787	1.788	1.787	1.781		
1.779	1.78	1.781	1.766	1.789	1.784	1.781	1.772	1.773	1.787		

CO2 REGISTROS JUNIO 2014											
1.774	1.78	1.765	1.78	1.773	1.777	1.766	1.78	1.78	1.773	1.78	1.773
1.782	1.773	1.775	1.781	1.781	1.769	1.758	1.763	1.788	1.787	1.781	1.781
1.774	1.773	1.78	1.765	1.773	1.762	1.773	1.772	1.781	1.781	1.781	1.781
1.774	1.781	1.758	1.774	1.78	1.786	1.757	1.771	1.772	1.758	1.781	1.781
1.789	1.765	1.781	1.773	1.78	1.786	1.765	1.773	1.772	1.78	1.781	1.781
1.781	1.772	1.787	1.774	1.778	1.769	1.763	1.78	1.779	1.78	1.781	1.781
1.781	1.778	1.764	1.773	1.772	1.771	1.757	1.779	1.779	1.779	1.781	1.781
1.78	1.771	1.7811	1.766	1.764	1.77	1.757	1.88	1.764	1.774	1.781	1.781
1.779	1.762	1.7707	1.78	1.7808	1.786	1.767	1.763	1.771	1.781	1.781	1.781
1.781	1.762	1.772	1.771	1.78	1.766	1.763	1.78	1.7709	1.782	1.781	1.781
1.781	1.771	1.7721	1.771	1.779	1.753	1.779	1.762	1.789	1.765	1.781	1.781
1.781	1.779	1.78	1.771	1.777	1.763	1.764	1.771	1.78	1.781	1.781	1.781
1.772	1.765	1.787	1.766	1.786	1.773	1.765	1.772	1.787	1.773	1.781	1.781
1.781	1.774	1.765	1.774	1.771	1.763	1.772	1.779	1.773	1.772	1.781	1.781
1.788	1.774	1.772	1.773	1.765	1.772	1.78	1.781	1.78	1.788	1.781	1.781
1.787	1.789	1.765	1.764	1.78	1.763	1.774	1.774	1.773	1.775	1.781	1.781
1.788	1.758	1.727	1.788	1.758	1.448	1.662	1.781	1.766	1.779	1.781	1.781
1.758	1.766	1.7805	1.744	1.7638	1.772	1.78	1.78	1.778	1.78	1.781	1.781
1.7661	1.774	1.781	1.781	1.778	1.779	1.78	1.78	1.772	1.779	1.781	1.781
1.767	1.7504	1.788	1.781	1.771	1.787	1.786	1.779	1.773	1.782	1.781	1.781
1.767	1.773	1.771	1.772	1.771	1.777	1.771	1.773	1.764	1.782	1.781	1.781
1.758	1.781	1.758	1.764	1.785	1.753	1.763	1.781	1.788	1.781	1.781	1.781
1.775	1.78	1.781	1.789	1.792	1.764	1.78	1.766	1.773	1.781	1.781	1.781
1.78	1.78	1.779	1.78	1.784	1.764	1.771	1.788	1.772	1.781	1.781	1.781
CO2 REGISTROS JUNIO 2014											
1.788	1.772	1.764	1.781	1.772	1.766	1.78	1.781	1.752	1.772	1.781	1.781
1.772	1.781	1.781	1.779	1.788	1.781	1.797	1.774	1.78	1.772	1.781	1.781
1.78	1.781	1.758	1.78	1.78	1.787	1.773	1.772	1.787	1.77	1.781	1.781
1.781	1.766	1.78	1.764	1.771	1.757	1.789	1.79	1.772	1.788	1.781	1.781
1.774	1.779	1.773	1.784	1.772	1.78	1.781	1.789	1.781	1.787	1.781	1.781
1.789	1.788	1.772	1.787	1.774	1.758	1.772	1.78	1.78	1.766	1.781	1.781
1.7887	1.7661	1.765	1.763	1.772	1.764	1.772	1.78	1.788	1.78	1.781	1.781
1.7797	1.7802	1.7799	1.786	1.788	1.764	1.794	1.779	1.771	1.781	1.781	1.781
1.774	1.78	1.7517	1.788	1.773	1.779	1.779	1.779	1.771		1.781	1.781
1.773	1.7802	1.7584	1.771	1.772	1.772	1.788	1.779	1.779		1.781	1.781
1.773	1.788	1.781	1.779	1.77	1.763	1.78	1.764	1.778		1.781	1.781
1.773	1.7502	1.778	1.765	1.772	1.779	1.773	1.787	1.7762		1.781	1.781
1.7736	1.7886	1.7724	1.779	1.771	1.781	1.773	1.772	1.77		1.781	1.781
1.766	1.766	1.787	1.781	1.787	1.766	1.788	1.766	1.779		1.781	1.781
1.765	1.767	1.772	1.78	1.778	1.773	1.788	1.788	1.772		1.781	1.781
1.781	1.7734	1.773	1.778	1.785	1.773	1.773	1.764	1.789		1.781	1.781
1.779	1.788	1.781	1.765	1.787	1.773	1.781	1.788	1.789		1.781	1.781
1.765	1.7802	1.773	1.779	1.787	1.775	1.774	1.773	1.788		1.781	1.781
1.78	1.787	1.775	1.773	1.767	1.774	1.789	1.78	1.789		1.781	1.781
1.774	1.78	1.765	1.773	1.766	1.773	1.781	1.78	1.788		1.781	1.781
1.779	1.789	1.781	1.78	1.788	1.774	1.773	1.771	1.767		1.781	1.781
1.766	1.797	1.7938	1.788	1.773	1.787	1.788	1.782	1.766		1.781	1.781
1.766	1.772	1.7786	1.773	1.772	1.772	1.773	1.796	1.788		1.781	1.781
1.766	1.795	1.775	1.65	1.774	1.778	1.766	1.781	1.778		1.781	1.781
MAXIMO	1.880										
PROMEDIO	1.775										
MINIMO	1.448										

Se establece como valor promedio CO2: 1.775 % Molar

A continuación se presenta el análisis de los registros de N2 durante el mes de junio de 2014 con el fin de determinar su valor promedio.

Tabla 15. Registros N2 de junio de 2014

N2 REGISTROS JUNIO 2014															
0.750	0.759	0.761	0.713	0.758	0.761	0.723	0.736	0.741	0.736	0.723	0.745	0.760	0.731	0.719	0.724
0.728	0.751	0.752	0.749	0.755	0.733	0.745	0.727	0.742	0.734	0.730	0.739	0.703	0.750	0.716	0.723
0.746	0.735	0.750	0.770	0.753	0.759	0.760	0.719	0.726	0.723	0.732	0.720	0.699	0.734	0.727	0.729
0.758	0.732	0.743	0.744	0.759	0.732	0.743	0.732	0.731	0.745	0.738	0.733	0.712	0.731	0.708	0.744
0.745	0.746	0.752	0.755	0.725	0.750	0.736	0.742	0.737	0.731	0.738	0.698	0.754	0.726	0.753	0.738
0.735	0.737	0.719	0.739	0.741	0.753	0.742	0.725	0.731	0.711	0.740	0.742	0.733	0.725	0.738	0.730
0.747	0.736	0.752	0.744	0.742	0.748	0.745	0.720	0.754	0.728	0.734	0.702	0.707	0.763	0.725	0.723
0.736	0.746	0.730	0.739	0.720	0.738	0.755	0.745	0.707	0.738	0.713	0.728	0.733	0.739	0.720	0.742
0.728	0.750	0.777	0.725	0.752	0.758	0.734	0.729	0.750	0.722	0.721	0.733	0.723	0.742	0.729	0.704
0.753	0.743	0.746	0.749	0.755	0.744	0.761	0.744	0.711	0.753	0.703	0.719	0.714	0.759	0.727	0.754
0.745	0.760	0.763	0.750	0.739	0.754	0.740	0.738	0.710	0.722	0.734	0.721	0.735	0.755	0.729	0.741
0.751	0.761	0.730	0.747	0.753	0.754	0.757	0.708	0.745	0.770	0.719	0.761	0.760	0.737	0.748	0.730
0.752	0.743	0.756	0.738	0.738	0.769	0.719	0.734	0.730	0.727	0.727	0.734	0.723	0.745	0.727	0.726
0.727	0.728	0.757	0.755	0.756	0.752	0.752	0.735	0.725	0.719	0.736	0.727	0.708	0.723	0.733	0.740
0.764	0.756	0.745	0.748	0.721	0.748	0.723	0.713	0.742	0.721	0.734	0.741	0.720	0.720	0.738	0.744
0.756	0.757	0.739	0.742	0.750	0.759	0.758	0.728	0.746	0.746	0.748	0.719	0.733	0.733	0.748	0.736
0.764	0.753	0.743	0.737	0.769	0.728	0.749	0.739	0.740	0.723	0.742	0.707	0.720	0.746	0.763	0.738
0.759	0.760	0.736	0.742	0.732	0.743	0.755	0.750	0.739	0.735	0.717	0.718	0.765	0.757	0.735	0.742
0.745	0.757	0.751	0.751	0.726	0.742	0.743	0.747	0.723	0.729	0.724	0.735	0.715	0.721	0.747	0.748
0.744	0.721	0.758	0.746	0.781	0.757	0.746	0.746	0.721	0.727	0.740	0.730	0.748	0.742	0.722	0.721
0.736	0.769	0.735	0.760	0.742	0.741	0.726	0.724	0.726	0.742	0.726	0.710	0.730	0.767	0.736	0.771
0.729	0.742	0.708	0.749	0.761	0.727	0.758	0.734	0.715	0.746	0.751	0.726	0.750	0.731	0.716	0.722
0.724	0.747	0.760	0.744	0.753	0.735	0.764	0.731	0.737	0.760	0.736	0.704	0.732	0.715	0.734	0.729
0.741	0.738	0.760	0.756	0.748	0.746	0.760	0.739	0.732	0.748	0.729	0.744	0.723	0.709	0.749	0.726
0.762	0.747	0.735	0.736	0.764	0.755	0.738	0.735	0.742	0.716	0.748	0.730	0.750	0.741	0.730	0.750
0.746	0.757	0.731	0.727	0.756	0.750	0.745	0.724	0.715	0.752	0.718	0.726	0.716	0.748	0.739	0.742
0.755	0.749	0.750	0.748	0.745	0.746	0.741	0.711	0.750	0.738	0.715	0.720	0.733	0.735	0.719	0.711
0.748	0.771	0.748	0.738	0.750	0.734	0.751	0.726	0.730	0.721	0.737	0.713	0.734	0.743	0.732	0.716
0.738	0.731	0.755	0.748	0.732	0.744	0.750	0.729	0.740	0.729	0.735	0.738	0.714	0.714	0.730	0.748
0.755	0.750	0.754	0.727	0.761	0.748	0.749	0.714	0.750	0.734	0.723	0.758	0.750	0.742	0.728	0.728
0.737	0.740	0.748	0.739	0.734	0.747	0.734	0.741	0.730	0.736	0.745	0.753	0.724	0.727	0.730	0.721
0.743	0.754	0.738	0.759	0.748	0.754	0.731	0.720	0.731	0.708	0.745	0.737	0.749	0.727	0.739	0.740
0.737	0.755	0.757	0.745	0.726	0.732	0.747	0.725	0.738	0.728	0.737	0.727	0.730	0.748	0.761	0.744
0.768	0.738	0.764	0.756	0.755	0.753	0.731	0.749	0.727	0.735	0.738	0.737	0.746	0.718	0.723	0.718
0.727	0.756	0.748	0.755	0.732	0.724	0.732	0.734	0.727	0.721	0.716	0.728	0.735	0.735	0.728	0.749
0.750	0.765	0.751	0.741	0.752	0.739	0.748	0.713	0.746	0.734	0.749	0.731	0.762	0.703	0.721	0.746
0.754	0.742	0.749	0.746	0.733	0.742	0.739	0.716	0.758	0.723	0.733	0.714	0.705	0.720	0.730	0.711
0.733	0.745	0.728	0.768	0.732	0.746	0.756	0.739	0.737	0.740	0.707	0.728	0.762	0.724	0.743	0.754
0.745	0.735	0.733	0.732	0.760	0.770	0.760	0.734	0.722	0.719	0.722	0.752	0.708	0.741	0.736	0.714
0.751	0.737	0.761	0.749	0.741	0.740	0.751	0.743	0.742	0.718	0.738	0.742	0.718	0.730	0.732	0.746
0.736	0.750	0.761	0.749	0.749	0.750	0.739	0.723	0.744	0.734	0.752	0.732	0.746	0.757	0.742	0.733
0.748	0.754	0.744	0.751	0.776	0.754	0.747	0.744	0.727	0.724	0.733	0.725	0.736	0.750	0.728	0.719
0.756	0.726	0.757	0.721	0.759	0.758	0.741	0.721	0.715	0.747	0.762	0.742	0.723	0.725	0.715	0.766
0.737	0.771	0.745	0.761	0.771	0.752	0.723	0.754	0.758	0.731	0.738	0.729	0.720	0.711	0.726	0.725
0.750	0.750	0.754	0.763	0.765	0.735	0.747	0.746	0.734	0.731	0.760	0.705	0.748	0.730	0.739	0.710
0.757	0.746	0.748	0.757	0.770	0.775	0.749	0.721	0.723	0.740	0.734	0.727	0.734	0.704	0.734	0.733
0.747	0.723	0.757	0.709	0.742	0.741	0.760	0.735	0.729	0.736	0.719	0.717	0.730	0.750	0.716	0.765

N2 REGISTROS JUNIO 2014															
0.736	0.734	0.748	0.743	0.739	0.747	0.733	0.718	0.741	0.726	0.723	0.746	0.730	0.725	0.744	0.716
0.753	0.741	0.757	0.770	0.747	0.761	0.742	0.727	0.707	0.715	0.749	0.735	0.719	0.757	0.745	0.766
0.738	0.743	0.743	0.740	0.733	0.724	0.727	0.731	0.726	0.730	0.723	0.715	0.729	0.721	0.727	0.723
0.751	0.759	0.753	0.727	0.756	0.750	0.749	0.713	0.728	0.736	0.749	0.735	0.719	0.730	0.751	0.723
0.739	0.745	0.738	0.756	0.751	0.741	0.743	0.732	0.741	0.773	0.734	0.734	0.724	0.736	0.719	0.729
0.749	0.744	0.728	0.764	0.739	0.732	0.748	0.730	0.747	0.723	0.709	0.737	0.722	0.723	0.739	0.731
0.730	0.742	0.745	0.740	0.754	0.773	0.754	0.728	0.738	0.754	0.716	0.730	0.753	0.708	0.741	0.700
0.751	0.758	0.752	0.742	0.763	0.765	0.722	0.712	0.747	0.749	0.732	0.728		0.725	0.737	0.766
0.775	0.744	0.760	0.732	0.753	0.756	0.743	0.731	0.734	0.738	0.725	0.730		0.726	0.737	0.743
0.728	0.737	0.749	0.714	0.748	0.740	0.740	0.732	0.735	0.737	0.723	0.729		0.727	0.736	0.746
0.728	0.765	0.765	0.716	0.765	0.747	0.743	0.756	0.734	0.719	0.735	0.738		0.732	0.735	0.707
0.752	0.742	0.754	0.740	0.756	0.736	0.728	0.729	0.728	0.732	0.744	0.723		0.755	0.720	0.732
0.744	0.731	0.755	0.751	0.723	0.746	0.743	0.741	0.730	0.746	0.727	0.743		0.765	0.715	0.750
0.752	0.743	0.759	0.733	0.766	0.739	0.727	0.730	0.734	0.739	0.730	0.726	0.663	0.722	0.712	0.742
0.733	0.751	0.754	0.753	0.760	0.737	0.741	0.734	0.737	0.734	0.731	0.721	0.719	0.732	0.753	0.739
0.747	0.743	0.748	0.727	0.751	0.763	0.769	0.734	0.733	0.737	0.730	0.719	0.725	0.747	0.707	0.731
0.735	0.728	0.745	0.751	0.761	0.743	0.736	0.723	0.723	0.738	0.729	0.741	0.740	0.730	0.717	0.727
0.741	0.771	0.739	0.731	0.760	0.743	0.757	0.746	0.719	0.730	0.736	0.727	0.727	0.745	0.741	0.741
0.759	0.739	0.748	0.758	0.751	0.753	0.734	0.746	0.727	0.727	0.722	0.751	0.706	0.744	0.742	0.729
0.734	0.731	0.762	0.750	0.745	0.761	0.736	0.730	0.717	0.711	0.734	0.723	0.730	0.720	0.721	0.742
0.753	0.768	0.761	0.724	0.709	0.762	0.726	0.725	0.739	0.746	0.755	0.722	0.740	0.742	0.715	0.744
0.730	0.742	0.744	0.732	0.748	0.764	0.734	0.739	0.743	0.715	0.713	0.719	0.704	0.746	0.741	0.724
0.744	0.755	0.737	0.749	0.761	0.746	0.737	0.739	0.740	0.730	0.720	0.741	0.710	0.724	0.736	0.729
0.755	0.733	0.752	0.751	0.746	0.738	0.745	0.704	0.714	0.728	0.722	0.739	0.727	0.706	0.738	0.735
0.747	0.759	0.764	0.746	0.736	0.736	0.757	0.739	0.747	0.745	0.722	0.743	0.731	0.734	0.737	0.723
0.757	0.750	0.750	0.752	0.734	0.748	0.756	0.734	0.723	0.712	0.711	0.730	0.737	0.744	0.721	0.724
0.754	0.741	0.746	0.764	0.719	0.742	0.744	0.729	0.751	0.728	0.747	0.746	0.734	0.754	0.746	0.757
0.739	0.763	0.761	0.756	0.758	0.742	0.736	0.729	0.745	0.716	0.720	0.744	0.730	0.723	0.715	0.740
0.749	0.724	0.759	0.727	0.738	0.738	0.751	0.719	0.742	0.725	0.748	0.722	0.716	0.734	0.728	0.749
0.734	0.754	0.741	0.750	0.758	0.744	0.743	0.728	0.733	0.735	0.738	0.742	0.726	0.702	0.730	0.746
0.731	0.733	0.748	0.732	0.749	0.767	0.742	0.740	0.746	0.734	0.741	0.746	0.721	0.742	0.745	0.723
0.725	0.752	0.755	0.743	0.743	0.741	0.748	0.746	0.712	0.732	0.721	0.742	0.725	0.752	0.722	0.746
0.757	0.752	0.748	0.746	0.760	0.754	0.729	0.738	0.734	0.721	0.734	0.739	0.751	0.749	0.717	0.715
0.765	0.737	0.750	0.776	0.743	0.779	0.742	0.722	0.745	0.745	0.738	0.738	0.721	0.725	0.735	0.717
0.738	0.740	0.758	0.744	0.735	0.740	0.746	0.727	0.758	0.739	0.732	0.769	0.741	0.750	0.719	0.728
0.733	0.731	0.749	0.731	0.742	0.747	0.746	0.749	0.724	0.735	0.729	0.722	0.703	0.738	0.749	0.717
0.773	0.743	0.753	0.728	0.746	0.765	0.761	0.720	0.736	0.735	0.730	0.723	0.723	0.727	0.731	0.731
0.736	0.751	0.729	0.749	0.750	0.735	0.748	0.733	0.730	0.755	0.735	0.715	0.749	0.723	0.735	0.746
0.758	0.739	0.755	0.738	0.751	0.768	0.763	0.752	0.736	0.738	0.740	0.722	0.743	0.733	0.744	0.750
0.755	0.750	0.734	0.769	0.754	0.761	0.741	0.724	0.743	0.731	0.730	0.744	0.730	0.715	0.746	0.728
0.738	0.754	0.755	0.760	0.742	0.735	0.749	0.727	0.728	0.743	0.743	0.734	0.731	0.756	0.728	0.757
0.766	0.758	0.750	0.744	0.768	0.737	0.728	0.752	0.738	0.730	0.734	0.732	0.727	0.741	0.742	0.738
0.745	0.760	0.737	0.730	0.744	0.758	0.746	0.721	0.742	0.713	0.742	0.707	0.761	0.733	0.745	0.732
0.755	0.733	0.732	0.754	0.744	0.749	0.747	0.731	0.724	0.713	0.744	0.717	0.731	0.739	0.722	0.721
0.746	0.737	0.732	0.749	0.769	0.757	0.756	0.726	0.712	0.739	0.735	0.710	0.744	0.734	0.740	0.753
0.755	0.757	0.757	0.758	0.745	0.740	0.738	0.741	0.727	0.738	0.723	0.742	0.750	0.737	0.727	0.711
0.750	0.760	0.731	0.727	0.757	0.751		0.731	0.728	0.727	0.723	0.741	0.727	0.742	0.746	0.742
0.725	0.725	0.750	0.743	0.760	0.750	0.741	0.735	0.761	0.732	0.727	0.736	0.726	0.738	0.706	0.757

N2 REGISTROS JUNIO 2014															
0.759	0.760	0.754	0.754	0.750	0.770	0.721	0.727	0.727	0.735	0.726	0.737	0.743	0.728	0.724	0.735
0.735	0.742	0.740	0.773		0.744	0.727	0.731	0.754	0.728	0.723	0.745	0.743	0.734	0.748	0.737
0.750	0.760	0.753	0.735		0.736	0.723	0.719	0.736	0.724	0.733	0.721	0.717	0.718	0.752	0.726
0.742	0.724	0.752	0.752		0.745	0.723	0.715	0.731	0.731	0.748	0.736	0.737	0.714	0.739	0.737
0.777	0.742	0.763	0.741		0.745	0.747	0.746	0.719	0.727	0.715	0.712	0.728	0.757	0.722	0.721
0.746	0.749	0.752	0.762		0.753	0.729	0.739	0.726	0.730	0.719	0.746	0.700	0.718	0.747	0.726
0.768	0.756	0.746	0.750	0.744	0.741	0.750	0.731	0.745	0.744	0.746	0.738	0.757	0.727	0.747	0.757
0.741	0.733	0.744	0.757	0.713	0.739	0.732	0.724	0.724	0.727	0.739	0.736	0.739	0.741	0.750	0.732
0.750	0.765	0.762	0.731	0.749	0.758	0.746	0.731	0.730	0.716	0.748	0.734	0.731	0.748	0.728	0.732
0.740	0.732	0.742	0.737	0.753	0.751	0.753	0.724	0.734	0.722	0.726	0.716	0.748	0.711	0.719	0.732
0.753	0.762	0.727	0.740	0.742	0.747	0.723	0.754	0.734	0.727	0.719	0.715	0.742	0.725	0.730	0.732
0.740	0.747	0.765	0.752	0.757	0.755	0.734	0.716	0.732	0.719	0.707	0.753	0.742	0.731	0.734	0.732
0.765	0.757	0.754	0.740	0.712	0.742	0.730	0.738	0.739	0.741	0.728	0.749	0.738	0.732	0.713	0.732
0.753	0.744	0.731	0.776	0.751	0.749	0.738	0.739	0.745	0.761	0.722	0.723	0.693	0.738	0.718	0.732
0.756	0.745	0.738	0.732	0.765	0.754	0.739	0.734	0.736	0.734	0.746	0.743	0.730	0.726	0.721	0.732
0.742	0.727	0.723	0.755	0.742	0.736	0.726	0.726	0.749	0.714	0.744	0.744	0.739	0.744	0.728	0.732
0.762	0.762	0.748	0.741	0.769	0.749	0.730	0.715	0.724	0.742	0.732	0.734	0.751	0.714	0.731	0.732
0.744	0.705	0.750	0.764	0.755	0.758	0.740	0.721	0.726	0.727	0.734	0.754	0.743	0.730	0.721	0.732
0.746	0.750	0.733	0.718	0.760	0.753	0.750	0.731	0.733	0.743	0.711	0.756	0.734	0.736	0.740	0.732
0.740	0.745	0.744	0.746	0.742	0.754	0.740	0.736	0.746	0.723	0.713	0.748	0.746	0.744	0.744	0.732
0.736	0.755	0.751	0.761	0.765	0.767	0.746	0.730	0.742	0.742	0.747	0.753	0.738	0.731	0.706	0.732
0.762	0.750	0.750	0.736	0.743	0.745	0.740	0.718	0.714	0.708	0.737	0.740	0.727	0.734	0.730	0.732
0.762	0.736	0.768	0.756	0.741	0.731	0.735	0.742	0.716	0.726	0.738	0.722	0.748	0.722	0.740	0.732
0.749	0.745	0.761	0.739	0.758	0.746	0.746	0.744	0.730	0.738	0.737	0.713	0.755	0.727	0.740	0.732
0.735	0.746	0.716	0.724	0.752	0.769	0.736	0.733	0.729	0.759	0.716	0.737	0.726	0.746	0.740	0.732
0.749	0.747	0.747	0.716	0.761	0.759	0.732	0.735	0.748	0.744	0.728	0.727	0.743	0.752	0.735	0.732
0.760	0.738	0.746	0.742	0.759	0.731	0.747	0.730	0.742	0.746	0.739	0.728	0.734	0.737	0.735	0.732
0.752	0.755	0.752	0.736	0.747	0.745	0.745	0.723	0.727	0.738	0.735	0.715	0.738	0.744	0.734	0.732
0.742	0.757	0.752	0.756	0.752	0.761	0.734	0.727	0.719	0.708	0.723	0.737	0.750	0.719	0.735	0.732
0.754	0.745	0.758	0.773	0.750	0.739	0.704	0.711	0.725	0.738	0.738	0.721	0.719	0.746	0.724	0.732
0.736	0.757	0.757	0.752	0.749	0.750	0.724	0.725	0.727	0.740	0.720	0.752	0.728	0.740	0.727	0.732
0.744	0.744	0.730	0.758	0.737	0.760	0.716	0.715	0.740	0.723	0.738	0.734	0.753	0.741	0.741	0.732
0.745	0.736	0.736	0.753	0.760	0.769	0.734	0.717	0.744	0.734	0.746	0.718	0.741	0.715	0.723	0.732
0.750	0.736	0.736	0.729	0.749	0.745	0.738	0.719	0.740	0.741	0.736	0.732	0.721	0.719	0.719	0.732
0.744	0.737	0.749	0.760	0.736	0.742	0.730	0.746	0.736	0.728	0.729	0.711	0.718	0.755	0.738	0.732
0.763	0.733	0.776	0.727	0.754	0.749	0.716	0.730	0.735	0.715	0.745	0.747	0.754	0.726	0.704	0.732
0.757	0.728	0.761	0.751	0.752	0.763	0.729	0.740	0.740	0.729	0.734	0.744	0.750	0.727	0.765	0.732
0.755	0.755	0.739	0.728	0.755	0.754	0.751	0.718	0.758	0.724	0.733	0.715	0.738	0.728	0.737	0.732
0.766	0.748	0.755	0.747	0.743	0.766	0.734	0.744	0.711	0.747	0.735	0.732	0.754	0.742	0.731	0.732
0.731	0.742	0.771	0.761	0.746	0.735	0.764	0.723	0.729	0.719	0.728	0.730	0.723	0.745	0.733	0.732
0.745	0.746	0.744	0.743	0.758	0.735	0.715	0.734	0.711	0.760	0.742	0.733	0.719	0.708	0.730	0.732
0.751	0.757	0.726	0.758	0.775	0.745	0.712	0.734	0.734	0.719	0.724	0.761	0.745	0.731	0.699	0.732
0.746	0.768	0.754	0.745	0.768	0.753	0.707	0.725	0.738	0.738	0.732	0.734	0.715	0.730	0.730	0.732
0.738	0.745	0.728	0.738	0.761	0.732	0.717	0.738	0.727	0.732	0.709	0.756	0.747	0.711	0.723	0.732
0.730	0.734	0.734	0.730	0.742	0.750	0.730	0.724	0.727	0.746	0.707	0.720	0.762	0.732	0.723	0.732
0.741	0.749	0.756	0.752	0.754	0.742	0.761	0.745	0.730	0.746	0.737	0.725	0.719	0.718	0.737	0.732
0.745	0.757	0.731	0.736	0.771	0.741	0.730	0.721	0.730	0.748	0.724	0.727	0.768	0.750	0.755	0.732
0.756	0.720	0.757	0.749	0.732	0.730	0.723	0.758	0.732	0.738	0.734	0.732	0.742	0.743	0.744	0.732
0.741	0.754	0.729	0.755	0.754	0.751	0.748	0.739	0.730	0.757	0.738	0.719	0.742	0.738	0.730	0.732

