

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO
DE POLIDUCTOS A FIN DE MEJORAR LA LONGITUD DE
MEZCLA**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGÍSTER EN SISTEMAS
DE TRANSPORTE DE PETRÓLEO Y DERIVADOS**

AUTOR: RUBÉN HERNÁN SALINAS SALINAS
rubenhernansalinas@hotmail.com

DIRECTOR: ING. LENIN UBIDIA, MSc.
ubidialenin@yahoo.com

Quito, septiembre 2013

DECLARACIÓN

Yo Rubén Hernán Salinas, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Rubén Hernán Salinas

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Rubén Hernán Salinas bajo mi supervisión.

Ing. Lenin Ubidia, MSc.

DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTO

La Escuela Politécnica Nacional por darme la oportunidad de forjar y profundizar mis conocimientos; para ahondar en temas técnicos y especializados aplicados al transporte del petróleo y sus derivados; a través de docentes muy capaces y preparados, quienes supieron impartir sus conocimientos a través de la experiencia en el sector Hidrocarburífero.

De manera muy especial al Ingeniero Lenin Ubidia, quien con sus consejos y motivaciones, ha sabido dirigir y transmitir sus conocimientos para el desarrollo y culminación del presente proyecto de grado.

Rubén Hernán Salinas

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO.-

CAPÍTULO I	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Problema	2
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. Objetivo General.....	3
1.3.2. Objetivos Específicos	3
CAPÍTULO II	4
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. Transporte de petróleo y derivados por tubería.....	4
2.2. Definición y características del Sistema de Transporte de Petróleo y Derivados.....	4
2.3. Equipos y accesorios para transportar Petróleo y Derivados	5
2.4. Propiedades físicas y químicas de los Derivados del Petróleo.....	7
CAPÍTULO III	11
3. OPERACIÓN DE POLIDUCTOS	11
3.1. Características de la tubería	12
3.1.1. Rugosidad	12
3.1.2. Pérdidas por fricción	13
3.2. Operación en el Batcheo para el transporte de Petróleo y Derivados	14
3.2.1. Sistema de Bombeo	16
3.2.1.1. Caudal de flujo	16
3.2.1.2. Carga hidrostática	16
3.2.1.3. Potencia	16
3.2.2. Cavitación.....	17
3.2.2.1. Carga de Aspiración Neta positiva	17
3.3. Modelo matemático de la hidrodinámica de Poliductos en estado estable	18
3.3.1. Cálculo de la Piezométrica	19
3.3.1.1. Ecuación de la Continuidad.....	19
3.3.1.2. Ecuación de la Energía	20

3.3.2.	Sistemas de bombeo acoplado a poliductos	25
3.3.2.1.	Curva del Sistema	25
3.3.2.2.	Curva de la bomba	27
3.4.	Modelo matemático para la formación de la mezcla de productos transportados por lotes	32
3.4.1.	Ecuación de la longitud de mezcla	41
3.4.2.	Volumen de Mezcla	49
3.4.3.	Longitud de Mezcla.....	50
3.5.	Incidencia del batcheo en la operación de un poliducto	51
3.5.1.	Cálculo de la eficiencia	52
3.5.2.	Incertidumbre de la fórmula de longitud de mezcla	52
CAPÍTULO IV		56
4.	ANÁLISIS DEI BATCHEO.....	56
4.1.	Secuencia del Batcheo	56
4.2.	Interfaz de la mezcla.....	56
4.3.	Ciclo del Batcheo.....	57
4.4.	Tamaño de la mezcla.....	58
4.5.	Detección de la interfaz del batcheo	58
4.5.1.	Secuencia Poliducto Quito – Ambato	59
4.5.2.	Secuencia del Poliducto Shushufindi – Quito	59
4.6.	Datos y Resultados.....	59
4.6.1.	Datos	59
4.6.1.1.	Características de la tubería.....	59
4.6.1.2.	Datos de la bomba	60
4.6.1.3.	Viscosidad de los Productos a transportar @ 15.5 °C.....	60
4.6.1.4.	Resultados del batcheo	61
4.6.1.5.	Incidencia de la fórmula de longitud de mezcla.....	62
4.7.	Análisis Económico.....	64
4.7.1.	Costo del producto.....	64
4.7.2.	porcentaje de consumo por producto	65
CAPÍTULO V		67
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	67

ANEXO 1.....	70
<i>RED DE POLIDUCTOS EN EL ECUADOR</i>	70
ANEXO 2.....	72
DIAGRAMA RED INDUSTRIAL DE UNA ESTACIÓN DE BOMBEO DEL POLIDUCTO.....	72
ANEXO 3.....	75
EQUIPOS Y ACCESORIOS PARA TRANSPORTAR PETRÓLEO Y DERIVADOS.....	75
ANEXO 4.....	80
DATOS Y CURVA DE LA BOMBA.....	80
ANEXO 5.....	83
CÓDIGO FUENTE DE LOS PROGRAMAS PARA CALCULAR LA LONGITUD DE MEZCLA	83
ANEXO 6.....	96
RESULTADOS DEL BATCHEO POR PRODUCTOS TRANSPORTADOS.....	96
ANEXO 7.....	160
INCIDENCIA DE LAS VARIABLES EN LA FÓRMULA DE LONGITUD DE MEZCLA	160
ANEXO 8.....	162
DIAGRAMA DE PARTIDAS EN POLIDUCTOS.....	162

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Propiedades de los derivados del petróleo.....	10
Tabla 4.1.- Datos de la Bomba.....	60
Tabla 4.2.- Viscosidad de los derivados a 15°C.....	60
Tabla 4.3.- Volumen y Longitud de mezcla entre dos productos derivados del petróleo	61
Tabla 4.4.- Costo del Producto derivado del petróleo	65
Tabla 4.5.- Porcentaje de participación de los Productos en el mercado nacional	65
Tabla 4.6. Costo de la Mezcla de producto por unidad de volumen.....	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Transporte de dos productos consecutivos a través del Poliducto...	19
Figura 3.2. Conservación de la masa – Ecuación de la Continuidad	19
Figura 3.3. Comportamiento del fluido en una tubería	20
Figura 3.4. Piezométrica para <i>un solo producto en la Longitud del Poliducto</i>	22
Figura 3.5. Gradiente de Presión para <i>dos productos en la longitud del Poliducto</i>	22
Figura 3.6. Curva del Sistema en función del Caudal	25
Figura 3.7. Sistema para dos productos en el Poliducto	25
Figura 3.8. Curva de la Bomba en función del Caudal	27
Figura 3.9. Curva de la Bomba a diferentes revoluciones.....	30
Figura 3.10. Intersección de las Curvas de la Bomba y del Sistema.....	31
Figura 3.11. Puntos de Operación para cada instante de tiempo.....	31
Figura 3.12. Intercambio de masa en una sección transversal de la región de mezcla.....	34
Figura 3. 13. Volumen de mezcla.....	41
Figura 3.14. Solución a la ecuación diferencial	48
Figura 4.1. Perfil de la Interfaz de Mezcla	57
Figura 4.2. Representación esquemática del Ciclo del Batcheo	57
Figura 4.4. Longitud de mezcla de menor a mayor	62

RESUMEN

En el presente trabajo, se identifica los parámetros que inciden para optimizar los parámetros de operación en estado estacionario de poliductos y a fin de mejorar la longitud de mezcla, mediante un modelo matemático de la hidrodinámica de Poliductos en estado estable basados en la curva piezométrica específica para dos productos que se transportan consecutivamente a través de la misma tubería que depende del factor de rozamiento que ejerce cada producto al momento de desplazarse, con una velocidad de operación la cual depende de tiempo que se demora en recorrer el fluido a lo largo de la tubería del poliducto para ir desde el punto de entrega hasta el punto de recepción del producto.

En el transporte de los derivados está definido para un poliducto el cual caracteriza a la tubería a través del diámetro, espesor y rugosidad atado a la velocidad y el caudal que son los parámetros característicos de la bomba que actúa dentro del sistema para el transporte.

Modelo matemático para la formación de la mezcla de productos transportados por lotes, describe el proceso de formación de la mezcla durante el desplazamiento de un producto que es empujado por otro consecutivo, se realiza mediante la ecuación del balance volumétrico en el que interviene cada componente estableciendo un equilibrio con las concentraciones de los productos con lo cual se define la Ecuación de la longitud de mezcla para transportar dos productos consecutivos, que dependen físicamente del diámetro de la tubería y de la longitud del poliducto, pero principalmente con la potencia 0.25 a la suma del factor de los factores de fricción de productos consecutivos.