MAXIMO	0.781
PROMEDIO	0.738
MINIMO	0.663

Se establece como valor promedio **N2: 0.738 % Molar**

3.3 VERIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS OPERACIONALES DEL SISTEMA DE TRANSPORTE.

3.3.1 Caudales de salida y entrada.

Para el modelo nuevo se definen nuevos puntos de salida del gasoducto, los cuales corresponden a las derivaciones construidas a lo largo del gasoducto Gibraltar-Bucaramanga de 12 Pulgadas. Los puntos de entrada y salida del nuevo modelo son los siguientes:

Tabla 16. Puntos de Entrada y Salida del Nuevo Modelo

Puntos de Entrada	Gibraltar			
Puntos de Salida	D.Gibraltar	Samoré	Sanbernardo	Labateca
	Pamplona	Chitaga	Silos	Berlín
	ICP-Mi Isla	Zona Franca	Palenque	Metrogas
	Gasmovil	Lebrija	Galán	

Para cada uno de los puntos de salida se recopilan los registros históricos de flujo horario para todo el mes de junio de 2014. Esta información será incluida como datos de entrada en el modelo de simulación.

Se realiza una inspección de la información de los flujos horarios tanto en el punto de entrada como de los puntos de salida, el objetivo de esta revisión es verificar el

cumplimiento de la ley de conservación de masa teniendo en cuenta el empaquetamiento de la línea, esto nos da una idea de la calidad de la información que se está ingresando al modelo.

Para verificar la ley de conservación de masa, se aplica la siguiente ecuación

$$V_{ENTRADA} = V_{SALIDA} + \text{Empaquetamiento}_{FINAL} - \text{Empaquetamiento}_{INICIAL} \quad \text{EC 34}$$

Empaquetamiento_{Inicial} = 38.556 MPCD

Empaquetamiento_{Final} = 29.86 MPCD

V_{SALIDA} = 368.368 MPCD

V_{ENTRADA} = 359.672 MPCD

Los datos del empaquetamiento se calculan utilizando el software WINFLOW.

El volumen de entrada calculado con la ecuación anterior es menor al volumen reportado por el medidor de Gibraltar: V_{ENTRADA MEDIDOR GIBRALTAR} = 372.436 MPCD, lo cual es evidencia de un posible problema en uno o varios de los medidores de entrada o salida al sistema de transporte propiedad de Promioriente.

Debido a que no se puede establecer con precisión el medidor problema, se opta por utilizar la información bajo la premisa de que el flujo utilizado para la simulación es menor al flujo reportado por el medidor Gibraltar, lo cual nos deja en un escenario conservador. Se recomienda verificar la simulación una vez solucionado el inconveniente con los medidores. (Nota: A la fecha de emisión de este documento, Promioriente había realizado las gestiones de revisión de los sistemas de medición, especialmente de los sistemas propiedad del productor o de los remitentes y ya había tomado los correctivos necesarios)

3.3.2 Temperatura.

Se tabula la información de temperatura en cada uno de los puntos disponibles para medición de temperatura a lo largo del sistema de transporte de gas de Promioriente y se realiza el análisis de todos los datos de temperatura día a día, calculando el máximo, el mínimo, el promedio y la variación entre valor máximo y mínimo.

Los datos de la temperatura del gas en las Estaciones GOGB y Payoa no se tuvieron en cuenta dentro del análisis de la información realizado ya que durante la operación normal del sistema de transporte de Promioriente estas estaciones no funcionan como puntos de entrada o puntos de salida, es decir que en estas estaciones el gas se encuentra en estado estacionario o en condiciones de flujo “CERO” y por lo tanto las condiciones de transferencia de temperatura entre el medio que rodea la tubería, la tubería y el gas, son de estado estacionario, lo anterior sumado a la condición de tubería aérea en estas estaciones, hacen que la temperatura del gas reportada por los transmisores de Temperatura dependa de manera directa y puntual de la temperatura ambiente y de sus variaciones a lo largo del día en las localidades donde se ubican las estaciones Payoa y COGB.

La determinación de sesgo en la información de temperatura del gas de la estación COGB fue validada y verificada por medio de comparación directa entre los valores de temperatura del gas de la estación COGB y la estación GALAN, ya que las dos se localizan en el mismo sector industrial de la ciudad de Barrancabermeja separadas una distancia no mayor a 160 metros.

La determinación de sesgo en la información de temperatura del gas de la estación PAYOA fue validada y verificada por medio de comparación directa entre los valores de temperatura del gas de la estación PAYOA y la estación UNO, ya que las dos se localizan en el mismo sector del campo PAYOA propiedad de PETROSANTANDER en el municipio de Sabana de Torres y están separadas una distancia no mayor a 1300 metros.

Es importante aclarar que los equipo para medición de temperatura del gas ubicados en las estaciones GALAN, COGB, PAYOA y Estación UNO, así como en todos los demás puntos de medición de temperatura, son calibrados anualmente de acuerdo con el plan se Aseguramiento y mantenimiento Metrológico de Promioriente.

En la siguiente tabla se puede apreciar la diferencia notoria en los valores de temperatura del gas entre las estaciones GALAN y COGB y entre las estaciones UNO y PAYOA, estos datos corresponden al periodo comprendido entre el 1 y el 29 de junio de 2014. No se tiene en cuenta dentro del análisis el día 30 de junio, ya que a partir de las 9:00 a.m. de ese día se dejó de entregar gas por el punto Galán, alcanzando una condición de flujo “CERO”, que como se explicó anteriormente, hace que la temperatura del gas dependa directamente de la temperatura del medio que rodea la tubería, además de que esta es una condición anormal dentro del funcionamiento del sistema de transporte de Promioriente.

Tabla 17. Comparación Temperatura Galán vs COGB y E. Uno vs Payoa

FECHA		GALAN	COGB	E. UNO	PAYOA
01/06/2014	MAXIMO	87.54	107.67	87.03	No Dato
	PROMEDIO	85.94	89.78	84.92	No Dato
	MINIMO	84.23	77.69	83.77	No Dato
	VARIACION (MAX-MIN)	3.31	29.98	3.26	No Dato
02/06/2014	MAXIMO	85.68	96.73	84.86	No Dato
	PROMEDIO	85.06	84.66	84.26	No Dato
	MINIMO	84.37	75.78	83.51	No Dato
	VARIACION (MAX-MIN)	1.30	20.95	1.36	No Dato
03/06/2014	MAXIMO	85.82	103.39	85.39	No Dato
	PROMEDIO	84.83	87.54	84.30	No Dato
	MINIMO	84.18	74.95	83.35	No Dato
	VARIACION (MAX-MIN)	1.63	28.45	2.05	No Dato
04/06/2014	MAXIMO	84.88	105.33	85.51	No Dato
	PROMEDIO	84.30	90.04	84.27	No Dato
	MINIMO	83.91	76.88	83.78	No Dato
	VARIACION (MAX-MIN)	0.98	28.45	1.73	No Dato
05/06/2014	MAXIMO	84.98	101.84	85.47	No Dato
	PROMEDIO	84.09	86.08	83.93	No Dato
	MINIMO	82.93	72.45	83.19	No Dato
	VARIACION (MAX-MIN)	2.05	29.40	2.27	No Dato
06/06/2014	MAXIMO	85.77	105.24	87.00	No Dato
	PROMEDIO	84.10	89.73	84.41	No Dato
	MINIMO	83.63	78.84	83.66	No Dato
	VARIACION (MAX-MIN)	2.14	26.41	3.34	No Dato
07/06/2014	MAXIMO	85.77	96.28	85.86	No Dato
	PROMEDIO	85.03	85.19	84.65	No Dato
	MINIMO	83.72	77.89	83.87	No Dato
	VARIACION (MAX-MIN)	2.05	18.39	1.98	No Dato
08/06/2014	MAXIMO	84.98	96.48	85.87	No Dato
	PROMEDIO	84.47	84.14	84.34	No Dato
	MINIMO	83.72	76.63	83.72	No Dato
	VARIACION (MAX-MIN)	1.26	19.85	2.14	No Dato
09/06/2014	MAXIMO	87.03	105.33	84.36	No Dato
	PROMEDIO	84.32	89.60	84.02	No Dato
	MINIMO	83.49	76.59	83.83	No Dato
	VARIACION (MAX-MIN)	3.54	28.74	0.53	No Dato

FECHA		GALAN	COGB	E. UNO	PAYOA
10/06/2014	MAXIMO	85.40	106.97	84.48	No Dato
	PROMEDIO	84.18	89.29	83.97	No Dato
	MINIMO	83.44	77.22	83.79	No Dato
	VARIACION (MAX-MIN)	1.96	29.75	0.69	No Dato
11/06/2014	MAXIMO	84.14	96.62	84.54	No Dato
	PROMEDIO	83.83	84.74	84.01	No Dato
	MINIMO	83.25	74.63	83.52	No Dato
	VARIACION (MAX-MIN)	0.88	21.98	1.03	No Dato
12/06/2014	MAXIMO	84.88	105.20	85.29	No Dato
	PROMEDIO	84.14	89.20	84.50	No Dato
	MINIMO	83.53	76.88	84.02	No Dato
	VARIACION (MAX-MIN)	1.35	28.31	1.26	No Dato
13/06/2014	MAXIMO	84.23	107.35	85.16	No Dato
	PROMEDIO	83.83	91.43	84.50	No Dato
	MINIMO	83.39	78.07	84.06	No Dato
	VARIACION (MAX-MIN)	0.84	29.28	1.09	No Dato
14/06/2014	MAXIMO	84.51	106.05	85.25	No Dato
	PROMEDIO	84.04	88.26	84.58	No Dato
	MINIMO	83.44	74.25	84.16	No Dato
	VARIACION (MAX-MIN)	1.07	31.80	1.09	No Dato
15/06/2014	MAXIMO	85.12	102.99	85.29	No Dato
	PROMEDIO	84.37	86.35	84.54	No Dato
	MINIMO	83.67	72.98	84.04	No Dato
	VARIACION (MAX-MIN)	1.44	30.01	1.25	No Dato
16/06/2014	MAXIMO	84.98	106.66	85.34	No Dato
	PROMEDIO	84.52	90.29	84.65	No Dato
	MINIMO	84.28	77.40	84.28	No Dato
	VARIACION (MAX-MIN)	0.70	29.26	1.06	No Dato
17/06/2014	MAXIMO	84.84	106.02	85.27	No Dato
	PROMEDIO	84.43	90.92	84.64	No Dato
	MINIMO	83.95	78.84	84.30	No Dato
	VARIACION (MAX-MIN)	0.88	27.19	0.97	No Dato
18/06/2014	MAXIMO	84.74	107.76	85.45	No Dato
	PROMEDIO	84.21	89.91	84.69	No Dato
	MINIMO	83.25	77.98	84.23	No Dato
	VARIACION (MAX-MIN)	1.49	29.77	1.22	No Dato
19/06/2014	MAXIMO	84.42	107.11	85.47	88.77
	PROMEDIO	83.95	87.98	84.70	88.13
	MINIMO	83.44	76.45	84.34	87.48
	VARIACION (MAX-MIN)	0.98	30.66	1.13	1.29

FECHA		GALAN	COGB	E. UNO	PAYOA
20/06/2014	MAXIMO	85.63	99.05	85.47	87.45
	PROMEDIO	84.10	85.74	84.59	86.46
	MINIMO	83.39	73.89	84.22	85.46
	VARIACION (MAX-MIN)	2.24	25.16	1.25	2.00
21/06/2014	MAXIMO	84.74	106.21	85.27	85.44
	PROMEDIO	84.05	87.83	84.55	84.44
	MINIMO	83.16	74.67	84.04	83.44
	VARIACION (MAX-MIN)	1.58	31.54	1.23	2.00
22/06/2014	MAXIMO	84.70	106.84	85.52	83.42
	PROMEDIO	84.04	90.10	84.74	82.42
	MINIMO	83.53	75.82	84.20	81.42
	VARIACION (MAX-MIN)	1.16	31.02	1.31	2.00
23/06/2014	MAXIMO	84.65	106.50	85.42	81.40
	PROMEDIO	84.03	90.74	84.73	80.40
	MINIMO	83.58	79.74	84.35	79.40
	VARIACION (MAX-MIN)	1.07	26.76	1.08	2.00
24/06/2014	MAXIMO	84.09	96.82	84.91	79.38
	PROMEDIO	83.76	85.33	84.48	78.38
	MINIMO	83.39	76.12	84.20	77.38
	VARIACION (MAX-MIN)	0.70	20.70	0.71	2.00
25/06/2014	MAXIMO	84.23	96.35	84.86	77.36
	PROMEDIO	83.67	83.30	84.40	76.36
	MINIMO	83.21	75.78	84.17	75.36
	VARIACION (MAX-MIN)	1.02	20.57	0.70	2.00
26/06/2014	MAXIMO	84.56	103.91	85.91	101.26
	PROMEDIO	83.83	86.85	84.53	88.89
	MINIMO	83.44	73.10	84.03	75.07
	VARIACION (MAX-MIN)	1.12	30.81	1.88	26.19
27/06/2014	MAXIMO	84.60	105.15	85.41	101.08
	PROMEDIO	83.94	89.45	84.58	96.48
	MINIMO	83.49	76.63	84.02	93.80
	VARIACION (MAX-MIN)	1.12	28.52	1.40	7.28
28/06/2014	MAXIMO	85.16	100.52	85.20	93.61
	PROMEDIO	83.97	86.15	84.50	88.77
	MINIMO	83.49	76.88	84.03	86.14
	VARIACION (MAX-MIN)	1.68	23.63	1.16	7.47
29/06/2014	MAXIMO	85.35	103.82	85.53	93.38
	PROMEDIO	84.35	87.80	84.64	89.86
	MINIMO	83.63	75.51	84.10	84.10
	VARIACION (MAX-MIN)	1.72	28.31	1.43	9.28

En la siguiente tabla se puede observar las variaciones de temperatura del gas a lo largo de cada uno de los días analizados en cada una de las estaciones en donde se tiene disponible esta información. Como se expuso anteriormente, no se tiene en cuenta la información del 30 de junio de 2014.

Tabla 18. Registros de Temperatura del mes de Junio de 2014

FECHA		GIBRAL TAR	LA VIRGEN	LABAT ECA	CHITAGA	BERLIN	CRISTAL ES	GRANA DILLO	LA HORMIGA	PALEN QUE	E. UNO	GALAN
01/06/2014	MAXIMO	98.93	58.96	68.15	62.02	55.36	No Dato	72.67	No Dato	83.53	87.03	87.54
	PROMEDIO	93.51	58.77	67.58	61.78	54.03	No Dato	70.00	No Dato	82.68	84.92	85.94
	MINIMO	84.96	58.66	67.35	61.64	52.77	No Dato	67.95	No Dato	81.98	83.77	84.23
	VARIACION (MAX-MIN)	13.96	0.30	0.79	0.39	2.59	No Dato	4.73	No Dato	1.54	3.26	3.31
02/06/2014	MAXIMO	99.24	58.93	67.54	62.11	54.75	No Dato	71.07	No Dato	83.10	84.86	85.68
	PROMEDIO	89.54	58.67	67.24	61.61	54.01	No Dato	69.62	No Dato	82.53	84.26	85.06
	MINIMO	75.62	58.39	66.98	61.28	53.48	No Dato	68.49	No Dato	82.10	83.51	84.37
	VARIACION (MAX-MIN)	23.62	0.54	0.57	0.83	1.28	No Dato	2.59	No Dato	1.01	1.36	1.30
03/06/2014	MAXIMO	104.56	59.45	68.73	61.46	55.92	No Dato	70.58	No Dato	83.26	85.39	85.82
	PROMEDIO	97.77	58.70	67.65	61.30	54.32	No Dato	69.18	No Dato	82.54	84.30	84.83
	MINIMO	92.82	58.18	66.66	61.17	53.18	No Dato	67.67	No Dato	82.08	83.35	84.18
	VARIACION (MAX-MIN)	11.74	1.27	2.07	0.29	2.74	No Dato	2.91	No Dato	1.19	2.05	1.63
04/06/2014	MAXIMO	96.79	58.72	68.45	61.37	55.75	No Dato	71.93	No Dato	83.04	85.51	84.88
	PROMEDIO	92.10	58.20	67.69	61.15	54.28	No Dato	69.52	No Dato	82.30	84.27	84.30
	MINIMO	86.26	57.88	66.93	60.90	52.85	No Dato	67.45	No Dato	81.84	83.78	83.91
	VARIACION (MAX-MIN)	10.53	0.84	1.52	0.47	2.89	No Dato	4.48	No Dato	1.20	1.73	0.98
05/06/2014	MAXIMO	99.09	58.40	68.30	61.47	56.10	No Dato	70.26	No Dato	83.06	85.47	84.98
	PROMEDIO	91.24	58.08	67.17	61.27	54.45	No Dato	69.50	No Dato	82.21	83.93	84.09
	MINIMO	85.95	57.72	66.28	61.03	53.10	No Dato	68.51	No Dato	81.90	83.19	82.93
	VARIACION (MAX-MIN)	13.13	0.68	2.02	0.43	3.00	No Dato	1.75	No Dato	1.16	2.27	2.05
06/06/2014	MAXIMO	102.84	58.50	67.05	61.53	54.79	No Dato	71.70	No Dato	83.15	87.00	85.77
	PROMEDIO	97.43	58.22	66.79	61.33	53.29	No Dato	69.68	No Dato	82.38	84.41	84.10
	MINIMO	89.70	58.01	66.57	61.09	52.29	No Dato	67.69	No Dato	81.85	83.66	83.63
	VARIACION (MAX-MIN)	13.14	0.49	0.48	0.44	2.50	No Dato	4.01	No Dato	1.30	3.34	2.14
07/06/2014	MAXIMO	102.95	58.90	67.82	61.61	54.20	No Dato	70.38	No Dato	83.30	85.86	85.77
	PROMEDIO	96.79	58.54	67.08	61.48	53.40	No Dato	69.49	No Dato	82.67	84.65	85.03
	MINIMO	86.64	58.20	66.46	61.30	52.75	No Dato	68.59	No Dato	82.20	83.87	83.72
	VARIACION (MAX-MIN)	16.30	0.70	1.36	0.31	1.45	No Dato	1.80	No Dato	1.10	1.98	2.05
08/06/2014	MAXIMO	99.09	58.91	67.29	61.68	53.64	No Dato	69.81	No Dato	83.19	85.87	84.98
	PROMEDIO	92.40	58.47	66.91	61.38	53.21	No Dato	68.64	No Dato	82.68	84.34	84.47
	MINIMO	83.44	58.21	66.45	61.06	52.75	No Dato	67.67	No Dato	82.35	83.72	83.72
	VARIACION (MAX-MIN)	15.64	0.70	0.84	0.62	0.89	No Dato	2.14	No Dato	0.84	2.14	1.26
09/06/2014	MAXIMO	104.35	58.91	67.65	61.28	54.73	No Dato	71.16	No Dato	83.05	84.36	87.03
	PROMEDIO	96.54	58.25	66.71	61.06	53.50	No Dato	69.01	No Dato	82.54	84.02	84.32
	MINIMO	90.03	57.82	66.04	60.77	52.51	No Dato	67.12	No Dato	82.18	83.83	83.49
	VARIACION (MAX-MIN)	14.32	1.09	1.60	0.51	2.21	No Dato	4.04	No Dato	0.87	0.53	3.54

FECHA		GIBRAL TAR	LA VIRGEN	LABAT ECA	CHITAGA	BERLIN	CRISTAL ES	GRANA DILLO	LA HORMIGA	PALEN QUE	E. UNO	GALAN
10/06/2014	MAXIMO	103.60	59.01	67.68	61.19	54.39	No Dato	70.37	No Dato	82.98	84.48	85.40
	PROMEDIO	97.81	58.36	66.96	60.99	53.50	No Dato	69.16	No Dato	82.40	83.97	84.18
	MINIMO	93.08	58.01	66.32	60.77	52.93	No Dato	67.94	No Dato	82.10	83.79	83.44
	VARIACION (MAX-MIN)	10.52	1.00	1.37	0.42	1.46	No Dato	2.43	No Dato	0.88	0.69	1.96
11/06/2014	MAXIMO	103.00	58.18	66.76	61.15	53.70	No Dato	69.63	No Dato	82.47	84.54	84.14
	PROMEDIO	96.08	57.85	66.30	60.89	52.97	No Dato	68.74	No Dato	82.26	84.01	83.83
	MINIMO	77.22	57.03	65.84	60.65	52.33	No Dato	67.84	No Dato	82.05	83.52	83.25
	VARIACION (MAX-MIN)	25.78	1.15	0.92	0.50	1.37	No Dato	1.79	No Dato	0.42	1.03	0.88
12/06/2014	MAXIMO	105.98	58.94	68.01	61.08	54.90	No Dato	72.98	No Dato	83.14	85.29	84.88
	PROMEDIO	98.51	57.96	66.71	60.88	53.52	No Dato	69.87	No Dato	82.44	84.50	84.14
	MINIMO	91.31	57.46	65.58	60.69	52.43	No Dato	68.18	No Dato	81.96	84.02	83.53
	VARIACION (MAX-MIN)	14.67	1.48	2.42	0.40	2.47	No Dato	4.80	No Dato	1.18	1.26	1.35
13/06/2014	MAXIMO	103.61	58.56	68.36	61.01	54.55	No Dato	71.91	No Dato	82.91	85.16	84.23
	PROMEDIO	98.06	58.14	67.29	60.79	53.51	No Dato	70.00	No Dato	82.32	84.50	83.83
	MINIMO	88.34	57.79	66.25	60.55	52.74	No Dato	68.77	No Dato	81.86	84.06	83.39
	VARIACION (MAX-MIN)	15.27	0.77	2.11	0.45	1.81	No Dato	3.14	No Dato	1.05	1.09	0.84
14/06/2014	MAXIMO	101.53	58.21	68.02	60.96	53.55	No Dato	70.79	No Dato	82.63	85.25	84.51
	PROMEDIO	101.53	57.80	67.15	60.81	52.92	No Dato	69.65	No Dato	82.26	84.58	84.04
	MINIMO	101.53	57.00	66.28	60.63	52.21	No Dato	68.42	No Dato	81.91	84.16	83.44
	VARIACION (MAX-MIN)	0.00	1.22	1.74	0.33	1.34	No Dato	2.37	No Dato	0.73	1.09	1.07
15/06/2014	MAXIMO	101.53	58.32	67.86	60.97	53.94	No Dato	72.27	No Dato	83.22	85.29	85.12
	PROMEDIO	101.53	57.91	66.88	60.97	53.25	No Dato	69.65	No Dato	82.50	84.54	84.37
	MINIMO	101.53	57.61	66.06	60.91	52.40	No Dato	67.92	No Dato	81.69	84.04	83.67
	VARIACION (MAX-MIN)	0.00	0.71	1.80	0.06	1.54	No Dato	4.35	No Dato	1.53	1.25	1.44
16/06/2014	MAXIMO	101.53	57.79	67.58	60.97	54.17	No Dato	72.42	No Dato	82.85	85.34	84.98
	PROMEDIO	101.53	57.50	66.98	60.97	53.27	No Dato	69.97	No Dato	82.46	84.65	84.52
	MINIMO	101.53	57.29	66.33	60.97	52.73	No Dato	68.53	No Dato	82.21	84.28	84.28
	VARIACION (MAX-MIN)	0.00	0.50	1.25	0.00	1.44	No Dato	3.88	No Dato	0.64	1.06	0.70
17/06/2014	MAXIMO	101.53	57.72	67.68	60.97	53.38	No Dato	73.20	No Dato	82.95	85.27	84.84
	PROMEDIO	101.53	57.35	66.77	60.97	52.63	No Dato	70.50	No Dato	82.41	84.64	84.43
	MINIMO	101.53	56.86	66.08	60.97	51.91	No Dato	68.53	No Dato	82.09	84.30	83.95
	VARIACION (MAX-MIN)	0.00	0.86	1.59	0.00	1.47	No Dato	4.67	No Dato	0.87	0.97	0.88
18/06/2014	MAXIMO	101.53	57.68	67.35	60.97	53.87	No Dato	73.37	No Dato	82.87	85.45	84.74
	PROMEDIO	101.53	57.68	66.48	60.97	52.77	No Dato	70.58	No Dato	82.30	84.69	84.21
	MINIMO	101.53	57.68	65.67	60.97	51.88	No Dato	68.66	No Dato	81.90	84.23	83.25
	VARIACION (MAX-MIN)	0.00	0.00	1.68	0.00	1.98	No Dato	4.72	No Dato	0.97	1.22	1.49
19/06/2014	MAXIMO	101.53	57.68	66.44	60.97	54.23	No Dato	71.72	No Dato	82.66	85.47	84.42
	PROMEDIO	101.53	57.68	66.15	60.97	53.28	No Dato	70.04	No Dato	82.15	84.70	83.95
	MINIMO	101.53	57.68	65.84	60.97	52.39	No Dato	68.80	No Dato	81.62	84.34	83.44
	VARIACION (MAX-MIN)	0.00	0.00	0.60	0.00	1.84	No Dato	2.92	No Dato	1.04	1.13	0.98

FECHA		GIBRAL TAR	LA VIRGEN	LABAT ECA	CHITAGA	BERLIN	CRISTAL ES	GRANA DILLO	LA HORMIGA	PALEN OUF	E. UNO	GALAN
20/06/2014	MAXIMO	101.53	57.86	66.55	60.97	53.43	No Dato	70.30	No Dato	82.43	85.47	85.63
	PROMEDIO	89.09	57.48	66.08	60.56	52.98	No Dato	68.94	No Dato	82.00	84.59	84.10
	MINIMO	85.23	57.20	65.66	60.35	52.41	No Dato	67.96	No Dato	81.57	84.22	83.39
	VARIACION (MAX-MIN)	16.30	0.66	0.90	0.62	1.02	No Dato	2.34	No Dato	0.87	1.25	2.24
21/06/2014	MAXIMO	98.21	57.84	67.33	60.74	53.65	No Dato	70.22	No Dato	82.48	85.27	84.74
	PROMEDIO	90.14	57.32	66.20	60.57	52.77	No Dato	68.84	No Dato	82.12	84.55	84.05
	MINIMO	85.50	56.97	65.47	60.35	52.18	No Dato	67.23	No Dato	81.72	84.04	83.16
	VARIACION (MAX-MIN)	12.71	0.87	1.86	0.40	1.46	No Dato	3.00	No Dato	0.76	1.23	1.58
22/06/2014	MAXIMO	111.27	58.04	68.00	60.76	53.71	No Dato	71.25	No Dato	82.92	85.52	84.70
	PROMEDIO	93.76	57.65	66.85	60.62	53.00	No Dato	69.34	No Dato	82.36	84.74	84.04
	MINIMO	88.18	57.25	66.03	60.45	52.44	No Dato	67.69	No Dato	81.99	84.20	83.53
	VARIACION (MAX-MIN)	23.09	0.79	1.97	0.31	1.28	No Dato	3.56	No Dato	0.93	1.31	1.16
23/06/2014	MAXIMO	104.97	58.46	68.12	60.74	53.80	No Dato	71.68	No Dato	82.73	85.42	84.65
	PROMEDIO	95.73	58.00	67.21	60.58	52.90	No Dato	69.77	No Dato	82.30	84.73	84.03
	MINIMO	81.78	57.62	66.41	60.38	52.31	No Dato	68.39	No Dato	82.06	84.35	83.58
	VARIACION (MAX-MIN)	23.19	0.84	1.71	0.37	1.49	No Dato	3.29	No Dato	0.67	1.08	1.07
24/06/2014	MAXIMO	99.31	58.03	67.09	60.65	53.24	No Dato	70.25	No Dato	82.35	84.91	84.09
	PROMEDIO	94.04	57.48	66.54	60.45	52.15	No Dato	69.20	No Dato	82.05	84.48	83.76
	MINIMO	83.61	57.17	65.88	60.22	51.15	No Dato	68.01	No Dato	81.77	84.20	83.39
	VARIACION (MAX-MIN)	15.70	0.87	1.21	0.43	2.09	No Dato	2.24	No Dato	0.57	0.71	0.70
25/06/2014	MAXIMO	96.46	57.35	65.94	60.62	51.78	No Dato	69.12	No Dato	82.11	84.86	84.23
	PROMEDIO	92.96	56.81	65.56	60.44	51.47	No Dato	68.19	No Dato	81.92	84.40	83.67
	MINIMO	85.70	55.96	65.09	60.22	50.87	No Dato	66.95	No Dato	81.61	84.17	83.21
	VARIACION (MAX-MIN)	10.77	1.39	0.85	0.40	0.91	No Dato	2.16	No Dato	0.51	0.70	1.02
26/06/2014	MAXIMO	105.99	58.25	67.57	60.59	52.45	No Dato	69.89	No Dato	82.62	85.91	84.56
	PROMEDIO	98.53	57.32	66.14	60.42	51.32	No Dato	68.01	No Dato	82.02	84.53	83.83
	MINIMO	94.26	56.55	64.92	60.18	50.41	No Dato	66.27	No Dato	81.71	84.03	83.44
	VARIACION (MAX-MIN)	11.74	1.70	2.65	0.41	2.04	No Dato	3.62	No Dato	0.91	1.88	1.12
27/06/2014	MAXIMO	105.23	58.91	68.32	60.55	53.32	No Dato	71.31	No Dato	82.67	85.41	84.60
	PROMEDIO	99.37	57.77	66.50	60.37	51.75	No Dato	68.90	No Dato	82.02	84.58	83.94
	MINIMO	95.04	56.70	64.44	60.14	50.29	No Dato	66.73	No Dato	81.54	84.02	83.49
	VARIACION (MAX-MIN)	10.19	2.22	3.87	0.40	3.02	No Dato	4.58	No Dato	1.13	1.40	1.12
28/06/2014	MAXIMO	99.97	58.10	67.19	60.48	52.72	No Dato	70.42	No Dato	82.42	85.20	85.16
	PROMEDIO	92.91	57.47	66.36	60.34	51.73	No Dato	69.19	No Dato	81.99	84.50	83.97
	MINIMO	79.01	56.96	65.56	60.15	51.05	No Dato	67.83	No Dato	81.67	84.03	83.49
	VARIACION (MAX-MIN)	20.97	1.14	1.63	0.33	1.67	No Dato	2.59	No Dato	0.74	1.16	1.68
29/06/2014	MAXIMO	104.84	58.34	68.26	60.41	53.63	No Dato	72.70	No Dato	82.96	85.53	85.35
	PROMEDIO	96.57	57.65	66.72	60.34	52.43	No Dato	69.94	No Dato	82.28	84.64	84.35
	MINIMO	70.58	56.99	65.40	60.20	51.54	No Dato	68.20	No Dato	81.85	84.10	83.63
	VARIACION (MAX-MIN)	34.26	1.35	2.86	0.22	2.09	No Dato	4.50	No Dato	1.11	1.43	1.72

A continuación se presentan los valores extremos en cada punto de medición, para el día de mayor variación entre la temperatura máxima y mínima entre el 1 y el 29 de junio de 2014.

Tabla 19. Variación de Temperatura Máxima durante un día de Gas de Junio de 2014

FECHA		GIBRAL TAR	LA VIRGEN	LABAT ECA	CHITAGA	BERLIN	CRISTAL ES	GRANA DILLO	LA HORMIGA	PALEN QUE	E. UNO	GALAN
Datos Extremos para un día de gas del 1 al 29 de junio de 2014	MAXIMO	104.84	58.91	68.32	62.11	53.32	No Dato	72.98	No Dato	83.53	87.00	87.03
	MINIMO	70.58	56.70	64.44	61.28	50.29	0.00	68.18	0.00	81.98	83.66	83.49
	VARIACION (MAX-MIN)	34.26	2.22	3.87	0.83	3.02	No Dato	4.80	No Dato	1.54	3.34	3.54

Como se puede apreciar en la tabla anterior, la variación de temperatura del gas transportado en cada una de las estaciones analizadas, a excepción de GIBRLTAR que es el punto de entrada, presentan una variación entre el valor máximo y el mínimo por debajo de los 5 grados Fahrenheit

A continuación se presenta una tabla resumen con los valores máximos, mínimos, promedio y la variación entre el máximo y el mínimo para el periodo comprendido entre el 1 y el 29 de junio de 2014.

Tabla 20. Variación de Temperatura Máxima durante el mes de Junio de 2014

FECHA		GIBRAL TAR	LA VIRGEN	LABAT ECA	CHITAGA	BERLIN	CRISTAL ES	GRANA DILLO	LA HORMIGA	PALEN QUE	E. UNO	GALAN
Del 1 al 29 de Junio de 2014	MAXIMO	111.27	59.45	68.73	62.11	56.10	No Dato	73.37	No Dato	83.53	87.03	87.54
	PROMEDIO	96.21	57.90	66.78	60.90	53.06	No Dato	69.42	No Dato	82.31	84.47	84.25
	MINIMO	70.58	55.96	64.44	60.14	50.29	No Dato	66.27	No Dato	81.54	83.19	82.93
	VARIACION (MAX-MIN)	40.69	3.49	4.29	1.97	5.81	No Dato	7.10	No Dato	1.99	3.83	4.61

Como se puede observar, las variaciones en la temperatura del gas a través de todo el mes de junio de 2014 y en cada uno de las estaciones analizadas, a excepción de GIBRLTAR que es el punto de entrada, presentan una variación entre el valor Máximo y el mínimo poco mayor de 7 grados Fahrenheit.

En el caso de la estación GIBRALTAR, la temperatura del gas en el gasoducto depende de la temperatura del gas entregado por la Planta de Procesamiento Gibraltar, considerando la amplia variación (40.69 °F) en la temperatura del gas en la estación GIBRALTAR, se adiciona al modelo la variable en el tiempo “TEMPERATURA GIBRALTAR”.

Para el caso de las demás estaciones, se utiliza un valor de temperatura promedio, lo cual en el peor de los casos introducirá un error de aproximadamente 4°F. De acuerdo a lo analizado en el capítulo 2 de este documento, una diferencia de 4°F podría generar un error menor al 0.4% en el cálculo del caudal del sistema de transporte, lo cual se puede considerar como un error relativamente despreciable y manejable.

Teniendo en cuenta que los datos de temperatura que son ingresados al modelo corresponden a la temperatura real del gas en el punto de medición, se introducirá al modelo esta temperatura como una temperatura del suelo y se establecerá un valor de coeficiente de transmisión de temperatura lo suficientemente alto como para que se garantice que la temperatura del suelo sea igual a la temperatura del gas en el modelo.

Para determinar la temperatura del gas en cada una de las secciones del modelo utilizado en Winflow, se interpola el valor de temperatura entre cada una de las estaciones con Temperatura conocida.

3.3.3 Presión de Operación:

Una vez analizados los datos del mes de junio de 2014, se establece que el periodo apropiado para el ajuste del modelo corresponde a los datos del 20 al 30 de junio.

A continuación se presenta la tabla resumen con la revisión de la información de presión del mes de junio de 2014.

Tabla 21. Resumen Revisión Datos de Presión

PERIODO	OBSERVACION
Del 1 al 2 de junio	Se descarta el estudio de estos días de información teniendo en cuenta que durante este periodo se realizó una corrida con herramienta PDL la cual exige la realización de operaciones especiales y por lo tanto podría distorsionar las condiciones de flujo y presión normales pudiendo generar incertidumbre adicional en los resultados de la simulación.
Del 3 al 4 de junio	Este periodo de información es apto para analizar, sin embargo se descarta considerando que solo se tienen dos días continuos de información y se debe descontar el tiempo que tarda en estabilizarse el modelo de acuerdo a las condiciones de entrada.
El 5 de junio	Se descarta el estudio de este día de información teniendo en cuenta que durante este periodo se realizó una corrida con herramienta de Limpieza, la cual exige la realización de operaciones especiales y por lo tanto podría distorsionar las condiciones de flujo y presión normales pudiendo generar incertidumbre adicional en los resultados de la simulación.
Del 6 al 7 de junio	Este periodo de información es apto para analizar, sin embargo se descarta considerando que solo se tienen dos días continuos de información y se debe descontar el tiempo que tarda en estabilizarse el modelo de acuerdo a las condiciones de entrada.
Del 8 al 11 de junio	Se descarta el estudio de este día de información teniendo en cuenta que durante este periodo se realizó una corrida con herramienta MFL, la cual exige la realización de operaciones especiales y por lo tanto podría distorsionar las condiciones de flujo y presión normales pudiendo generar incertidumbre adicional en los resultados de la simulación.
Del 12 al 13 de junio	Este periodo de información es apto para analizar, sin embargo se descarta considerando que solo se tienen dos días continuos de información y se debe descontar el tiempo que tarda en estabilizarse el modelo de acuerdo a las condiciones de entrada.
Del 14 al 19 de junio	Se descarta el estudio de este día de información teniendo en cuenta que durante este periodo se presentó gran cantidad de datos de presión congelados o estáticos en varias estaciones debido a problemas con la comunicación del sistema SCADA
Del 20 al 30 de junio	PERIODO ELEGIDO PARA LA SIMULACIÓN Y AJUSTE DEL MODELO

Los datos de presión de entrada en el punto Gibraltar son integrados al modelo como dato de entrada, mientras de la información de presión de los demás puntos es utilizada como punto de comparación contra los datos de salida del modelo, de tal manera que por medio del método de comparación directa se ajuste el modelo lo mejor posible.

3.3.4 Cambios en la elevación.

- **Gasoducto Gibraltar-Bucaramanga 12”:** Se utiliza la información contenida en los planos As-Built.

Se realiza una verificación de los valores utilizados en el modelo actual versus los valores revisados y no se encuentra ninguna diferencia importante.

- **Gasoducto Barranca-Payoa 8”:** Se utiliza la información de la corrida con herramienta inteligente – ILI realizada en el año 2009.

Se realiza una verificación de los valores utilizados en el modelo actual versus los valores revisados y no se encuentra ninguna diferencia importante.

- **Gasoducto Payoa-Bucaramanga 8”:** Se utilizó la información de la corrida con herramienta inteligente – ILI realizada en el año 2007.

Se realiza una verificación de los valores utilizados en el modelo actual versus los valores revisados y no se encuentra ninguna diferencia importante.

- **Gasoducto Payoa-Bucaramanga 6”**: No se tiene disponible información de corridas ILI con Mapeo Inercial, se utiliza la información de planos antiguos. Se recomienda actualizar esta información una vez se realice una corrida ILI con mapeo Inercial.

Se realiza una verificación de los valores utilizados en el modelo actual versus los valores revisados y no se encuentra ninguna diferencia importante.

3.3.5 Condiciones Base.

De acuerdo a la resolución CREG 071 de 1999, por medio de la cual se establece el Reglamento Único de Transporte, las condiciones estándar a las cuales se debe referir cualquier volumen de gas en Colombia corresponden a las siguientes:

- Temperatura: 60 °F
- Presión: 14.65 psia

Es importante tener en cuenta estas condiciones de presión y temperatura al momento de realizar las simulaciones en el software WINFLOW-WINTRAN ya que estas serán las condiciones a las cuales se refieren todos los volúmenes ingresados al simulador así como los volúmenes arrojados como resultados de la simulación.

El modelo actual maneja las condiciones base que trae por defecto el software, es decir:

- Temperatura: 60 °F
- Presión: 14.73 psia

El modelo nuevo tendrá definidas las condiciones establecidas por el RUT.

3.3.6 Presión Barométrica.

El software da la opción de establecer la presión Barométrica como un valor constante o como un valor calculado utilizando una ecuación en función de la elevación sobre el nivel del mar.

Considerando la condición de grandes cambios en la elevación del sistema de transporte Propiedad de Promioriente, en donde la máxima elevación es 3600 m.s.n.m y la mínima es 100 m.s.n.m, se utiliza la opción de presión barométrica calculada.

4. CALIBRACIÓN Y AJUSTE DEL MODELO NUEVO DE SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DE PROMIORIENTE

En el capítulo 3 se definen todas las variables que se utilizan para construir o modificar el nuevo modelo de simulación, en esta capítulo se realizan las simulaciones y los ajustes necesarios hasta lograr que el comportamiento del modelo sea lo más parecido al comportamiento real del sistema de transporte de Promioriente.

4.1 RECONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

Teniendo en cuenta todas las características Geométricas del sistema de transporte, las características físico-químicas del gas transportado, los parámetros operacionales y las ecuaciones de flujo establecidas y justificadas en los capítulos anteriores, se reconstruye el modelo de simulación del sistema de transporte de Promioriente. En la Figura 18 a la Figura 22 se presenta el modelo de simulación construido en WINFLOW.

A continuación se presentan unas tablas resumen que contienen las características más relevantes de los segmentos de tubería establecidos en el nuevo modelo. La información consignada en estas tablas es exportada a Excel directamente del software Winflow.

Tabla 22. Resumen Características Segmentos Modelo Nuevo (Parte I)

RESUMEN TRAMOS MODELO NUEVO DEFINITIVO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DE PROMIORIENTE						
TRAMO	LONGITUD (Km)	DIAMETRO EXTERNO (Pulgadas)	DIAMETRO INTERNO (Pulgadas)	EFICIENCIA	TEMP (°F)	ECUACIÓN DE FLUJO
E. GIBRALTAR/PK1+003.88	1003.88	12.75	12.242	0.99	94.69	AGA(Full & Parc.Turb)
PK1+003.88/PK2+010.56	1006.68	12.75	12.242	0.99	93.17	AGA(Full & Parc.Turb)
PK2+010.56/PK2+958.66	948.10	12.75	12.242	0.99	91.73	AGA(Full & Parc.Turb)
PK2+958.66/PK3+967.34	1008.68	12.75	12.242	0.99	90.20	AGA(Full & Parc.Turb)
PK3+967.34/PK4+470.00	502.66	12.75	12.242	0.99	89.44	AGA(Full & Parc.Turb)
PK4+470.00/PK5+028.67	558.67	12.75	12.242	0.99	88.60	AGA(Full & Parc.Turb)
PK5+028.67/PK6+041.83	1013.16	12.75	12.242	0.99	87.06	AGA(Full & Parc.Turb)
PK6+041.83/PK6+961.50	919.67	12.75	12.242	0.99	85.67	AGA(Full & Parc.Turb)
PK6+961.50/PK8+014.01	1052.51	12.75	12.242	0.99	84.08	AGA(Full & Parc.Turb)
PK8+014.01/PK8+963.29	949.28	12.75	12.242	0.99	82.64	AGA(Full & Parc.Turb)
PK8+963.29/PK9+971.49	1008.20	12.75	12.242	0.99	81.12	AGA(Full & Parc.Turb)
PK9+971.49/PK11+009.99	1038.50	12.75	12.242	0.99	79.54	AGA(Full & Parc.Turb)
PK11+009.99/V.D. SAMORE	700.41	12.75	12.242	0.99	78.48	AGA(Full & Parc.Turb)
V.D. SAMORE/PK12+047.74	337.34	12.75	12.242	0.99	77.97	AGA(Full & Parc.Turb)
PK12+047.74/PK12+992.29	944.55	12.75	12.242	0.99	76.54	AGA(Full & Parc.Turb)
PK12+992.29/PK14+039.19	1046.90	12.75	12.242	0.99	74.96	AGA(Full & Parc.Turb)
PK14+039.19/PK14+976.62	937.43	12.75	12.242	0.99	73.54	AGA(Full & Parc.Turb)
PK14+976.62/PK16+028.39	1051.77	12.75	12.242	0.99	71.95	AGA(Full & Parc.Turb)
PK16+028.39/PK16+975.75	947.36	12.75	12.242	0.99	70.51	AGA(Full & Parc.Turb)
PK16+975.75/PK18+019.72	1043.97	12.75	12.242	0.99	68.93	AGA(Full & Parc.Turb)
PK18+019.72/PK18+979.94	960.22	12.75	12.242	0.99	67.48	AGA(Full & Parc.Turb)
PK18+979.94/PK20+003.48	1023.54	12.75	12.242	0.99	65.93	AGA(Full & Parc.Turb)
PK20+003.48/PK21+023.54	1020.06	12.75	12.242	0.99	64.39	AGA(Full & Parc.Turb)
PK21+023.54/PK22+007.62	984.08	12.75	12.242	0.99	62.90	AGA(Full & Parc.Turb)
PK22+007.62/PK23+039.21	1031.59	12.75	12.242	0.99	61.34	AGA(Full & Parc.Turb)
PK23+039.21/PK23+989.37	950.16	12.75	12.242	0.99	59.90	AGA(Full & Parc.Turb)
PK23+989.37/PK24+983.36	993.99	12.75	12.242	0.99	58.39	AGA(Full & Parc.Turb)
PK24+983.36/V.S. LA VIRGEN	328.22	12.75	12.242	0.99	57.90	AGA(Full & Parc.Turb)
V.S. LA VIRGEN/PK26+024.03	712.45	12.75	12.242	0.99	58.09	AGA(Full & Parc.Turb)
PK26+024.03/PK27+049.58	1025.55	12.75	12.242	0.99	58.36	AGA(Full & Parc.Turb)
PK27+049.58/PK27+967.93	918.35	12.75	12.242	0.99	58.60	AGA(Full & Parc.Turb)
PK27+967.93/PK29+041.01	1073.08	12.75	12.242	0.99	58.89	AGA(Full & Parc.Turb)
PK29+041.01/PK29+989.03	948.02	12.75	12.242	0.99	59.14	AGA(Full & Parc.Turb)
PK29+989.03/PK31+017.47	1028.44	12.75	12.242	0.99	59.41	AGA(Full & Parc.Turb)
PK31+017.47/PK32+044.95	1027.48	12.75	12.242	0.99	59.68	AGA(Full & Parc.Turb)
PK32+044.95/PK33+027.41	982.46	12.75	12.242	0.99	59.95	AGA(Full & Parc.Turb)
PK33+027.41/PK33+964.52	937.11	12.75	12.242	0.99	60.19	AGA(Full & Parc.Turb)
PK33+964.52/PK35+002.43	1037.91	12.75	12.242	0.99	60.47	AGA(Full & Parc.Turb)
PK35+002.43/PK36+029.39	1026.96	12.75	12.242	0.99	60.74	AGA(Full & Parc.Turb)
PK36+029.39/PK37+046.26	1016.87	12.75	12.242	0.99	61.01	AGA(Full & Parc.Turb)
PK37+046.26/PK37+981.92	935.66	12.75	12.242	0.99	61.26	AGA(Full & Parc.Turb)
PK37+981.92/PK39+027.69	1045.77	12.75	12.242	0.99	61.54	AGA(Full & Parc.Turb)
PK39+027.69/PK40+037.83	1010.14	12.75	12.242	0.99	61.81	AGA(Full & Parc.Turb)
PK40+037.83/PK41+048.32	1010.49	12.75	12.242	0.99	62.07	AGA(Full & Parc.Turb)
PK41+048.32/PK42+206.20	1157.88	12.75	12.242	0.99	62.38	AGA(Full & Parc.Turb)
PK42+206.20/PK43+021.46	815.26	12.75	12.242	0.99	62.60	AGA(Full & Parc.Turb)
PK43+021.46/PK43+958.47	937.01	12.75	12.242	0.99	62.85	AGA(Full & Parc.Turb)
PK43+958.47/PK44+987.66	1029.19	12.75	12.242	0.99	63.12	AGA(Full & Parc.Turb)