Finalmente se establece la eficiencia del sistema al referirse a la longitud de mezcla con respecto a la longitud total del poliducto; y, se evalúa que caracteriza a longitud de la mezcla para determinar la incidencia e influencia de los parámetros operativos.

ABSTRACT

This project analyses the parameters that influence to optimize the operation in stationary state for pipelines in order to improve the efficiency and decrease losses with an mathematical model that analyses the pipeline hydrodynamics based on the Piezometric curve for two products that are transported consecutively trough the pipeline. The hydrodynamics depends on variables such as the friction coefficient, the fluid velocity and the time that it takes to the products to be transported from one to another point of the pipeline.

In oil products transportation trough a pipeline, there are very important parameters that characterizes de pipeline, these are the diameter, thickness, rugosity and parameters that belong to the pump systems such as the velocity and the flow rate which influence directly in the transportation.

A volumetric balance is used in order to develop the mathematical model of this phenomenon. The equation is defined for the analysis of two products transportation, and it all depends on the pipeline physical parameters, but principally 0.25 power factor to the sum of the products friction factors consecutive.

Finally the system efficiency is established and it evaluates referring to the length of mixture with respect to the total length of the pipeline, and, it is judged that characterizes mixing length to determine the incidence and influence operational parameters.

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

El transporte, movimiento y almacenamiento de derivados en su mayoría se realiza por medio de poliductos y terminales con los que cuenta el país, con la finalidad de atender los requerimientos de los combustibles de acuerdo a las necesidades y demanda de cada provincia y zona ecuatoriana. .

La red de poliductos están ubicadas estratégicamente, e interconectados entre sí, las mismas cubren las tres regiones del Ecuador Continental:

- Esmeraldas Santo Domingo
- Santo Domingo Quito
- Santo Domingo Pascuales
- Shushufindi Quito
- Quito Ambato
- Libertad Manta
- Libertad Pascuales
- Tres Bocas Pascuales
- Tres Bocas El Salitral

En la red de poliductos se transportan gasolinas, diesel y gas licuado de petróleo (GLP), desde las refinerías y los terminales marítimos, hasta los centros de despacho, y finalmente a las comercializadoras.

Son aproximadamente 1.300 kilómetros de poliducto, cuya capacidad de bombeo, permite transportar alrededor de 6 millones de galones diarios de combustible, a través de 9 diferentes líneas, que interconectadas entre sí, abastecen a todos los

sectores sociales y productivos del país; la red y sistemas de poliductos transportan alrededor de 75 millones de barriles al año.

Los derivados que se transportan a través de este sistema de poliductos son:

- Gasolinas (87 y 92 octanos)
- Diesel 1
- Diesel 2
- Fuel oil
- GLP; y ,
- Jet fuel

1.2. PROBLEMA

El país cuenta con una red de poliductos ubicados estratégicamente e interconectados entre sí, que atraviesan las tres regiones del Ecuador Continental. Transportan gasolinas, diesel y gas licuado de petróleo (GLP), desde las refinerías y los terminales marítimos, hasta los centros de despacho y finalmente a las comercializadoras que interconectadas entre sí, abastecen a todos los sectores sociales y productivos del país.

Por esta razón, el transporte de los derivados de petróleo se realiza a través de secuencias y ciclos, mismos que varían de acuerdo a la demanda y dependiendo de las propiedades fisicoquímicas de cada producto.

La Empresa Pública de Hidrocarburos EP PETROECUADOR, realiza el transporte de derivados del petróleo en su mayoría a través de ductos, siendo la programación de operación en el transporte, realizada de acuerdo a la demanda de los combustibles, y basados en la densidad de cada producto para determinar la secuencia en el bombeo de los derivados.

En la operación de los poliductos, la eficiencia del transporte se encuentra directamente relacionada con la longitud de la mezcla del batch, la misma que es generada de acuerdo a la secuencia del producto a transportar, por tal razón es

necesario minimizar estas longitudes de mezcla por medio de análisis para suministrar soluciones técnicas, y así mejorar la eficiencia en el transporte de derivados por ductos.