Tabla 23. Resumen Características Segmentos Modelo Nuevo (Parte II)

RESUMEN TRAMOS MODELO NUEVO DEFINITIVO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DE PROMIORIENTE						
TRAMO	LONGITUD (Km)	DIAMETRO EXTERNO (Pulgadas)	DIAMETRO INTERNO (Pulgadas)	EFICIENCIA	TEMP (°F)	ECUACIÓN DE FLUJO
PK44+987.66/PK46+031.11	1043.45	12.75	12.242	0.99	63.40	AGA(Full & Parc.Turb)
PK46+031.11/PK47+049.94	1018.83	12.75	12.242	0.99	63.67	AGA(Full & Parc.Turb)
PK47+049.94/V.D. SAN BERNARDO	380.90	12.75	12.25	0.99	70.00	AGA(Full & Parc.Turb)
V.D. SAN BERNARDO/PK47+959.41	528.57	12.75	12.242	0.99	63.91	AGA(Full & Parc.Turb)
PK47+959.41/PK48+988.78	1029.37	12.75	12.242	0.99	64.18	AGA(Full & Parc.Turb)
PK48+988.78/PK50+012.78	1024.00	12.75	12.242	0.99	64.45	AGA(Full & Parc.Turb)
PK50+012.78/PK50+960.89	948.11	12.75	12.242	0.99	64.70	AGA(Full & Parc.Turb)
PK50+960.89/PK51+979.96	1019.07	12.75	12.242	0.99	64.97	AGA(Full & Parc.Turb)
PK51+979.96/PK53+021.90	1041.94	12.75	12.242	0.99	65.25	AGA(Full & Parc.Turb)
PK53+021.90/PK54+048.05	1026.15	12.75	12.242	0.99	65.52	AGA(Full & Parc.Turb)
PK54+048.05/PK54+987.66	939.61	12.75	12.242	0.99	65.77	AGA(Full & Parc.Turb)
PK54+987.66/PK56+030.72	1043.06	12.75	12.242	0.99	66.05	AGA(Full & Parc.Turb)
PK56+030.72/PK56+973.05	942.33	12.75	12.242	0.99	66.30	AGA(Full & Parc.Turb)
PK56+973.05/PK58+009.11	1036.06	12.75	12.242	0.99	66.57	AGA(Full & Parc.Turb)
PK58+009.11/V.S. LABATECA	778.18	12.75	12.242	0.99	66.78	AGA(Full & Parc.Turb)
V.S. LABATECA/PK58+955.00	167.71	12.75	12.242	0.99	66.75	AGA(Full & Parc.Turb)
PK58+955.00/V.D. LABATECA	770.21	12.75	12.242	0.99	66.59	AGA(Full & Parc.Turb)
V.D. LABATECA/PK59+992.68	267.47	12.75	12.242	0.99	66.53	AGA(Full & Parc.Turb)
PK59+992.68/PK61+009.65	1016.97	12.75	12.242	0.99	66.32	AGA(Full & Parc.Turb)
PK61+009.65/PK61+986.97	977.32	12.75	12.242	0.99	66.12	AGA(Full & Parc.Turb)
PK61+986.97/PK62+999.83	1012.86	12.75	12.242	0.99	65.91	AGA(Full & Parc.Turb)
PK62+999.83/PK63+941.19	941.36	12.75	12.242	0.99	65.71	AGA(Full & Parc.Turb)
PK63+941.19/PK65+041.34	1100.15	12.75	12.242	0.99	65.49	AGA(Full & Parc.Turb)
PK65+041.34/PK65+985.04	943.70	12.75	12.242	0.99	65.29	AGA(Full & Parc.Turb)
PK65+985.04/PK67+048.09	1063.05	12.75	12.242	0.99	65.07	AGA(Full & Parc.Turb)
PK67+048.09/PK68+050.09	1002.00	12.75	12.242	0.99	64.86	AGA(Full & Parc.Turb)
PK68+050.09/PK68+985.86	935.77	12.75	12.242	0.99	64.67	AGA(Full & Parc.Turb)
PK68+985.86/PK70+004.10	1018.24	12.75	12.242	0.99	64.46	AGA(Full & Parc.Turb)
PK70+004.10/PK70+951.26	947.16	12.75	12.242	0.99	64.26	AGA(Full & Parc.Turb)
PK70+951.26/V.D. PAMPLONA	575.89	12.75	12.242	0.99	64.14	AGA(Full & Parc.Turb)
V.D. PAMPLONA/PK72+024.06	496.91	12.75	12.242	0.99	64.04	AGA(Full & Parc.Turb)
PK72+024.06/PK72+994.23	970.17	12.75	12.242	0.99	63.84	AGA(Full & Parc.Turb)
PK72+994.23/PK73+960.69	966.46	12.75	12.242	0.99	63.64	AGA(Full & Parc.Turb)
PK73+960.69/PK74+984.91	1024.22	12.75	12.242	0.99	63.43	AGA(Full & Parc.Turb)
PK74+984.91/PK76+034.60	1049.69	12.75	12.242	0.99	63.21	AGA(Full & Parc.Turb)
PK76+034.60/PK76+968.15	933.55	12.75	12.242	0.99	63.02	AGA(Full & Parc.Turb)
PK76+968.15/PK78+027.48	1059.33	12.75	12.242	0.99	62.80	AGA(Full & Parc.Turb)
PK78+027.48/PK78+963.18	935.70	12.75	12.242	0.99	62.60	AGA(Full & Parc.Turb)
PK78+963.18/PK80+046.41	1083.23	12.75	12.242	0.99	62.38	AGA(Full & Parc.Turb)
PK80+046.41/PK81+000.70	954.29	12.75	12.242	0.99	62.18	AGA(Full & Parc.Turb)
PK81+000.70/PK81+962.87	962.17	12.75	12.242	0.99	61.98	AGA(Full & Parc.Turb)
PK81+962.87/PK82+991.82	1028.95	12.75	12.242	0.99	61.77	AGA(Full & Parc.Turb)
PK82+991.82/PK84+051.04	1059.22	12.75	12.242	0.99	61.55	AGA(Full & Parc.Turb)
PK84+051.04/V.D. CHITAGA	971.09	12.75	12.242	0.99	61.35	AGA(Full & Parc.Turb)
V.D. CHITAGA/PK85+954.18	932.05	12.75	12.242	0.99	61.15	AGA(Full & Parc.Turb)
PK85+954.18/PK86+909.36	955.18	12.75	12.242	0.99	60.96	AGA(Full & Parc.Turb)
PK86+909.36/V.S. CHITAGA	256.60	12.75	12.242	0.99	60.90	AGA(Full & Parc.Turb)
V.S. CHITAGA/PK88+047.27	881.31	12.75	12.242	0.99	60.68	AGA(Full & Parc.Turb)

Tabla 24. Resumen Características Segmentos Modelo Nuevo (Parte III)

RESUMEN TRAMOS MODELO NUEVO DEFINITIVO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DE PROMIORIENTE						
TRAMO	LONGITUD (Km)	DIAMETRO EXTERNO (Pulgadas)	DIAMETRO INTERNO (Pulgadas)	EFICIENCIA	TEMP (°F)	ECUACIÓN DE FLUJO
PK88+047.27/PK88+967.21	919.94	12.75	12.242	0.99	60.45	AGA(Full & Parc.Turb)
PK88+967.21/PK90+035.35	1068.14	12.75	12.242	0.99	60.17	AGA(Full & Parc.Turb)
PK90+035.35/PK90+975.49	940.14	12.75	12.242	0.99	59.93	AGA(Full & Parc.Turb)
PK90+975.49/PK92+025.22	1049.73	12.75	12.242	0.99	59.67	AGA(Full & Parc.Turb)
PK92+025.22/PK92+979.36	954.14	12.75	12.242	0.99	59.42	AGA(Full & Parc.Turb)
PK92+979.36/PK94+024.58	1045.22	12.75	12.242	0.99	59.16	AGA(Full & Parc.Turb)
PK94+024.58/PK95+030.77	1006.19	12.75	12.242	0.99	58.90	AGA(Full & Parc.Turb)
PK95+030.77/PK96+037.27	1006.50	12.75	12.242	0.99	58.65	AGA(Full & Parc.Turb)
PK96+037.27/PK97+000.48	963.21	12.75	12.242	0.99	58.40	AGA(Full & Parc.Turb)
PK97+000.48/PK97+988.64	988.16	12.75	12.242	0.99	58.15	AGA(Full & Parc.Turb)
PK97+988.64/PK98+979.12	990.48	12.75	12.242	0.99	57.90	AGA(Full & Parc.Turb)
PK98+979.12/PK99+948.50	969.38	12.75	12.242	0.99	57.65	AGA(Full & Parc.Turb)
PK99+948.50/PK100+955.32	1006.82	12.75	12.242	0.99	57.40	AGA(Full & Parc.Turb)
PK100+955.32/PK102+045.02	1089.70	12.75	12.242	0.99	57.12	AGA(Full & Parc.Turb)
PK102+045.02/PK102+959.30	914.28	12.75	12.242	0.99	56.89	AGA(Full & Parc.Turb)
PK102+959.30/PK103+992.49	1033.19	12.75	12.242	0.99	56.62	AGA(Full & Parc.Turb)
PK103+992.49/PK104+998.11	1005.62	12.75	12.242	0.99	56.37	AGA(Full & Parc.Turb)
PK104+998.11/PK105+967.67	969.56	12.75	12.242	0.99	56.12	AGA(Full & Parc.Turb)
PK105+967.67/V.D. SILOS	1076.76	12.75	12.242	0.99	55.85	AGA(Full & Parc.Turb)
V.D. SILOS/PK108+004.68	960.25	12.75	12.204	0.99	55.60	AGA(Full & Parc.Turb)
PK108+004.68/PK109+009.71	1005.03	12.75	12.204	0.99	55.35	AGA(Full & Parc.Turb)
PK109+009.71/PK110+016.14	1006.43	12.75	12.204	0.99	55.09	AGA(Full & Parc.Turb)
PK110+016.14/PK111+025.33	1009.19	12.75	12.204	0.99	54.83	AGA(Full & Parc.Turb)
PK111+025.33/PK111+955.81	930.48	12.75	12.204	0.99	54.60	AGA(Full & Parc.Turb)
PK111+955.81/PK113+005.59	1049.78	12.75	12.204	0.99	54.33	AGA(Full & Parc.Turb)
PK113+005.59/PK114+012.86	1007.27	12.75	12.204	0.99	54.07	AGA(Full & Parc.Turb)
PK114+012.86/PK115+035.06	1022.20	12.75	12.204	0.99	53.81	AGA(Full & Parc.Turb)
PK115+035.06/PK116+042.21	1007.15	12.75	12.204	0.99	53.56	AGA(Full & Parc.Turb)
PK116+042.21/PK117+048.90	1006.69	12.75	12.204	0.99	53.30	AGA(Full & Parc.Turb)
PK117+048.90/V.S. BERLIN	965.78	12.75	12.204	0.99	53.06	AGA(Full & Parc.Turb)
V.S. BERLIN/V.D. BERLIN	248.24	12.75	12.204	0.985	53.18	AGA(Full & Parc.Turb)
V.D. BERLIN/PK118+962.95	700.03	12.75	12.204	0.985	53.54	AGA(Full & Parc.Turb)
PK118+962.95/PK119+974.90	1011.95	12.75	12.204	0.985	54.05	AGA(Full & Parc.Turb)
PK119+974.90/PK120+983.07	1008.17	12.75	12.204	0.985	54.56	AGA(Full & Parc.Turb)
PK120+983.07/PK121+992.30	1009.23	12.75	12.204	0.985	55.08	AGA(Full & Parc.Turb)
PK121+992.30/PK123+002.58	1010.28	12.75	12.204	0.985	55.59	AGA(Full & Parc.Turb)
PK123+002.58/PK124+009.42	1006.84	12.75	12.204	0.985	56.10	AGA(Full & Parc.Turb)
PK124+009.42/PK125+015.36	1005.94	12.75	12.204	0.985	56.61	AGA(Full & Parc.Turb)
PK125+015.36/PK126+022.61	1007.25	12.75	12.204	0.985	57.12	AGA(Full & Parc.Turb)
PK126+022.61/PK127+032.70	1010.09	12.75	12.204	0.985	57.64	AGA(Full & Parc.Turb)
PK127+032.70/PK128+038.21	1005.51	12.75	12.204	0.985	58.15	AGA(Full & Parc.Turb)
PK128+038.21/PK129+043.67	1005.46	12.75	12.204	0.985	58.66	AGA(Full & Parc.Turb)
PK129+043.67/PK129+952.71	909.04	12.75	12.204	0.985	59.12	AGA(Full & Parc.Turb)
PK129+952.71/PK130+960.10	1007.39	12.75	12.204	0.985	59.63	AGA(Full & Parc.Turb)
PK130+960.10/PK131+967.82	1007.72	12.75	12.204	0.985	60.15	AGA(Full & Parc.Turb)
PK131+967.82/PK132+992.86	1025.04	12.75	12.204	0.985	60.67	AGA(Full & Parc.Turb)
PK132+992.86/PK134+032.18	1039.32	12.75	12.234	0.985	61.19	AGA(Full & Parc.Turb)
PK134+032.18/PK134+991.04	958.86	12.75	12.234	0.985	61.68	AGA(Full & Parc.Turb)

Tabla 25. Resumen Características Segmentos Modelo Nuevo (Parte IV)

RESUMEN TRAMOS MODELO NUEVO DEFINITIVO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DE PROMIORIENTE						
TRAMO	LONGITUD (Km)	DIAMETRO EXTERNO (Pulgadas)	DIAMETRO INTERNO (Pulgadas)	EFICIENCIA	TEMP (°F)	ECUACIÓN DE FLUJO
PK134+991.04/PK136+037.02	1045.98	12.75	12.234	0.985	62.21	AGA(Full & Parc.Turb)
PK136+037.02/PK136+963.70	926.68	12.75	12.234	0.985	62.68	AGA(Full & Parc.Turb)
PK136+963.70/PK137+985.98	1022.28	12.75	12.234	0.985	63.20	AGA(Full & Parc.Turb)
PK137+985.98/PK139+000.95	1014.97	12.75	12.234	0.985	63.72	AGA(Full & Parc.Turb)
PK139+000.95/PK140+021.17	1020.22	12.75	12.234	0.985	64.24	AGA(Full & Parc.Turb)
PK140+021.17/V.S. CRISTALES	515.78	12.75	12.234	0.985	64.50	AGA(Full & Parc.Turb)
V.S. CRISTALES/PK141+050.42	513.47	12.75	12.234	0.985	64.76	AGA(Full & Parc.Turb)
PK141+050.42/PK141+956.93	906.51	12.75	12.234	0.985	65.22	AGA(Full & Parc.Turb)
PK141+956.93/PK143+052.36	1095.43	12.75	12.234	0.985	65.78	AGA(Full & Parc.Turb)
PK143+052.36/PK143+998.62	946.26	12.75	12.234	0.985	66.26	AGA(Full & Parc.Turb)
PK143+998.62/PK145+019.13	1020.51	12.75	12.234	0.985	66.78	AGA(Full & Parc.Turb)
PK145+019.13/PK146+032.38	1013.25	12.75	12.234	0.985	67.29	AGA(Full & Parc.Turb)
PK146+032.38/PK146+951.32	918.94	12.75	12.234	0.985	67.76	AGA(Full & Parc.Turb)
PK146+951.32/PK147+964.62	1013.30	12.75	12.234	0.985	68.27	AGA(Full & Parc.Turb)
PK147+964.62/PK149+001.98	1037.36	12.75	12.234	0.985	68.80	AGA(Full & Parc.Turb)
PK149+001.98/PK150+011.29	1009.31	12.75	12.234	0.985	69.31	AGA(Full & Parc.Turb)
PK150+011.29/V.S. ICP	202.65	12.75	12.234	0.985	69.42	AGA(Full & Parc.Turb)
V.S. ICP/PK150+976.65	762.71	12.75	12.234	0.985	69.78	AGA(Full & Parc.Turb)
PK150+976.65/PK151+975.37	998.72	12.75	12.234	0.985	70.25	AGA(Full & Parc.Turb)
PK151+975.37/PK152+330	354.00	12.75	12.234	0.985	70.42	AGA(Full & Parc.Turb)
PK152+330/PK153+020.77	691.40	12.75	12.094	0.985	70.75	AGA(Full & Parc.Turb)
PK153+020.77/PK153+962.30	941.53	12.75	12.094	0.985	71.20	AGA(Full & Parc.Turb)
PK153+962.30/V.D. PIEDECUESTA	865.12	12.75	12.09	0.985	70.00	AGA(Full & Parc.Turb)
V.D. PIEDECUESTA/PK154+981.19	153.77	12.75	12.094	0.985	71.68	AGA(Full & Parc.Turb)
PK154+981.19/PK155+988.79	1007.60	12.75	12.094	0.985	72.16	AGA(Full & Parc.Turb)
PK155+988.79/PK157+003.21	1014.42	12.75	12.094	0.985	72.64	AGA(Full & Parc.Turb)
PK157+003.21/PK 157+250 0.330	247.00	12.75	12.09	0.985	80.00	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 157+250 0.330 A 0.25/PK157+	150.00	12.75	12.094	0.985	72.83	AGA(Full & Parc.Turb)
PK157+400 0.250 A 0.330/PK 157	33.50	12.75	12.094	0.985	72.84	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 157-433.5 0.330 A 0.250/PK1	487.50	12.75	12.094	0.985	73.07	AGA(Full & Parc.Turb)
PK157-940 0.250 A 0.330/PK158+	124.47	12.75	12.094	0.985	73.13	AGA(Full & Parc.Turb)
PK158+045.68/PK159+000.54	954.86	12.75	12.094	0.985	73.59	AGA(Full & Parc.Turb)
PK159+000.54/PK 159+470 0.330	470.00	12.75	12.09	0.985	80.00	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 159+470 0.330 A 0.406/PK160	569.79	12.75	11.934	0.985	74.08	AGA(Full & Parc.Turb)
PK160+040.33/PK161+048.04	1007.71	12.75	11.934	0.985	74.56	AGA(Full & Parc.Turb)
PK161+048.04/PK161+954.57	906.53	12.75	11.934	0.985	74.99	AGA(Full & Parc.Turb)
PK161+954.57/PK162+972.30	1017.73	12.75	11.934	0.985	75.47	AGA(Full & Parc.Turb)
PK162+972.30/PK164+020.73	1048.43	12.75	11.934	0.985	75.97	AGA(Full & Parc.Turb)
PK164+020.73/V.S.LA HORMIGA	613.92	12.75	11.934	0.985	76.26	AGA(Full & Parc.Turb)
V.S.LA HORMIGA/PK165+034.51	399.86	12.75	11.934	0.985	76.45	AGA(Full & Parc.Turb)
PK165+034.51/PK165+961.61	927.10	12.75	11.934	0.985	76.89	AGA(Full & Parc.Turb)
PK165+961.61/PK167+007.92	1046.31	12.75	11.934	0.985	77.39	AGA(Full & Parc.Turb)
PK167+007.92/PK168+026.66	1018.74	12.75	11.934	0.985	77.87	AGA(Full & Parc.Turb)
PK168+026.66/PK169+036.74	1010.08	12.75	11.934	0.985	78.35	AGA(Full & Parc.Turb)
PK169+036.74/PK170+041.74	1005.00	12.75	11.934	0.985	78.82	AGA(Full & Parc.Turb)
PK170+041.74/PK171+047.31	1005.57	12.75	11.934	0.985	79.30	AGA(Full & Parc.Turb)
PK171+047.31/PK171+953.72	906.41	12.75	11.934	0.985	79.73	AGA(Full & Parc.Turb)
PK171+953.72/PK172+961.35	1007.63	12.75	11.934	0.985	80.21	AGA(Full & Parc.Turb)

Tabla 26. Resumen Características Segmentos Modelo Nuevo (Parte V)17

RESUMEN TRAMOS MODELO NUEVO DEFINITIVO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DE PROMIORIENTE						
TRAMO	LONGITUD (Km)	DIAMETRO EXTERNO (Pulgadas)	DIAMETRO INTERNO (Pulgadas)	EFICIENCIA	TEMP (°F)	ECUACIÓN DE FLUJO
PK172+961.35/PK174+004.92	1043.57	12.75	11.934	0.985	80.71	AGA(Full & Parc.Turb)
PK174+004.92/PK174+950.90	945.98	12.75	11.934	0.985	81.15	AGA(Full & Parc.Turb)
PK174+950.90/PK175+990.64	1039.74	12.75	11.934	0.985	81.65	AGA(Full & Parc.Turb)
PK175+990.64/E. PALENQUE	1161.36	12.75	11.934	0.985	82.20	AGA(Full & Parc.Turb)
E. PALEMQUE/METROGAS	242.21	8.625	7.981	1.05	82.31	AGA(Full & Parc.Turb)
PK048+000/METROGAS	499.70	8.625	7.981	1.05	82.34	AGA(Full & Parc.Turb)
AGUILAS/PK048+000	766.40	8.625	7.981	1.05	82.37	AGA(Full & Parc.Turb)
PK047+000/AGUILAS	233.60	8.625	7.981	1.05	82.38	AGA(Full & Parc.Turb)
AEROPUERTO/PK047+000	650.90	8.625	7.981	1.05	82.41	AGA(Full & Parc.Turb)
PK046+000/AEROPUERTO	349.10	8.625	7.981	1.05	82.42	AGA(Full & Parc.Turb)
PK045+000/PK046+000	1000.00	8.625	7.981	1.05	82.47	AGA(Full & Parc.Turb)
GASMOVIL/PK045+000	650.90	8.625	7.981	1.05	82.50	AGA(Full & Parc.Turb)
PK044+000/GASMOVIL	349.13	8.625	7.981	1.05	82.51	AGA(Full & Parc.Turb)
PK043+000/PK044+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	82.56	AGA(Full & Parc.Turb)
PK042+000/PK043+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	82.60	AGA(Full & Parc.Turb)
PK041+000/PK042+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	82.65	AGA(Full & Parc.Turb)
PK040+000/PK041+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	82.69	AGA(Full & Parc.Turb)
PK039+000/PK040+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	82.74	AGA(Full & Parc.Turb)
PK038+000/PK039+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	82.78	AGA(Full & Parc.Turb)
PK037+000/PK038+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	82.82	AGA(Full & Parc.Turb)
PK036+000/PK037+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	82.87	AGA(Full & Parc.Turb)
PK035+000/PK036+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	82.91	AGA(Full & Parc.Turb)
PK034+000/PK035+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	82.96	AGA(Full & Parc.Turb)
PK033+000/PK034+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	83.00	AGA(Full & Parc.Turb)
PK032+000/PK033+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	83.05	AGA(Full & Parc.Turb)
PK031+000/PK032+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	83.09	AGA(Full & Parc.Turb)
PK030+000/PK031+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	83.14	AGA(Full & Parc.Turb)
PK029+000/PK030+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	83.18	AGA(Full & Parc.Turb)
PK028+000/PK029+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	83.22	AGA(Full & Parc.Turb)
PK027+000/PK028+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	83.27	AGA(Full & Parc.Turb)
LIBANO/PK027+000	857.80	8.625	8.117	1.05	83.31	AGA(Full & Parc.Turb)
Leg BB	10.00	6.625	6.235	1.1	83.31	AGA(Full & Parc.Turb)
PK026+000/LIBANO	142.19	8.625	8.117	1.05	83.31	AGA(Full & Parc.Turb)
PK025+000/PK026+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	83.36	AGA(Full & Parc.Turb)
PK024+000/PK025+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	83.40	AGA(Full & Parc.Turb)
PK023+000/PK024+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	83.45	AGA(Full & Parc.Turb)
PK022+000/PK023+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	83.49	AGA(Full & Parc.Turb)
PK021+000/PK022+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	83.54	AGA(Full & Parc.Turb)
PK020+000/PK021+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	83.58	AGA(Full & Parc.Turb)
PK019+000/PK020+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	83.62	AGA(Full & Parc.Turb)
PK018+000/PK019+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	83.67	AGA(Full & Parc.Turb)
PK017+000/PK018+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	83.71	AGA(Full & Parc.Turb)
PK016+000/PK017+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	83.76	AGA(Full & Parc.Turb)
PK015+000/PK016+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	83.80	AGA(Full & Parc.Turb)
PK014+000/PK015+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	83.85	AGA(Full & Parc.Turb)
PK013+000/PK014+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	83.89	AGA(Full & Parc.Turb)

Tabla 27. Resumen Características Segmentos Modelo Nuevo (Parte VI)

RESUMEN TRAMOS MODELO NUEVO DEFINITIVO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DE PROMIORIENTE						
TRAMO	LONGITUD (Km)	DIAMETRO EXTERNO (Pulgadas)	DIAMETRO INTERNO (Pulgadas)	EFICIENCIA	TEMP (°F)	ECUACIÓN DE FLUJO
PK012+000/PK013+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	83.94	AGA(Full & Parc.Turb)
PK0011+000/PK012+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	83.98	AGA(Full & Parc.Turb)
PK0010+000/PK0011+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	84.02	AGA(Full & Parc.Turb)
PK009+000/PK0010+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	84.07	AGA(Full & Parc.Turb)
PK008+000/PK009+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	84.11	AGA(Full & Parc.Turb)
PK007+000/PK008+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	84.16	AGA(Full & Parc.Turb)
PK006+000/PK007+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	84.20	AGA(Full & Parc.Turb)
PK005+000/PK006+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	84.25	AGA(Full & Parc.Turb)
PK004+000/PK005+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	84.29	AGA(Full & Parc.Turb)
PK003+000/PK004+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	84.34	AGA(Full & Parc.Turb)
PK002+000/PK003+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	84.38	AGA(Full & Parc.Turb)
PK001+000/PK002+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	84.42	AGA(Full & Parc.Turb)
ESTACION UNO/PK001+000	1000.00	8.625	8.117	1.05	84.47	AGA(Full & Parc.Turb)
COX LIB	10.00	6.625	6.235	1.1	83.31	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 59+000/ESTACION UNO	391.18	8.625	8.117	1.04	84.47	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 58+000/PK 59+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.46	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 57+000/PK 58+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.46	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 56+000/PK 57+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.46	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 55+000/PK 56+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.45	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 54+000/PK 55+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.45	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 53+000/PK 54+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.45	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 52+000/PK 53+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.44	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 51+000/PK 52+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.44	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 50+000/PK 51+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.43	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 49+000/PK 50+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.43	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 48+000/PK 49+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.43	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 47+000/PK 48+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.42	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 46+000/PK 47+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.42	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 45+000/PK 46+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.42	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 44+000/PK 45+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.41	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 43+000/PK 44+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.41	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 42+000/PK 43+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.41	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 41+000/PK 42+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.40	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 40+000/PK 41+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.40	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 39+000/PK 40+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.40	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 38+000/PK 39+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.39	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 37+000/PK 38+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.39	AGA(Full & Parc.Turb)
PENJAMO/PK 37+000	889.60	8.625	8.117	1.04	84.38	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 35+000/PENJAMO	1110.42	8.625	8.117	1.04	84.38	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 34+000/PK 35+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.38	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 33+000/PK 34+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.37	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 32+000/PK 33+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.37	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 31+000/PK 32+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.37	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 30+000/PK 31+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.36	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 29+000/PK 30+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.36	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 28+000/PK 29+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.36	AGA(Full & Parc.Turb)
PK027+000/PK 28+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.35	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 26+000/PK027+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.35	AGA(Full & Parc.Turb)

Tabla 28. Resumen Características Segmentos Modelo Nuevo (Parte VII)

RESUMEN TRAMOS MODELO NUEVO DEFINITIVO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DE PROMIORIENTE						
TRAMO	LONGITUD (Km)	DIAMETRO EXTERNO (Pulgadas)	DIAMETRO INTERNO (Pulgadas)	EFICIENCIA	TEMP (°F)	ECUACIÓN DE FLUJO
PK 25+000/PK 26+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.34	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 24+000/PK 25+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.34	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 23+000/PK 24+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.34	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 22+000/PK 23+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.33	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 21+000/PK 22+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.33	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 20+000/PK 21+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.33	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 19+000/PK 20+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.32	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 18+000/PK 19+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.32	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 17+000/PK 18+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.32	AGA(Full & Parc.Turb)
P 16+000/PK 17+000	1000.00	8.625	8.117	1.04	84.31	AGA(Full & Parc.Turb)
RODEO/P 16+000	922.10	8.625	8.117	1.04	84.31	AGA(Full & Parc.Turb)
COX AG	10.00	6.625	6.235	1.1	84.31	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 14+000/RODEO	1077.95	8.625	8.117	0.98	84.30	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 13+000/PK 14+000	1000.00	8.625	8.117	0.98	84.30	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 12+000/PK 13+000	1000.00	8.625	8.117	0.98	84.30	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 11+000/PK 12+000	1000.00	8.625	8.117	0.98	84.29	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 10+000/PK 11+000	1000.00	8.625	8.117	0.98	84.29	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 9+000/PK 10+000	1000.00	8.625	8.117	0.98	84.29	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 8+000/PK 9+000	1000.00	8.625	8.117	0.98	84.28	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 7+000/PK 8+000	1000.00	8.625	8.117	0.98	84.28	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 6+000/PK 7+000	1000.00	8.625	8.117	0.98	84.28	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 5+000/PK 6+000	1000.00	8.625	8.117	0.98	84.27	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 4+000/PK 5+000	1000.00	8.625	8.117	0.98	84.27	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 3+000/PK 4+000	1000.00	8.625	8.117	0.98	84.27	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 2+000/PK 3+000	1000.00	8.625	8.117	0.98	84.26	AGA(Full & Parc.Turb)
PK 1+000/PK 2+000	1000.00	8.625	8.117	0.98	84.26	AGA(Full & Parc.Turb)
GALAN/PK 1+000	1000.00	8.625	8.117	0.98	84.25	AGA(Full & Parc.Turb)
AGUILAS 6/LEBRJA	5309.70	6.625	6.235	1.1	82.57	AGA(Full & Parc.Turb)
LEBRJA/MINIFALDA	2500.00	6.625	6.235	1.1	82.69	AGA(Full & Parc.Turb)
MINIFALDA/PARAGUAY	6147.05	6.625	6.235	1.1	82.99	AGA(Full & Parc.Turb)
PARAGUAY/COX LIB-P	7020.93	6.625	6.235	1.1	83.32	AGA(Full & Parc.Turb)
COX LIB-P/CENTENERIO	3571.94	6.625	6.235	1.05	83.50	AGA(Full & Parc.Turb)
CENTENERIO/VEGADUQUE	4861.19	6.625	6.235	1.05	83.73	AGA(Full & Parc.Turb)
VEGADUQUE/MIRAFLORES	7417.47	6.625	6.235	1.05	84.09	AGA(Full & Parc.Turb)
MIRAFLORES/ESTACION UNO 6	11026.75	6.625	6.235	1.05	84.62	AGA(Full & Parc.Turb)
ESTACION UNO 6/PAYOA	1635.09	6.625	6.235	1.05	84.70	AGA(Full & Parc.Turb)

Figura 18. Esquema General Modelo de Simulación

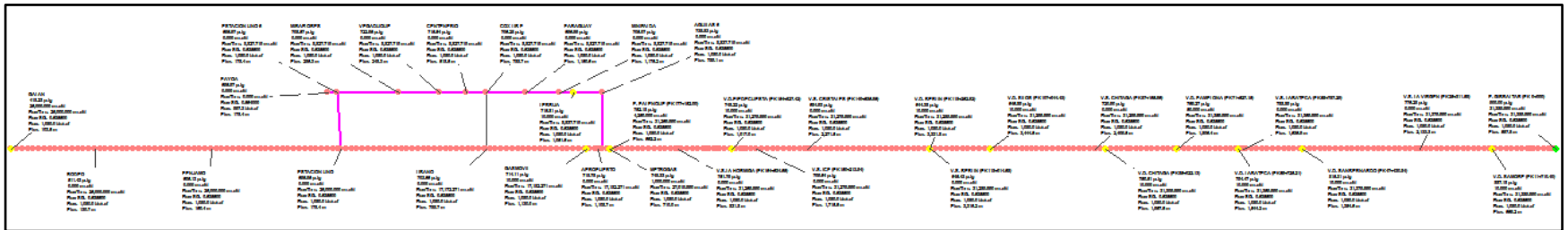


Figura 19. Detalle I Modelo de Simulación

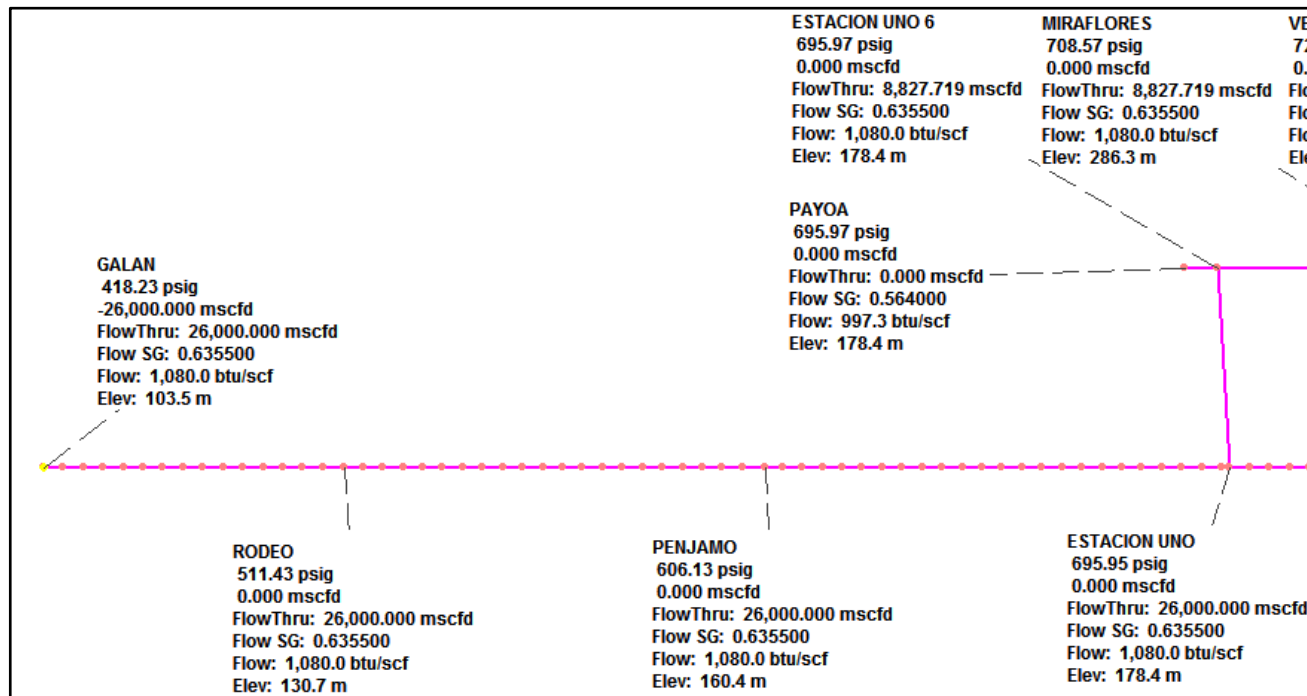


Figura 20. Detalle II Modelo de Simulación

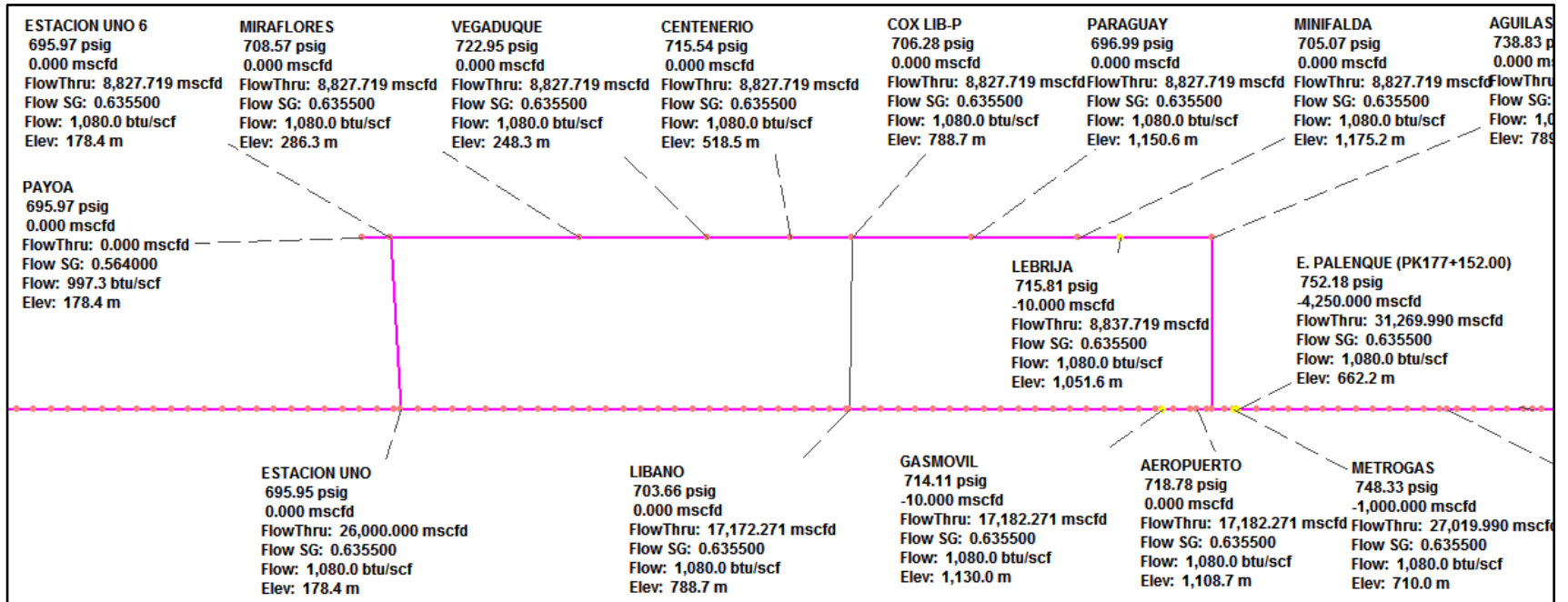


Figura 21. Detalle III Modelo de Simulación

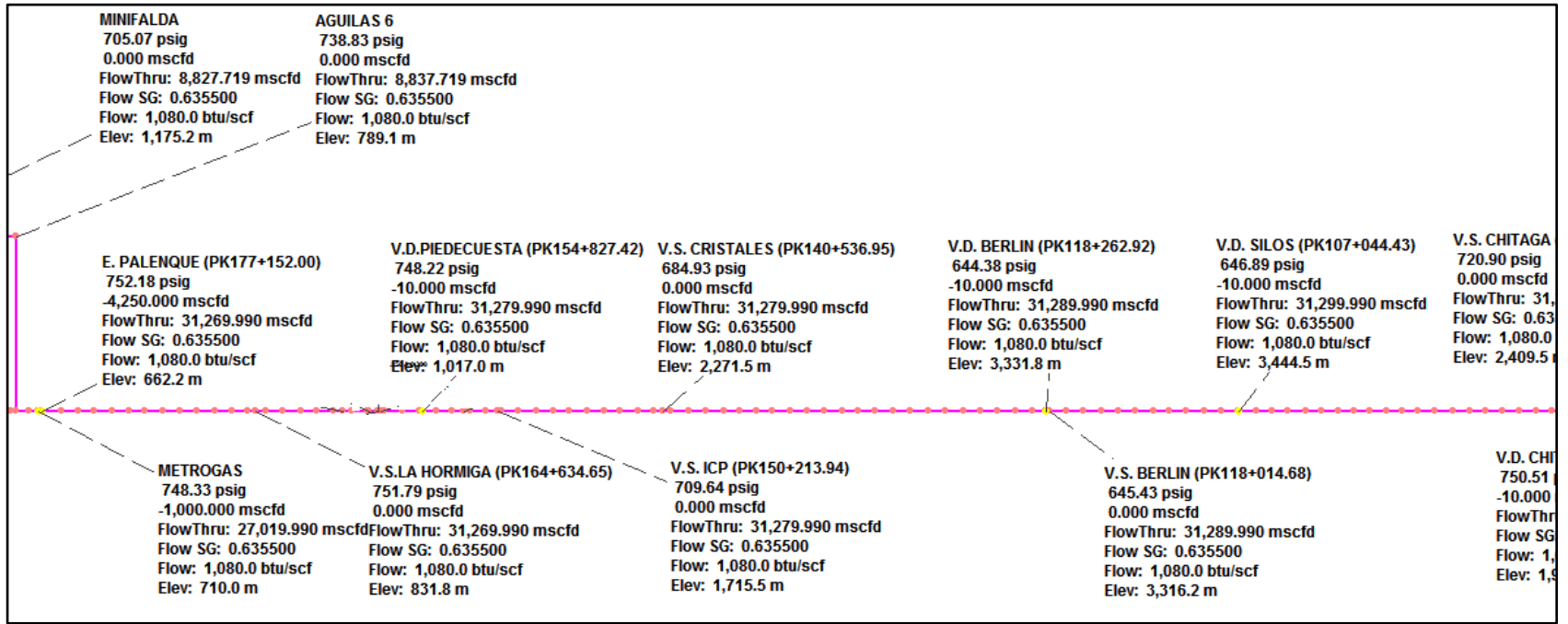
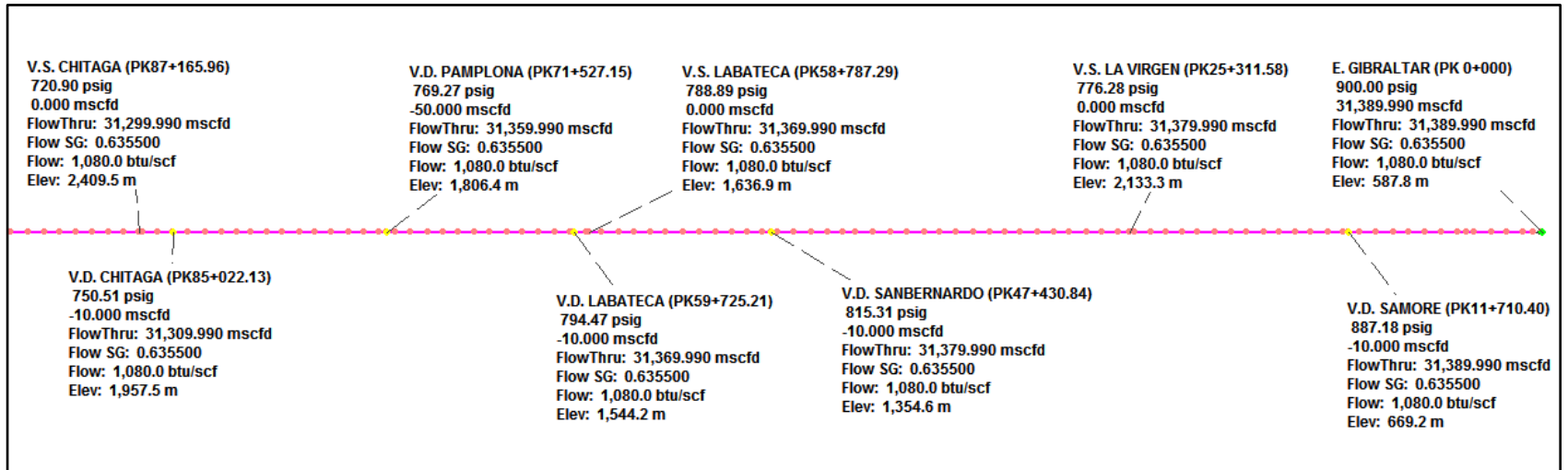


Figura 22. Detalle IV Modelo de Simulación



4.2 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN LUEGO DE AJUSTADO EL MODELO

Con el modelo reestructurado y luego de realizar varios ajustes en la eficiencia de cada uno de los tramos que conforman el modelo de simulación del sistema de transporte de Promioriente, se obtuvieron los siguientes resultados que a consideración del autor se encuentran dentro de la incertidumbre apropiada para este tipo de modelos.

A continuación se presentan las gráficas de presión de cada una de las estaciones, válvulas de seccionamiento y válvulas de derivación del sistema de transporte de Promioriente en donde se cuenta con datos históricos almacenados por el sistema SCADA durante el mes de junio de 2014. En cada una de las gráficas se puede apreciar el valor de presión real obtenido del sistema SCADA, el valor de presión según el modelo actual de Promioriente y el valor de presión según el modelo nuevo propuesto por el autor.