Por lo que con el presente proyecto de investigación se establecen las condiciones de operación hidrodinámicas que minimicen esta longitud de mezcla, para cada una de los productos a transportar, haciendo eficiente la operación en el transporte.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Optimizar las condiciones de operación en estado estacionario de poliductos a fin de mejorar la longitud de mezcla.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Caracterizar las propiedades físico-químicas de los derivados a ser considerados en el estudio.
- ✓ Definir el modelo matemático de estudio del batcheo en la operación de un poliducto.
- ✓ Determinar las posibles secuencias del batcheo, a fin de optimizar la operación.
- ✓ Determinar el volumen de interface por productos caracterizados.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. TRANSPORTE DE PETRÓLEO Y DERIVADOS POR TUBERÍA

El sistema de transporte de productos a través de poliductos se puede lograr mediante lotes alternativos de los derivados de petróleo, transportados a través de un sistema compuesto principalmente por tubería, compresores y bombas. Este modo se conoce como “PROCESO POR BATCHEO” en el cual se mezcla el final del primer producto y el inicio del segundo producto.

Con el fin de estudiar la viabilidad del transporte de petróleo y derivados a través del sistema de transporte por tubería, es necesario predecir la caída de presión o gradiente a lo largo de la tubería del poliducto (Las caídas de presión se producen debido a diversas fuerzas tales como la gravedad y fricción). El objetivo de este estudio es resolver las ecuaciones de energía pertinentes para ambos lotes mezclados y modos de flujo, y para determinar analíticamente los gradientes de presión y los parámetros relacionados con el caudal hidráulico para el transporte de los derivados del petróleo, siendo estos los factores que se examinan, ya que son los contribuyen a la existencia de las pérdidas de carga.

2.2. DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DE PETRÓLEO Y DERIVADOS.

Las ecuaciones que expresan los principios de la conservación de la cantidad de movimiento y energía sirven para definir las propiedades del movimiento de un fluido mediante la Ley de Newton de la viscosidad, y la Ley de Fourier para la transferencia de calor mismas que son evidenciadas y expresadas en función de la constante de proporcionalidad en la cual están directamente relacionadas con la viscosidad dinámica y conductividad térmica; así como el flujo de la cantidad de movimiento está relacionado principalmente con el gradiente de velocidad,

estrictamente relacionado con la viscosidad del fluido y el flujo de masa relacionado con el gradiente de concentración mediante la difusión del fluido.

La viscosidad cinemática $v=\mu/\rho$ tiene las mismas dimensiones (L^2/T) que el coeficiente de difusión de masa o transferencia de calor, lo que frecuentemente se interpreta como coeficiente de difusión de cantidad de movimiento.

2.3. EQUIPOS Y ACCESORIOS PARA TRANSPORTAR PETRÓLEO Y DERIVADOS

a) Terminales: despacho y recepción:

Espacio físico en el cual terminan e inician todas las líneas de entrada y salida de productos derivados del petróleo.

b) Tanques y Esferas de almacenamiento

Son recipientes de gran tamaño, cerrado que sirven para contener líquidos o gases, estos recipientes se diseñan de acuerdo a normas técnicas de construcción, fabricación y pruebas de funcionamiento.

c) Estaciones de bombeo

- i. Manifold principal - entrada
- ii. Bomba Booster
- iii. Motor Eléctrico de la bomba Booster
- iv. Microfiltro o Separador FRAM
- v. Contadores de combustible
- vi. Tanque calibrador
- vii. Grupos de bombeo
 - Motores de combustión interna
 - Multiplicador de velocidad
 - Bombas centrifugas multietapas
 - Tanques de almacenamiento

- Compresor de aire
 - Motores eléctricos para compresores de aire
 - Cilindros de aire
 - Sobrepresores
- viii. Manifold de salida
- ix. Tablero de control
- x. Equipos para el vaciado de líneas
- Tanque secundario
 - Bomba de tanque de sumidero
 - Motor de la bomba del tanque sumidero
- xi. Manifold de envío de Rascadores
- d) Estaciones reductoras de presión
- Válvula reductora de presión
 - Filtro Steiner
 - Contadores de combustible
 - Manifold hacia los tanques de almacenamiento
 - Tablero de control
- e) Sistemas de medición de GLP y productos limpios
- Válvulas controladoras de presión
 - Sistemas de medición de flujo
- f) Sistema contra incendio.
- g) Cuarto de Control.
- h) Sistema eléctrico.