Figura 23. Gráfico Comparativo Presiones Válvula La Virgen

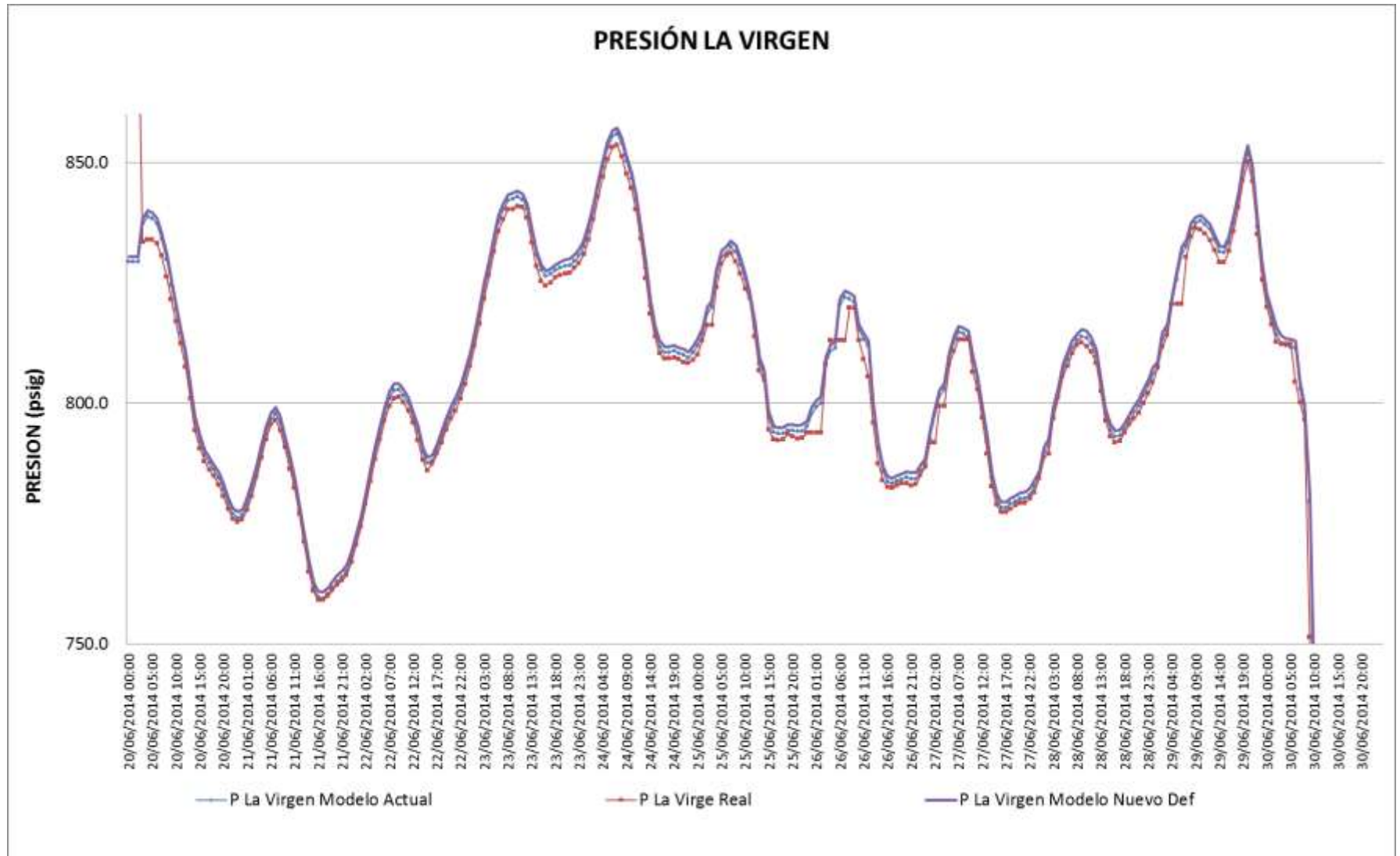


Figura 24. Gráfico Comparativo Presiones Válvula Labateca

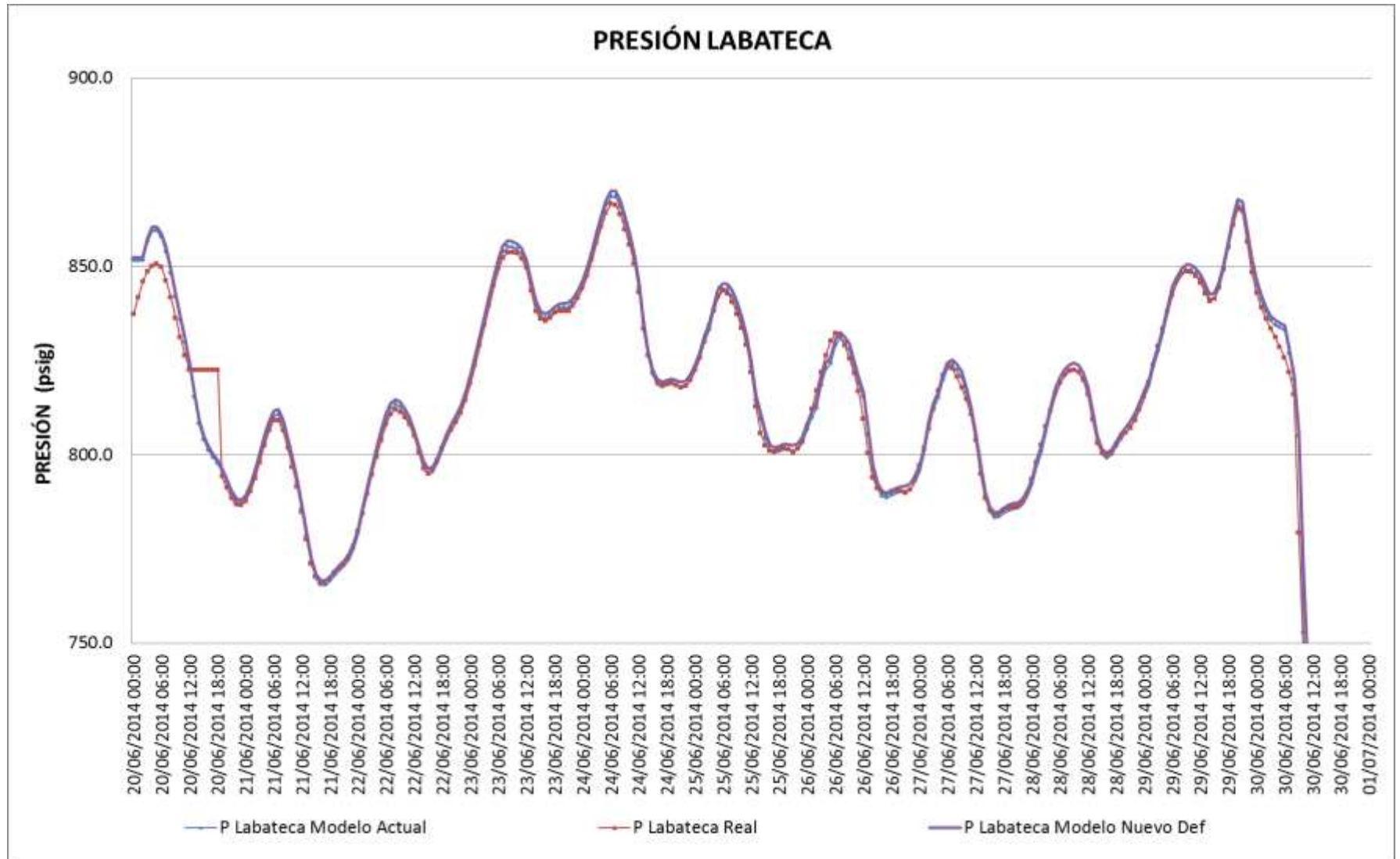


Figura 25. Gráfico Comparativo Presiones Válvula Chitagá

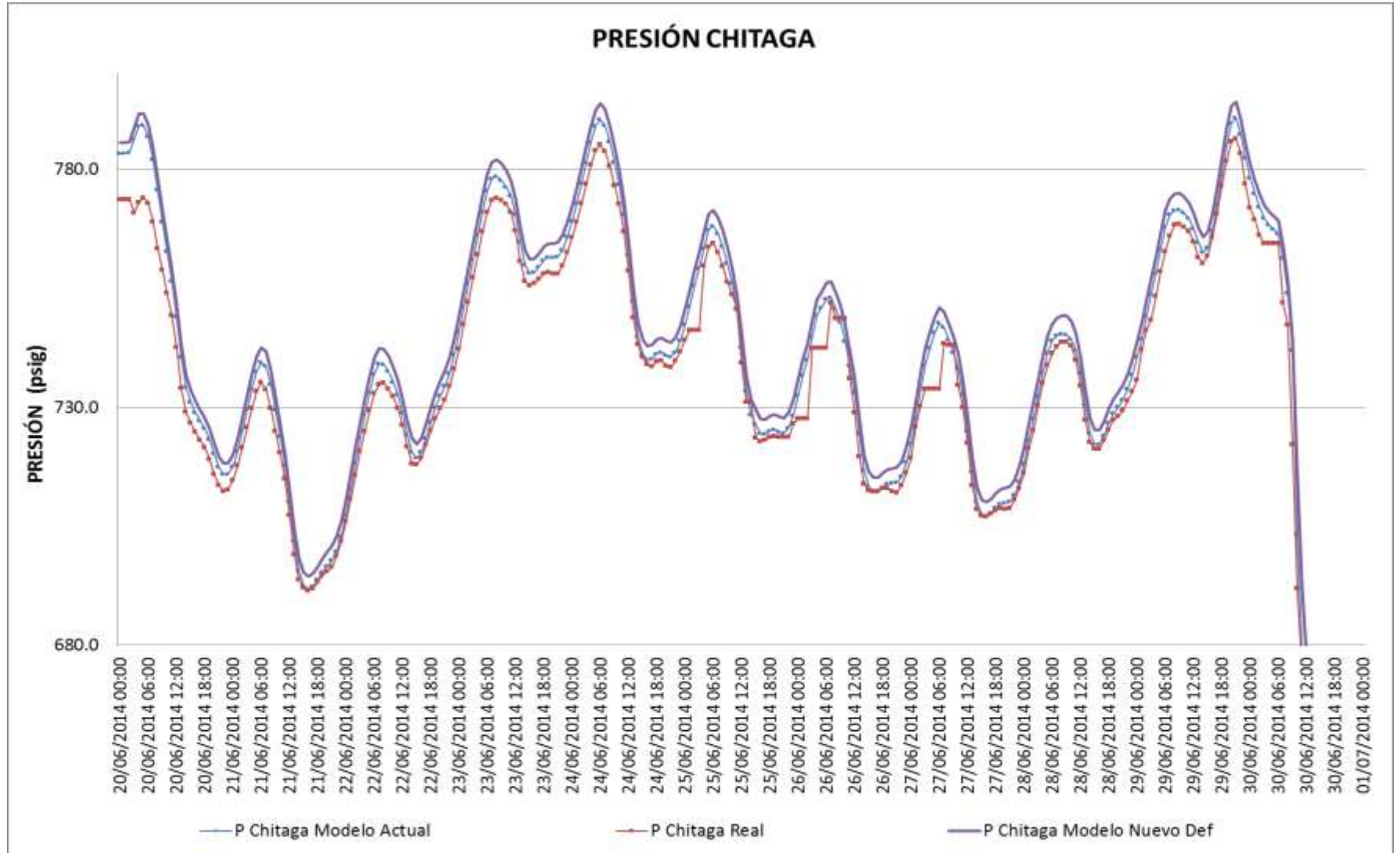


Figura 26. Gráfico Comparativo Presiones Válvula Berlín

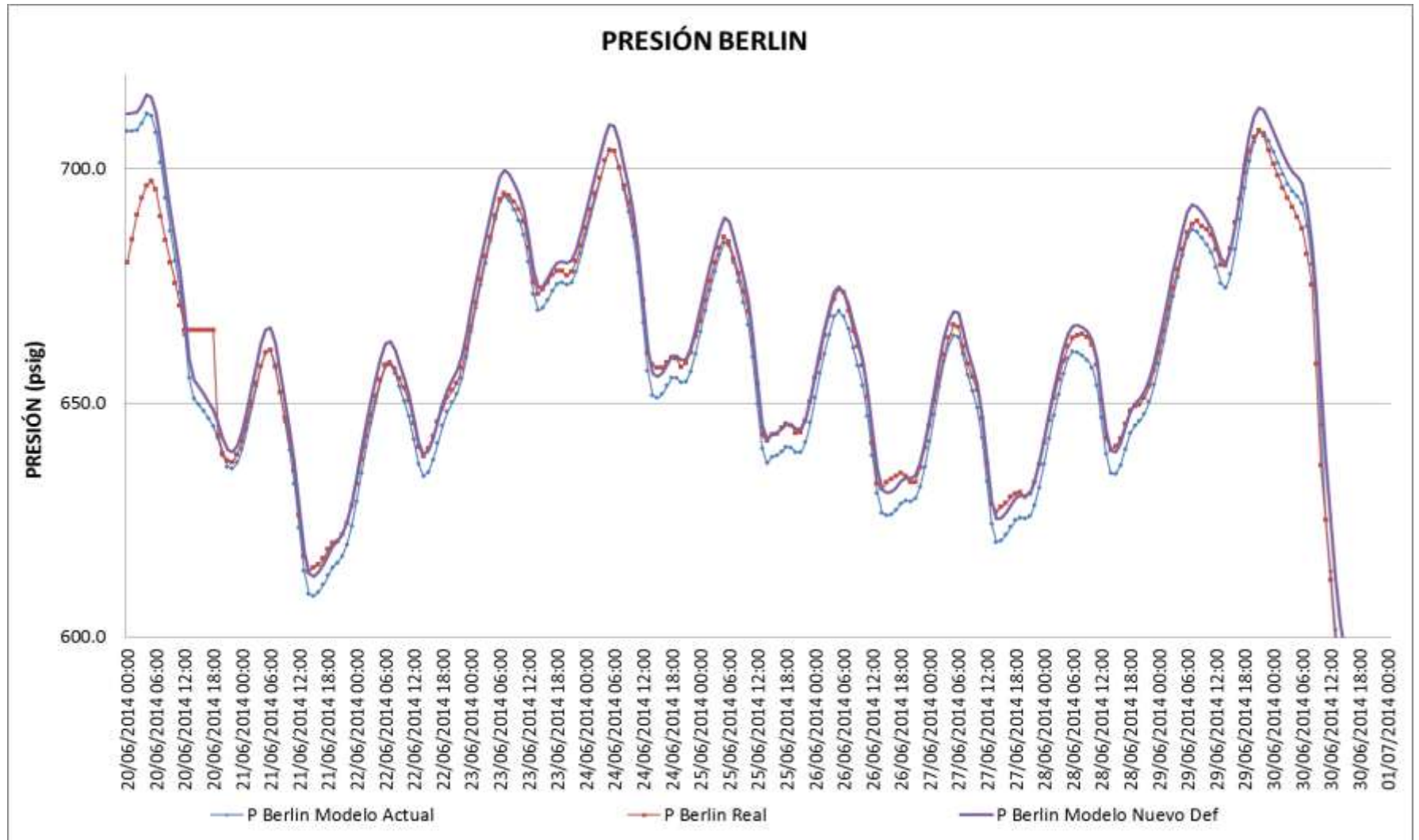


Figura 27. Gráfico Comparativo Presiones Válvula Cristales

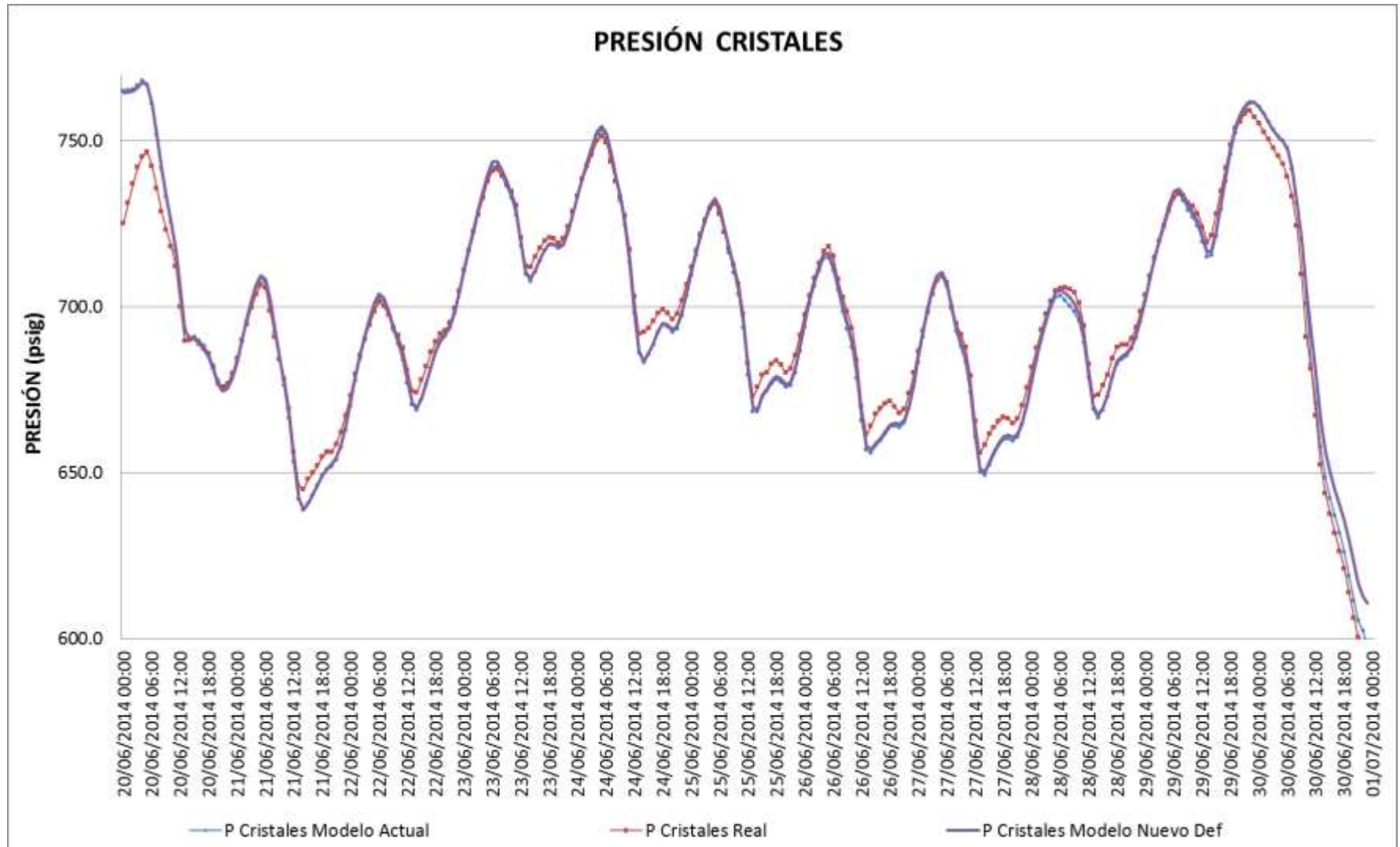


Figura 28. Gráfico Comparativo Presiones Válvula Granadillo

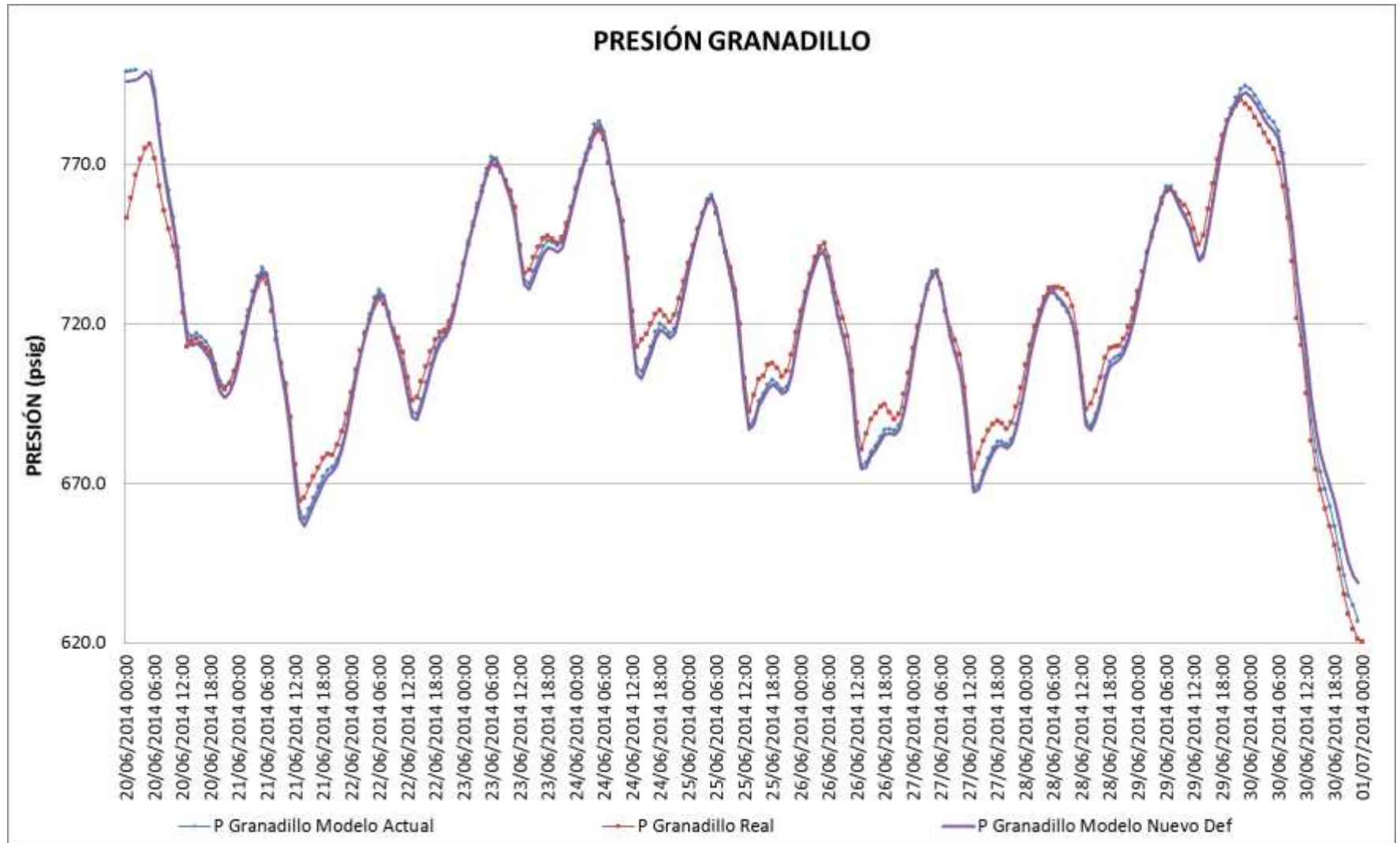


Figura 29. Gráfico Comparativo Presiones Válvula La Hormiga