2.4. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO

El petróleo se compone de hidrocarburos y de pocos compuestos de azufre y de oxígeno, también contiene elementos gaseosos, líquidos y sólidos. La consistencia varía desde un líquido tan poco viscoso como la gasolina, hasta un líquido tan espeso que apenas fluye como el Crudo Pesado.

La composición elemental, aproximada es de:

- 84 a 87 % de carbono
- 11 a 14 % de hidrógeno
- 0 a 2,5 % de azufre y de 0 a 0,2 % de nitrógeno.

Estos últimos elementos, junto con oxígeno y algunos metales (como vanadio, níquel, sodio, arsénico y otros) son considerados como impurezas en el crudo, las propiedades comunes y más importantes se detallan a continuación:

Color.- De acuerdo a la transmisión de la luz, los crudos pueden tener color amarillo pálido, tonos de rojo y marrón hasta llegar a negro, por reflexión de la luz pueden aparecer verdes, amarillos con tonos azules, rojo, marrón y negro. Los crudos pesados y extra pesados son negro casi en su totalidad.

Crudos con altísimo contenido de cera son livianos y de color amarillo; por la noche al bajar bastante la temperatura tienden a solidificarse notablemente, y durante el día, cuando arrecia el sol, muestra cierto hervor en el tanque. El crudo más liviano o condensado llega a tener un color blanquecino, lechoso y a veces se usa en el campo como gasolina cruda.

Olor.- El olor de los crudos es aromático como el de la gasolina, del kerosene u otros derivados. Si el crudo contiene azufre tiene un olor fuerte y hasta repugnante, como el de huevo podrido. Si contiene sulfuro de hidrógeno, los vapores son irritantes, tóxicos y hasta mortíferos. Para atestiguar la buena o rancia calidad de los crudos es común que la industria los designe como dulces o agrios.

Sabor.- El sabor de un crudo es una propiedad que se torna importante cuando el contenido de sal es bastante alto. Esta circunstancia requiere que el crudo sea

tratado adecuadamente en las instalaciones de producción del campo para ajustarle la sal al mínimo (gramos por metro cúbico) aceptable por compradores y refinerías.

Densidad.- Los crudos pueden pesar menos que el agua (crudo liviano y crudo mediano) o tanto o más que el agua (crudo pesado y crudo extra pesado), por lo que la densidad puede tener un valor de 0.75 a 1.1; estos dos rangos equivalen a 57.2 y -3 API.

La densidad, la gravedad específica o los grados API (API es la abreviatura de American Petroleum Institute), se describe la relación correspondiente de peso específico y de fluidez de los crudos con respecto al agua.

La clasificación de los crudos por rango de gravedad API utilizada en la industria de los hidrocarburos, a 15,5 °C (60 °F) es como sigue:

- Extra pesados menos de 16 °
- Pesados menos de 21,9 °
- Medianos entre 22,0 – 29,9 °
- Livianos 30 ° y más.
- Supe livianos 40 ° en adelante.

Índice de refracción.- Es una medida que determina la reducción de la velocidad de la luz al propagarse por un medio homogéneo, los hidrocarburos acusan valores de 1,39 a 1,49.

Coeficiente de expansión.- Es la temperatura en grados centígrados por una unidad de volumen, varía entre 0,00036 y 0,00096.

Punto de ebullición.- Es la temperatura a la cual la presión de vapor del líquido es igual a la presión del medio que rodea al líquido, debido a sus constituyentes varía algo menos que la temperatura atmosférica hasta la temperatura igual o por encima de 300 °C.

Punto de congelación.- Es la temperatura a la que el líquido se solidifica debido a una reducción de temperatura, varía desde 15,5 °C hasta la temperatura de -45 °C. Depende de las propiedades y características de cada crudo o derivado. Este factor es de importancia al considerar el transporte de los hidrocarburos y las estaciones, principalmente el invierno y las tierras gélidas.