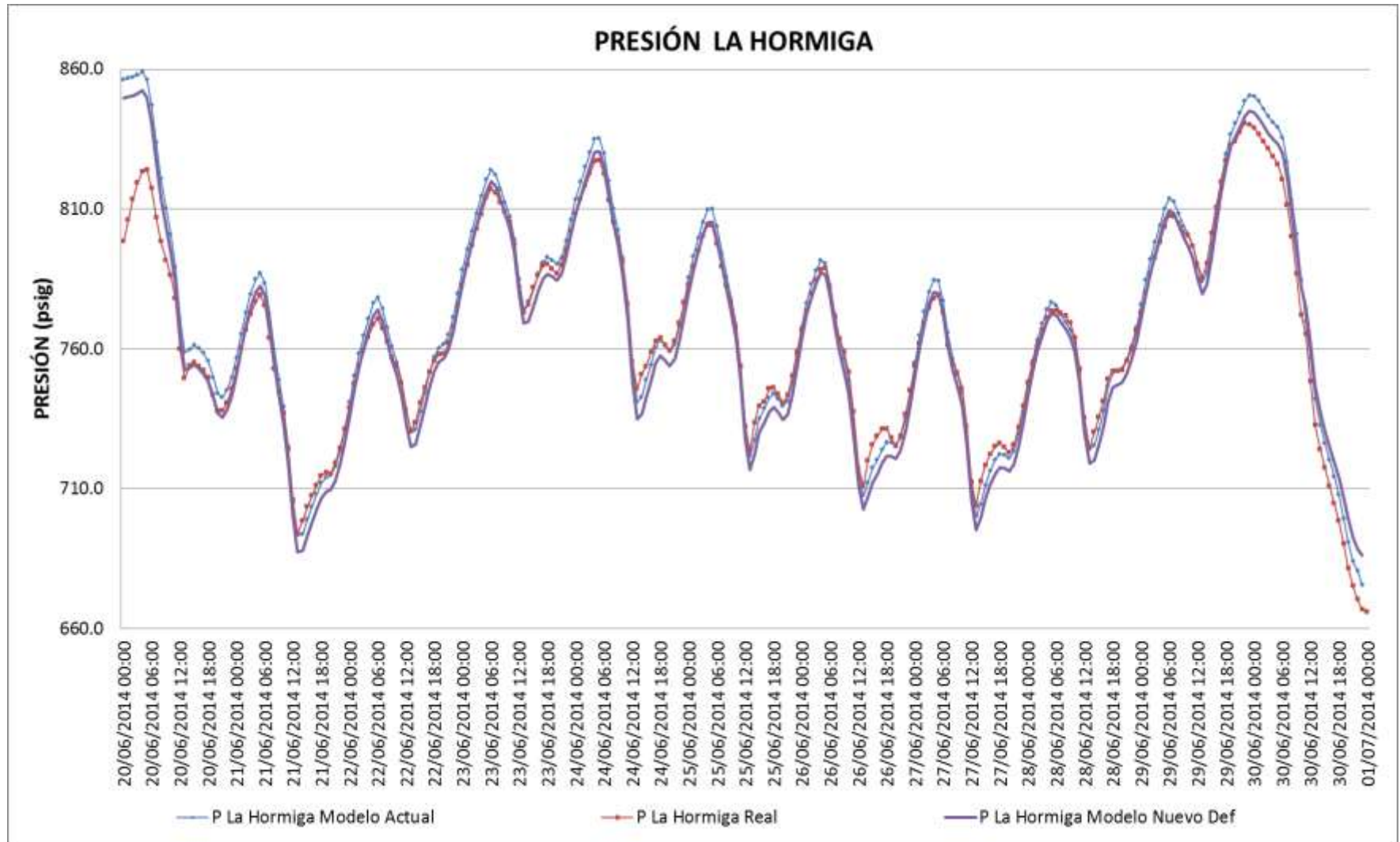


Figura 30. Gráfico Comparativo Presiones Estación Palenque

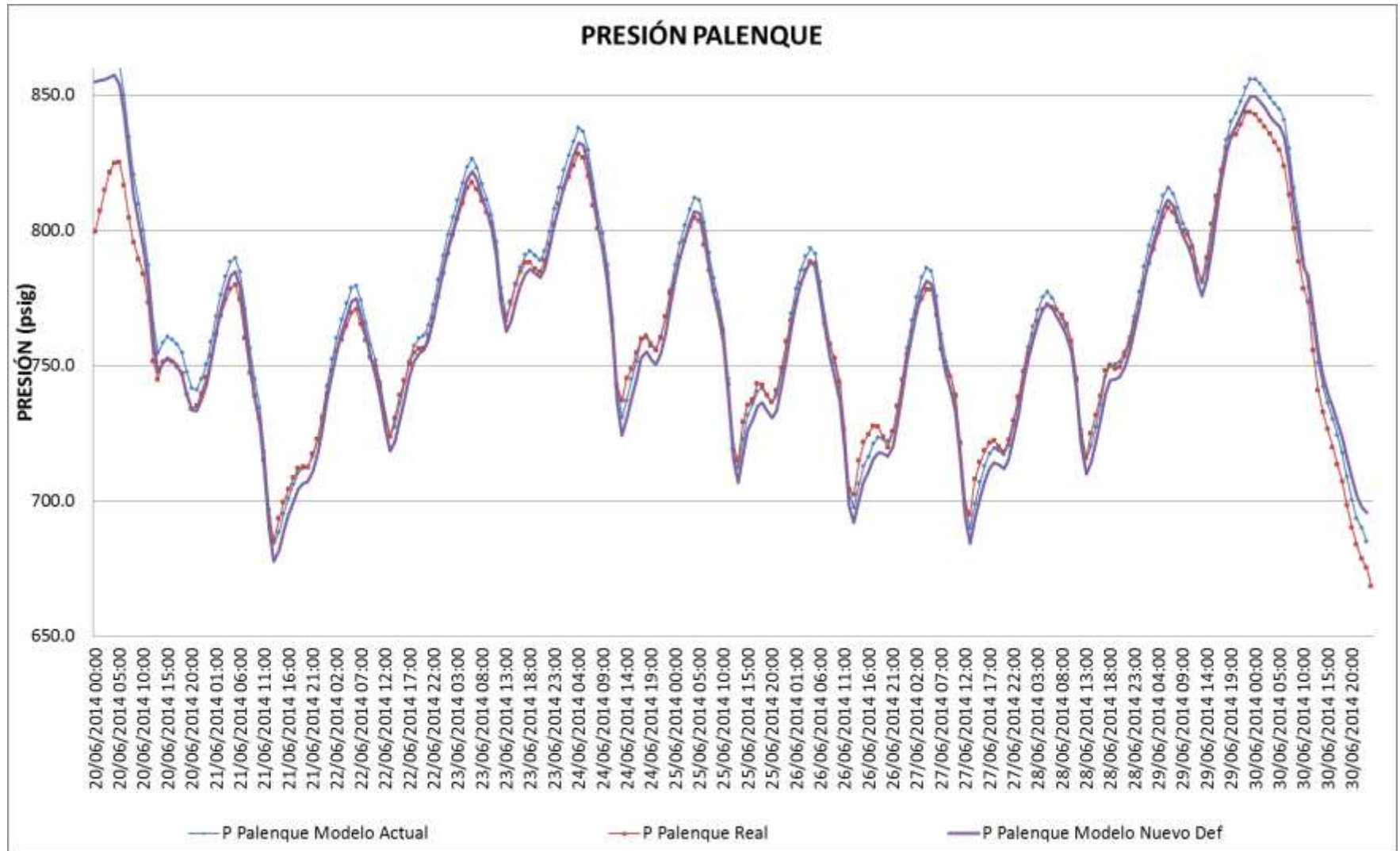


Figura 31. Gráfico Comparativo Presiones Válvula Aeropuerto

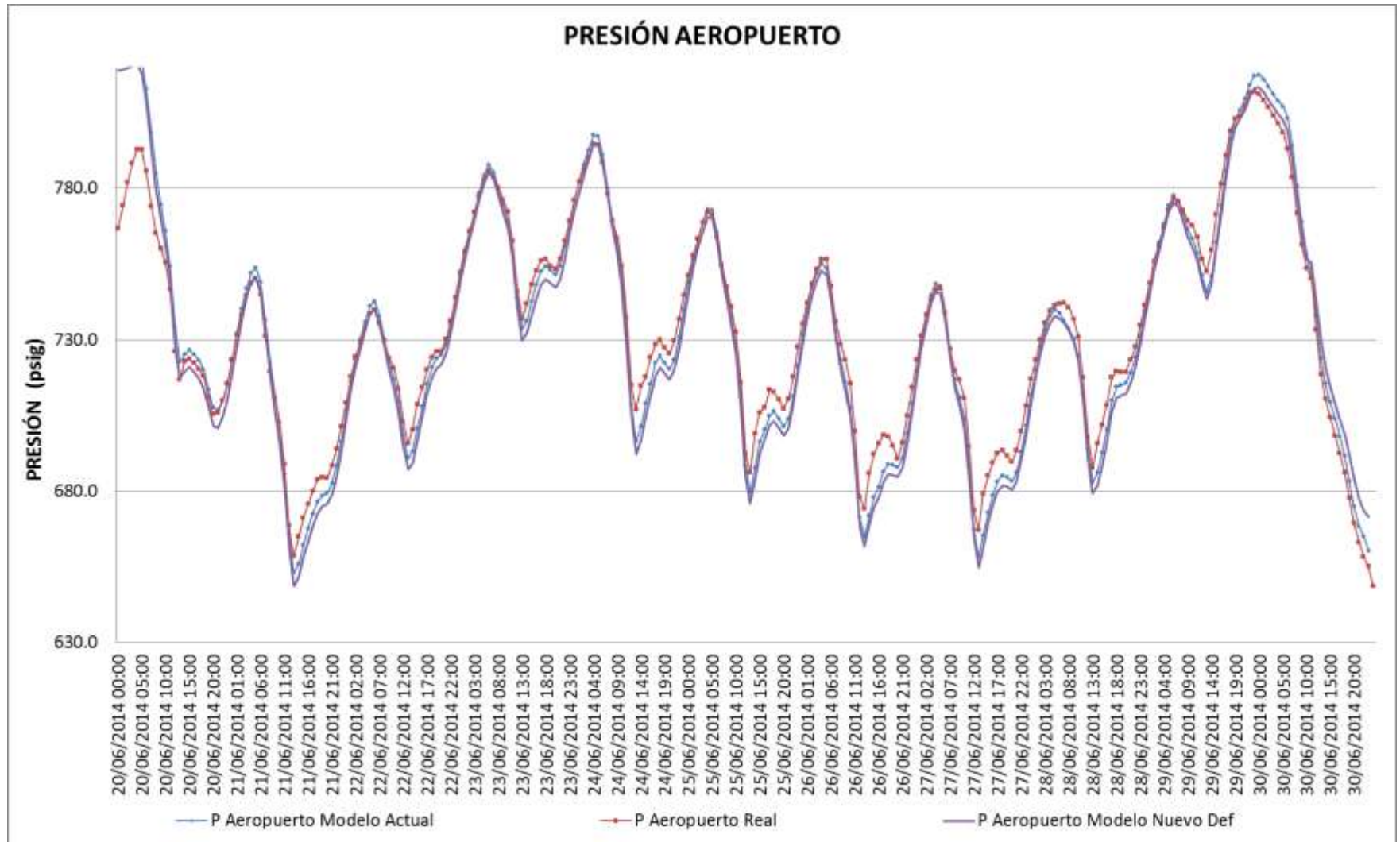


Figura 32. Gráfico Comparativo Presiones Válvula Líbano

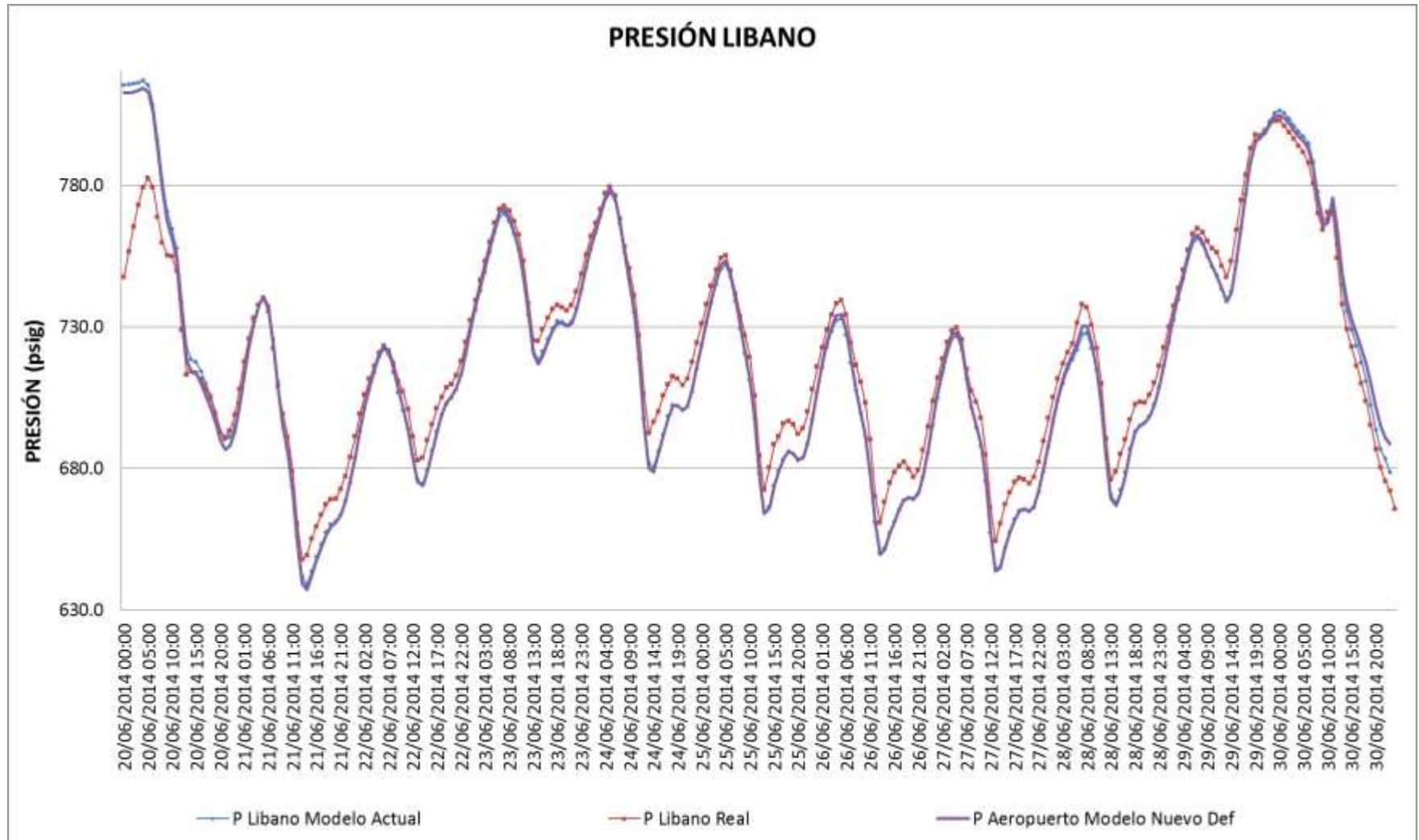


Figura 33. Gráfico Comparativo Presiones Válvula Centenario

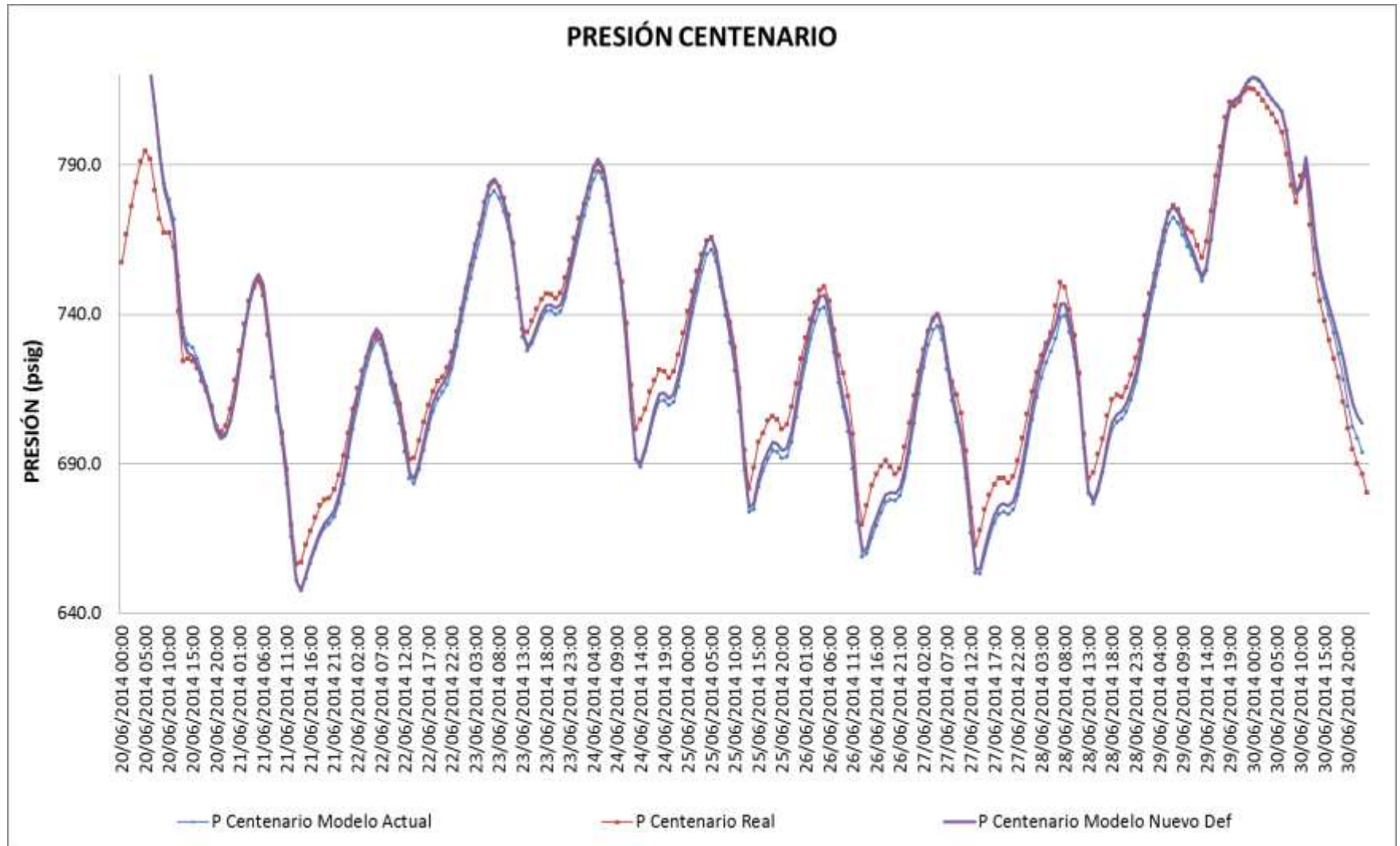


Figura 34. Gráfico Comparativo Presiones Estación Uno

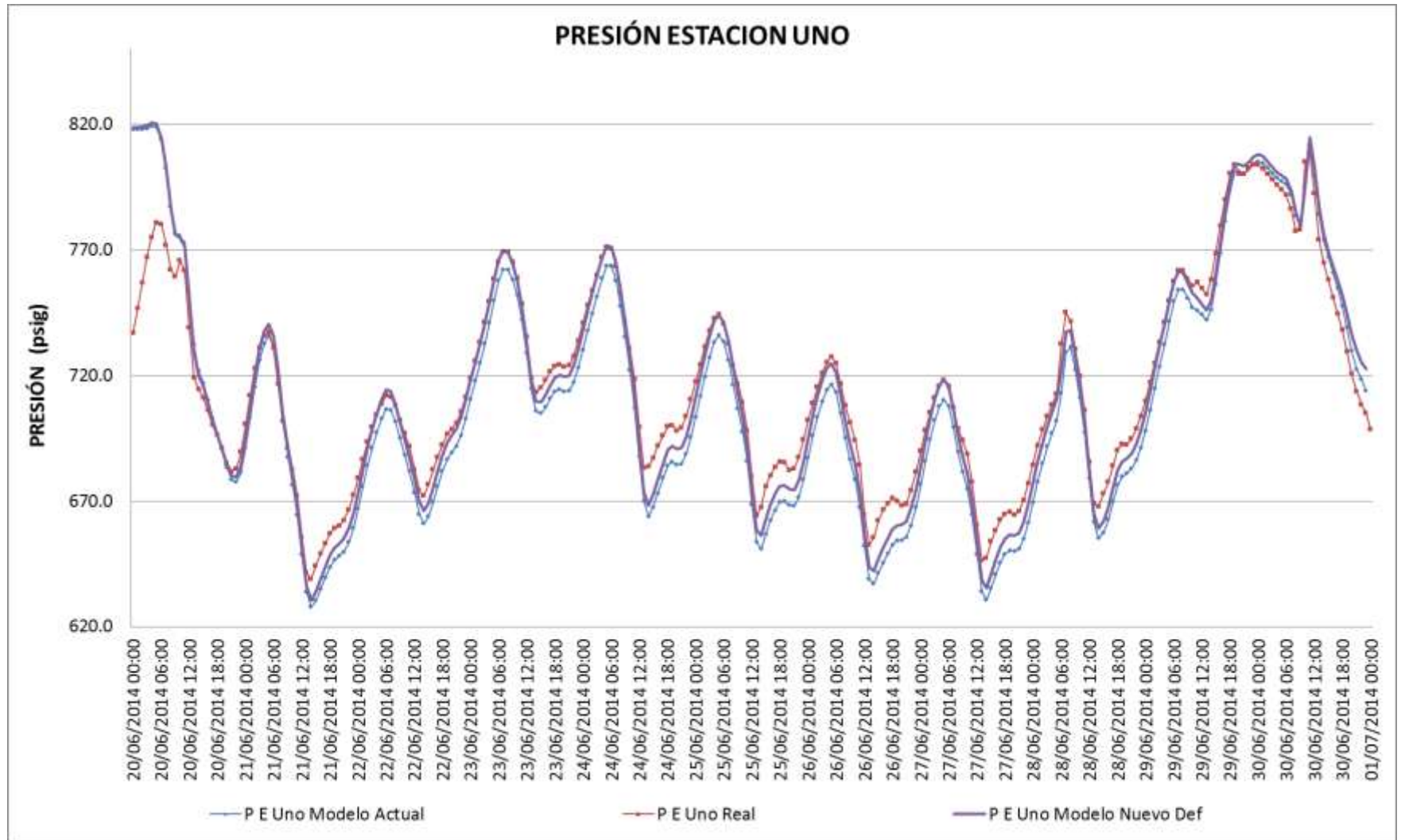


Figura 35. Gráfico Comparativo Presiones Válvula El Rodeo

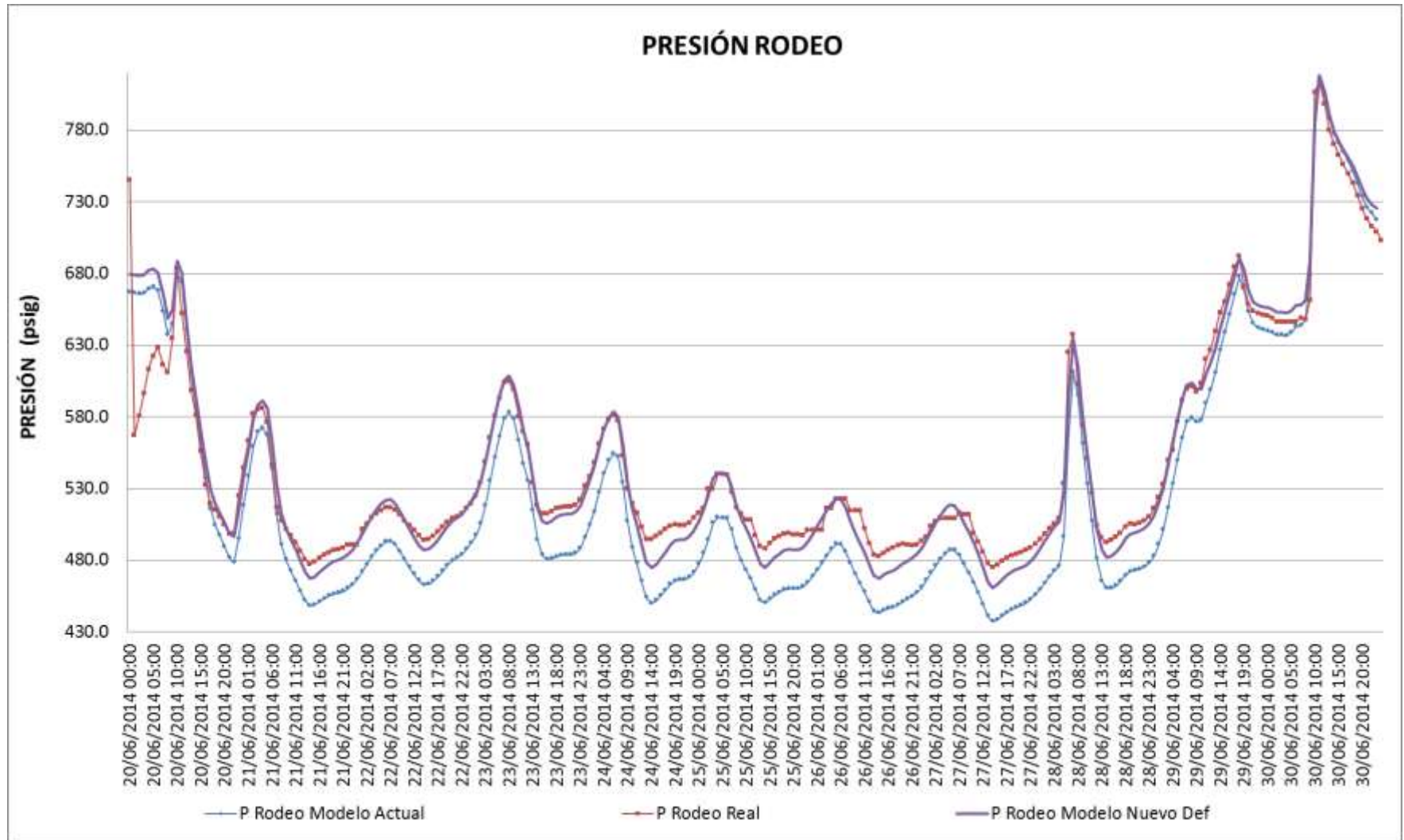
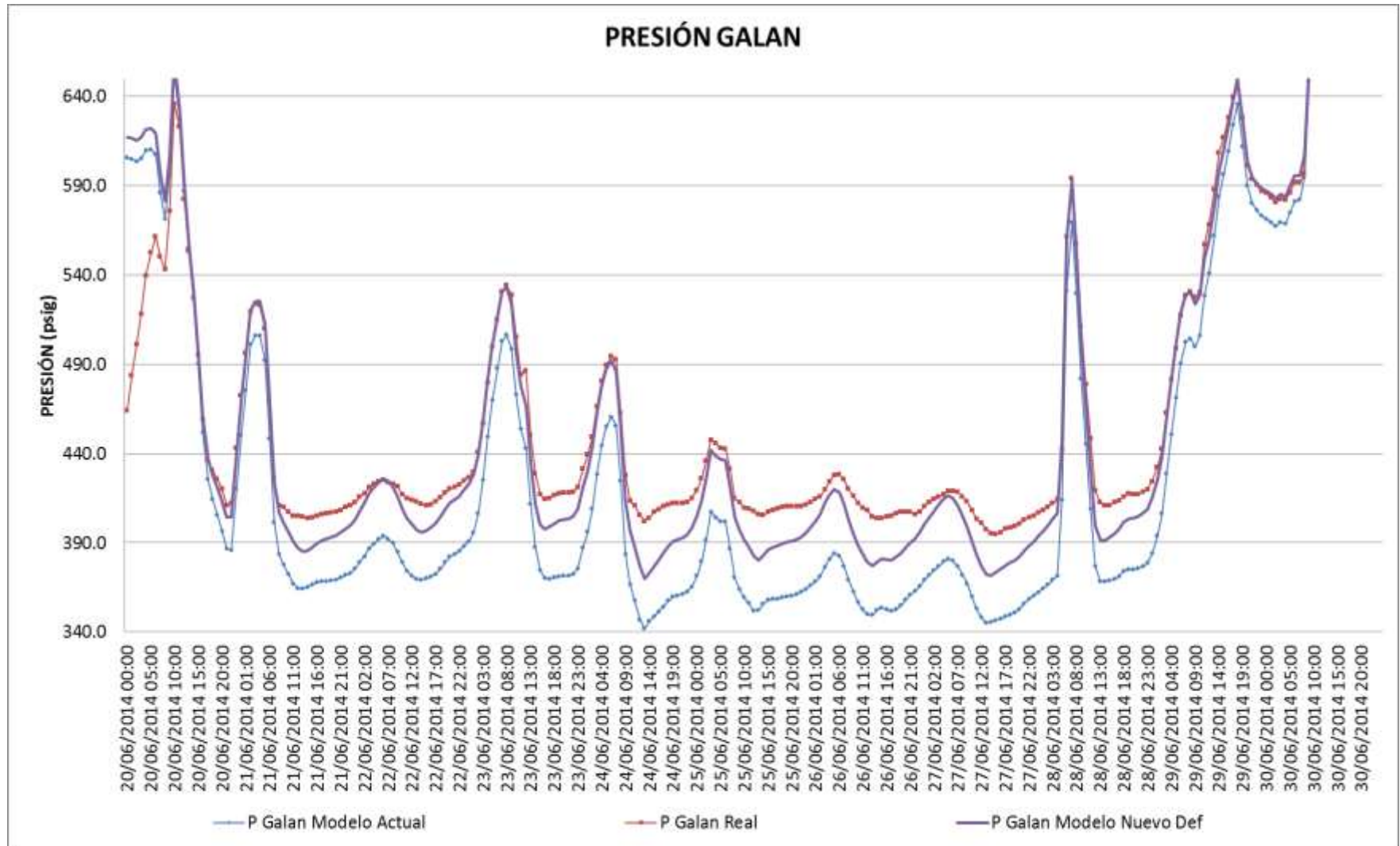


Figura 36. Gráfico Comparativo Presiones Estación Galán

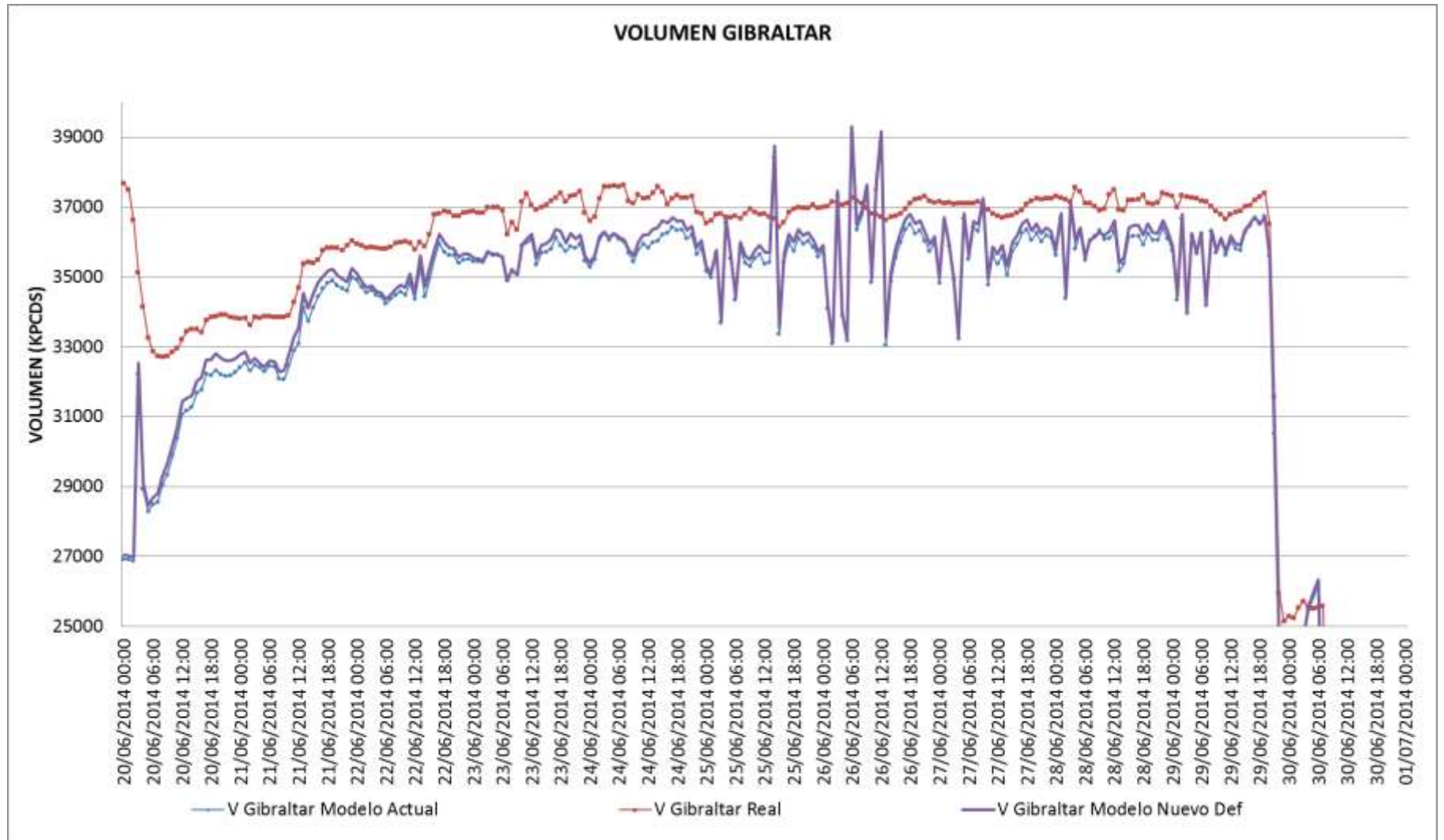


Al revisar con detenimiento las gráficas comparativas de presión en cada una de las estaciones, es evidente el mejor ajuste alcanzado por el nuevo modelo propuesto, especialmente en el tramo de gasoducto comprendido entre Estación Uno y Galán.

Es importante resaltar que pese al esfuerzo por ajustar el modelo al máximo en los puntos de control de Rodeo y Galán, fue casi imposible lograr un mejor ajuste que el mostrado en las gráficas anteriores. Muy probablemente este comportamiento se deba a las perturbaciones que sufre el flujo al llegar a la etapa de regulación sumado a la alta velocidad del gas que puede alcanzar los **10 m/s**.

Al revisar el comportamiento del flujo en el punto de entrada Gibraltar, ver Figura 37. Gráfico Comparativo Volúmenes Estación Gibraltar, se hace evidente la gran diferencia entre el flujo reportado por el sistema de medición del punto de entrada GIBRALTAR y la suma de todos los puntos de salida del sistema de transporte de Promioriente, ratificando de esta manera la observación hecha en el numeral 3.3.1 de este documento.

Figura 37. Gráfico Comparativo Volúmenes Estación Gibraltar



5. ALTERNATIVAS DE OPTIMIZACIÓN Y AUMENTO DE CAPACIDAD DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DE PROMIORIENTE

Teniendo en cuenta las condiciones del sistema de transporte de Promioriente, los contratos existente y las proyecciones del campo Gibraltar, se evalúa la condición de capacidad máxima actual del sistema de transporte y se analizan tres escenarios de aumento de capacidad con el fin de verificar cual es el más eficiente en caso de confirmarse un aumento en la capacidad del campo Gibraltar.

5.1 CONDICIONES DE SIMULACIÓN

Las condiciones que se tienen en cuenta para la simulación de la capacidad máxima de transporte del sistema actual y de las alternativas de aumento de capacidad son las siguientes:

- Se utiliza el nuevo modelo definido durante el desarrollo de este documento.
- Se utiliza la información de consumos históricos de la semana del 2 al 8 de junio de 2014, la cual presenta el día de mayor consumo reportado durante ese mes.
- Se aumenta a Prorrata los consumos del gasoducto Barrancabermeja-Payoa-Bucaramanga. Para iniciar el aumento a prorrata de los consumos en Galán, se utiliza un valor de 20 MPCDS, el cual corresponde al volumen contratado actualmente.
- Los consumos del Gasoducto Gibraltar-Bucaramanga se mantienen constantes sin un aumento a prorrata.
- Poder Calorífico del gas: 1080 Btu/pc
- Gravedad Específica del gas: 0.6355

- Presión de entrega en Gibraltar: 1200 psig, constante. Corresponde a la máxima presión de operación permitida por el Reglamento Único de Transporte-RUT.
- Temperatura de entrega en Gibraltar: 96 °F, constante. Corresponde con la temperatura promedio del mes de junio de 2014.
- Presión de entrega de los compresores: 1200 psig, constante. Corresponde a la máxima presión de operación permitida por el Reglamento Único de Transporte-RUT.
- Temperatura máxima de entrega de los compresores: 120 °F. Corresponde a la máxima temperatura de operación permitida por el Reglamento Único de Transporte-RUT.
- Factor de consumo de combustible de los compresores 0.0002 MPDC/HP
- La presión mínima en el punto de entrega GALÁN es 400 psig.
- El consumo en el punto de entrega Galán se asume constante en el tiempo.

5.2 DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD MÁXIMA ACTUAL DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DE PROMIORIENTE

La capacidad de transporte que actualmente utiliza Promioriente es de cerca de 47 MPCDS, de los cuales 32.5 MPCDS podrían ser entregados en el punto GALAN.

La capacidad máxima actual de transporte de gas natural del sistema de Promioriente utilizando el nuevo modelo de simulación, corresponde a 46.055 MPCDS, de los cuales 34 MPCDS podrían ser entregados en el punto GALAN.

Es importante resaltar que pese a que el nuevo modelo muestra una capacidad total de transporte menor, en casi 1 MPCDS, con relación a la capacidad actualmente utilizada por Promioriente, el nuevo modelo muestra una capacidad de transporte hasta el punto GALAN, de 1.5 MPCDS adicionales a la capacidad actualmente establecida. Esto cobra mayor importancia ya que los estudios de uso futuro de gas natural muestran que la mayor probabilidad de crecimiento real de

consumo de gas se encuentra en el punto de entrega GALAN y no en los otros puntos de salida del sistema de transporte.

Este aumento de 1.5 MPCDS se debe básicamente a dos condiciones:

1. A los ajustes realizados en el nuevo modelo de simulación utilizado.
2. A las nuevas condiciones de consumo.

Luego de la entrada en operación del campo Gibraltar, los consumos reales en unidades de volumen de la ciudad de Bucaramanga y su Área Metropolitana, se redujeron alrededor del 8%, esto debido a la diferencia entre los poderes caloríficos del gas Gibraltar y el Gas Guajira que atendía anteriormente a los usuarios.

Para entender mejor esta situación es necesario comprender que el consumo de gas es constante en unidades de energía, y por lo tanto entre mayor poder calorífico tenga el gas natural utilizado, menor será el volumen requerido para atender la misma demanda de energía.

Teniendo en cuenta que el poder calorífico del gas Gibraltar es mayor en un 8% que el poder calorífico del gas Guajira, entonces, el volumen requerido de gas Gibraltar será menor en un 8% que el volumen requerido de gas Guajira.

Debido a esta situación, se reducen los volúmenes de gas para atender los consumos de Bucaramanga y su Área Metropolitana y por ende se reducen los picos de consumo y los aumentos a prorrata, lo que deriva en un aumento en la capacidad de transporte hasta el punto de entrega GALAN el cual se localiza al final del sistema de transporte de Promioriente.

5.3 ALTERNATIVAS DE AUMENTO DE CAPACIDAD DE TRANSPORTE DEL SISTEMA DE PROMIORIENTE.

Los estudios realizados hasta el momento estiman que la capacidad máxima esperada del campo Gibraltar alcance los 60 MPCDS (Millones de Pies Cúbicos por Día Estándar). Bajo esta premisa se plantean tres escenarios de inversión sobre la infraestructura del sistema de transporte de Promioriente, de tal manera que se esté en capacidad de atender la demanda de transporte desde el campo Gibraltar y hacia los diferentes puntos de salida.

Los escenarios planteados son los siguientes:

- Construcción de un Loop de 8 pulgadas de diámetro en el tramo entre Payoa y Barrancabermeja.
- Construcción de una estación compresora en Bucaramanga.
- Construcción de un Loop de 8 pulgadas de diámetro en el tramo entre Payoa y Barrancabermeja y construcción de una estación compresora en Bucaramanga

5.3.1 Construcción de un Loop de 8 pulgadas de diámetro en el tramo entre Payoa y Barrancabermeja.

Bajo este escenario se plantea la construcción de un gasoducto de 8 pulgadas de diámetro y 60 kilómetros de longitud de manera paralela al gasoducto existente Barrancabermeja-Payoa también de 8 pulgadas de diámetro. Este escenario se evalúa considerando que el tramo que mayor restricción genera en el sistema de transporte es el comprendido entre Bucaramanga y Barrancabermeja.

En caso de realizar esta obra de ampliación de la infraestructura, la nueva capacidad máxima del sistema de transporte de Promioriente sería de 55.113 MPCDS, de los cuales 42 MPCDS se entregarían en el punto de salida GALÁN.

Esta opción permite aumentar la capacidad del gasoducto y además ofrece al sistema de transporte la posibilidad de realizar maniobras operativas que permitan sacar de servicio tramos específicos del gasoducto Barrancabermeja-Payoa con una mínima reducción de la capacidad de transporte total, lo cual aumenta la confiabilidad del sistema de transporte, sin embargo, el aumento en la capacidad no alcanza los esperados 60 MPCDS y por lo tanto no satisface los requerimientos de transporte.

5.3.2 Construcción de una estación compresora en Bucaramanga.

Bajo este escenario se plantea la construcción de una estación Compresora en la Planta El Palenque ubicada en la ciudad de Bucaramanga. Es importante tener presente que la planta El Palenque es el punto en donde finaliza el gasoducto Gibraltar-Bucaramanga de 12 pulgadas e inicia el gasoducto Barrancabermeja-Payoa-Bucaramanga de 8 y 6 pulgadas y además es el punto en donde se entrega el gas que alimenta a Bucaramanga y parte de su Área Metropolitana.

Se evalúa la construcción de la estación compresora en Bucaramanga considerando que el tramo que mayor restricción genera en el sistema de transporte es el comprendido entre Bucaramanga y Barrancabermeja, además de que desde el punto de vista operativo y locativo es el idóneo. Se descartan sitios como LIBANO, debido a que esta es una zona de inestabilidad geológica y geotécnica; Así mismo se descarta la ubicación de la estación compresora en el sector de URIBE-URIBE debido a que es una zona alejada del casco urbano y con una situación complicada desde el punto de vista de orden público.

En caso de realizar esta obra de ampliación de la infraestructura, la nueva capacidad máxima del sistema de transporte de Promioriente sería de 60.776 MPCDS, de los cuales 47 MPCDS se entregarían en el punto de salida GALÁN.

Esta opción permite aumentar la capacidad del gasoducto de manera considerable, superado los 60 MPCDS que se prevé podría producir el campo Gibraltar.

5.3.3 Construcción de un Loop de 8 pulgadas de diámetro en el tramo entre Payoa y Barrancabermeja y construcción de una estación compresora en Bucaramanga.

Pese a que con la construcción de la estación compresora en Bucaramanga se logra el objetivo de transportar los 60 MPCDS que produciría el campo Gibraltar, se consideró la opción de analizar la capacidad máxima alcanzada por el sistema de transporte en caso de realizar la construcción tanto del loop Barranca-Payoa como de las estación Compresora en Bucaramanga.

Bajo este escenario, el tramo crítico del sistema de transporte de Promioriente pasa de ser el tramo Bucaramanga-Payoa-Barrancabermeja y se convierte en el tramo Gibraltar-Bucaramanga. Por esta razón el aumento en la capacidad máxima de transporte solo aumenta hasta 64 MPCDS.

5.3.4 Resumen de la capacidad máxima de transporte del sistema actual y de los escenarios de aumento de capacidad de transporte.

A continuación se presenta una tabla resumen con los resultados de cada uno de los escenarios evaluados en este capítulo.

Tabla 29. Resumen Capacidad Máxima Actual y Escenarios Aumento de Capacidad de Transporte

WFP Data	PRESION Gibraltar (psig)	FLUJO Gibraltar (kpcd)	PRESION B/manga (psig)	FLUJO GGB (kpcd)	PRESION Barranca a SNT (psig)	PRESION Barranca REFINERIA (psig)	FLUJO GBP (kpcd)	FLUJO BARRANCA (kpcd)	COMPRESOR BUCARAMANGA								
									FLUJO Compresor (kpcd)	PRESION Succión (psig)	FLUJO Succión (kpcd)	PRESION Descarga (psig)	FLUJO descarga (kpcd)	POTENCIA (hp)	EFICIENCIA (%)	TEMP. Descarga (°F)	COMBUSTIBLE (kpcd)
ACTUALMENTE																	
MAXIMO	1,200.0	51,471.4	1,058.7	65,522.1	704.2	704.2	44,605.2	34,000.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
PROMEDIO	1,200.0	45,611.9	963.6	46,055.6	519.2	519.2	38,493.7	34,000.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
MINIMO	1,200.0	35,563.5	889.1	35,435.0	403.8	403.8	34,858.4	34,000.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
CONSTRUCCION LOOP PAYOA BARRANCA EN 8 PULGADAS (59.4 km)																	
MAXIMO	1,200.0	59,532.8	985.3	76,017.4	731.6	731.6	-55,100.5	-42,000.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
PROMEDIO	1,200.0	54,320.3	852.0	55,113.0	505.3	505.3	-47,551.1	-42,000.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
MINIMO	1,200.0	43,816.0	759.2	43,636.9	401.5	401.5	-43,060.3	-42,000.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
COMPRESOR EN BUCARAMANGA																	
MAXIMO	1,200.0	68,577.2	925.7	82,577.0	427.2	427.2	-61,660.1	-47,000.0	61,637.2	925.7	62,297.3	1,200.0	61,637.2	3,430.8	0.75	120.0	686.2
PROMEDIO	1,200.0	60,776.6	735.5	60,773.8	424.0	424.0	-53,211.9	-47,000.0	53,210.5	735.5	53,580.7	1,200.0	53,210.5	1,851.0	0.75	120.0	370.2
MINIMO	1,200.0	49,139.4	527.3	48,763.2	420.2	420.2	-48,186.5	-47,000.0	48,188.7	527.3	48,373.5	1,200.0	48,188.7	924.0	0.75	120.0	184.8
CONSTRUCCION LOOP PAYOA BARRANCA EN 8 PULGADAS (59.4 km) Y COMPRESOR EN BUCARAMANGA																	
MAXIMO	1,200.0	71,640.3	885.2	86,512.7	923.2	923.2	-65,595.8	-50,000.0	65,539.4	885.2	66,440.4	1,200.0	65,539.4	4,743.7	0.75	120.0	948.7
PROMEDIO	1,200.0	64,238.8	660.1	64,170.3	921.6	921.6	-56,608.4	-50,000.0	56,606.2	660.1	57,089.7	1,200.0	56,606.2	2,417.3	0.75	120.0	483.5
MINIMO	1,200.0	52,272.5	415.1	51,838.9	919.7	919.7	-51,262.3	-50,000.0	51,264.8	415.1	51,489.1	1,200.0	51,264.8	1,121.7	0.75	120.0	224.3

6. CONCLUSIONES

1. Cuando no se tiene conocimiento alguno del comportamiento real del sistema de transmisión que se desea modelar, como por ejemplo en los casos de diseños de nuevos ductos, la mejor opción es utilizar la ecuación “Colebrook”, ya que con el uso de una única ecuación es posible modelar el sistema en todo el espectro de números de Reynolds en el régimen turbulento, y además ofrece un escenario de simulación conservador.
2. De acuerdo a la información disponible a la fecha de elaboración de este documento y una vez desarrolladas las pruebas sobre el modelo del sistema de transporte de Promioriente, se puede concluir que las ecuaciones de AGA ofrecen el mejor ajuste a las condiciones de flujo reales, el único inconveniente es la identificación del punto de inflexión entre el comportamiento de flujo Parcialmente turbulento y totalmente turbulento para identificar cuál de las dos ecuación AGA utilizar, sin embargo en el caso del software Winflow-Wintran esto no representa ningún problema ya que la opción de ecuación “AGA” es autónoma y calcula este punto de inflexión de manera automática utilizando el método explicado en el capítulo 1 de este documento.
3. Al momento de definir las condiciones y las características de un modelo de simulación, es fundamental revisar y definir los Parámetros Geométricos, las características del gas, los parámetros operacionales y la Ecuación de Flujo apropiada, ninguno de estos factores puede ser pasado por alto porque podría generar errores graves en los resultados de las simulaciones realizadas.

4. Una vez realizada la revisión de todos los parámetros que se involucran en la definición del modelo de simulación del sistema de transporte de gas de Promioriente, se realizan cambios importantes en cuanto a espesores de línea, definición de contaminantes del gas, adición de nuevos puntos de salida, determinación de temperaturas promedio, modificaciones de la presión base, definición de la presión barométrica por medio de cálculo dependiendo de la altura sobre el nivel del mar, entre otros. Todos estos cambios contribuyen, sin lugar a dudas, con el mejor ajuste del nuevo modelo de simulación.
5. El ajuste del nuevo modelo de simulación propuesto por el autor se estableció utilizando unas condiciones de flujo determinadas (Datos de junio de 2014), es importante realizar validaciones cuando por ejemplo, se tenga información de comportamiento real del sistema de transporte cuando se lleve al límite la capacidad del gasoducto Gibraltar-Bucaramanga de 12 pulgadas.
6. Pese a que el nuevo modelo de simulación muestra una capacidad total de transporte menor, en casi 1 MPCDS, con relación a la capacidad actualmente utilizada por Promioriente, el nuevo modelo muestra una capacidad de transporte hasta el punto GALAN, de 1.5 MPCDS adicionales a la capacidad actualmente establecida. Considerando que los estudios de uso futuro de gas natural muestran que la mayor probabilidad de crecimiento real de consumo de gas se encuentra en el punto de entrega GALAN y no en los otros puntos de salida del sistema de transporte, los resultados arrojados por el nuevo modelo de simulación, abren nuevas oportunidades de negocio para Promioriente considerando la posibilidad de comprometer hasta 1.5 MPCDS adicionales en capacidad de transporte hasta el punto de salida GALAN.

7. Con el fin de aumentar la capacidad de transporte del sistema de Promioriente hasta los 60 MPCDS esperados en el campo Gibraltar, la mejor alternativa consiste en construir una estación compresora en la Planta El Palenque ubicada en la ciudad de Bucaramanga, esta opción permite alcanzar una capacidad máxima de transporte de 60.778 MPCDS, entregando 47 MPCDS en el punto de salida GALAN.

7. RECOMENDACIONES

1. Fijar el valor de rugosidad efectiva de cada segmento y realizar los ajustes del modelo por medio de cambios en el factor de eficiencia del modelo. Esto permite un ajuste fino y previene la inclusión de sesgo en el modelo, permitiendo así que el comportamiento del modelo sea el más preciso ante cualquier condición de presión, flujo y/o temperatura.
2. Tener presente la Sensibilidad del sistema a los aumentos de flujo, es decir que tanta caída de presión por delta de flujo se obtienen bajo la condición operativa simulada y que tan cerca se está del punto de inflexión en donde esta caída de presión sufre un aumento drástico y el sistema se acerca rápidamente a su capacidad límite.
3. Antes de realizar cualquier simulación en el modelo desarrollado, es importante verificar las características del gas predeterminadas en el modelo ya que puede ocurrir un cambio importante en la calidad del gas y como en el caso del sistema de transporte de Promioriente, puede ocurrir un cambio en el campo que entrega el gas al ducto.
4. Instalar transmisores de temperatura en algunos puntos del gasoducto Payoa-Bucaramanga de 6 pulgadas que se encuentra un 60% de su recorrido en condición de tubería aérea. Lo anterior con el fin de verificar el comportamiento de la temperatura del gas con relación a la temperatura ambiente a lo largo del día.
5. Realizar un análisis detallado de las causas que están generando la distorsión de los datos de presión en el punto de salida Galán con el fin de

poder ajustar el modelo aún más con relación a este punto de control del simulador.

BIBLIOGRAFIA

SHAMESW I.H. Mecánica de Fluidos. McGraw-Hill. Tercera Edición

BRATLAND O. Pipe Flow 1, Single-Phase Flow Assurance. 2009

BUITRAGO A. y QUIROGA H. Flujo de Gas en Tuberías Bajo Condiciones No Estables. En DYNA, 132-2001, Universidad Nacional de Medellín (27 Noviembre 2001)

GREGG ENGINEERING. GEI 2011 Training – Modeling Equations. Febrero 2011

GREGG ENGINEERING. GEI 2011 Winflow Training User Manual. Febrero 2011

RHOADS G.A. Which Flow Equation – Does It Matter? Pipeline Simulation Interest Group Annual Meeting. Detroit Michigan (Octubre 27-28 1983)

Finch J.C. y Ko D.W. Fluid Flow Formulas. Pipeline Simulation Interest Group Annual Meeting. Toronto, Ontario, Canada (Octubre 20-21 1988)

Schroeder D.W. A Tutorial on Pipe Flow Equations Pipeline Simulation Interest Group Annual Meeting. Bonita Springs, Florida (Mayo 11-14 2010)