Punto de deflagración.- Reacción vigorosa que produce calor acompañado de llamas y/o chispas, varía desde -12 °C hasta 110 °C.

Punto de quema.- Varía desde 2 °C hasta 155 °C.

Poder calorífico.- El poder calorífico expresa la energía máxima que puede liberar la unión química entre un combustible y el comburente, La mayoría de los combustibles usuales son compuestos de carbono e hidrógeno, que al arder se combinan con el oxígeno formando dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O) respectivamente, puede ser entre 8.500 a 11.350 calorías/gramo. Entre BTU/libra puede ser de 15.350 a 22.000. (BTU es la unidad térmica británica), el poder calorífico disminuye al aumentar la densidad.

Calor específico.- Es la relación de cantidad de calor requerida para elevar su temperatura un grado, respecto a la requerida para elevar un grado la temperatura de igual volumen o masa de agua, varía entre 0,40 y 0,52. El promedio de la mayoría de los crudos es de 0,45.

Calor latente de vaporización.- Es la energía requerida por una cantidad de sustancia para cambiar de fase, de sólido a líquido (calor de fusión) o de líquido a gaseoso (calor de vaporización), para la mayoría de los hidrocarburos parafínicos y metilenos acusa entre 70 a 90 kilocalorías/kilogramo ó 130 a 160 BTU/libra.

Viscosidad.- Es el tiempo necesario para que un volumen determinado a una temperatura definida fluya a través de un orificio, la viscosidad aumenta con el peso específico, la unidad de medida es el poise o centipoise (0,01 poise) definido como la fuerza requerida en dinas para mover un plano de un centímetro cuadrado de área, sobre otro de igual área y separado un centímetro de distancia entre sí y con el espacio relleno del líquido investigado, para obtener un desplazamiento de un centímetro en un segundo.

Clasificación de la viscosidad

- **Viscosidad relativa:** es la relación de la viscosidad del fluido respecto a la del agua. A 20 °C la viscosidad del agua pura es de 1.002 centipoise.

- **Viscosidad cinemática:** es equivalente a la viscosidad expresada en centipoises dividida por la gravedad específica, a la misma temperatura. Se designa en stokes o centistokes.
- **Viscosidad Universal Saybolt:** representa el tiempo en segundos para que un flujo de 60 centímetros cúbicos salga de un recipiente tubular por medio de un orificio, debidamente calibrado y dispuesto en el fondo del recipiente, el cual se ha mantenido a temperatura constante.
- **Solubilidad.-** Es insoluble en agua, sobre la cual flota debido a que el peso específico es menor. A esto se debe su peligrosidad cuando se derrama en los puertos, o cuando es necesario combatir incendios en los tanques de almacenaje. Es soluble en benceno, éter, cloroformo, y otros solventes orgánicos.

Tabla 2.1. Propiedades de los derivados del petróleo

PRODUCTO	CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	RANGO
Gasolina	Densidad relativa a 15°C	-	0.68 a 0.77
	Punto de Ebullición	°C	30 a 200
	Viscosidad cinemática, a 15°C	CSt	0.65
	Punto de Inflamación	°C	-15 a -40
Queroseno	Densidad relativa a 15°C	-	0.78
	Punto de Ebullición	°C	160 a 285
	Viscosidad cinemática, a 40°C	CSt	1.48
	Punto de Inflamación	°C	35 a -70
Diesel	Densidad relativa a 15°C	-	0.81 a 0.85
	Punto de Ebullición	°C	180 a 360
	Viscosidad cinemática, a 40°C	CSt	1.3 a 5.5
	Punto de Inflamación	°C	35 a -70
Fuel Oil	Densidad relativa a 15°C	-	0.925 a 0.965
	Punto de Ebullición	°C	
	Viscosidad cinemática, a 40°C	CSt	49 a 862
	Punto de Inflamación	°C	70 ó más
GLP	Densidad relativa a 15°C	-	
	Punto de Ebullición	°C	-42
	Viscosidad cinemática, a 40°C	CSt	
	Punto de Inflamación	°C	-105
Jet Fuel	Densidad relativa a 15°C	-	0.775 a 0.840
	Punto de Ebullición	°C	
	Viscosidad cinemática, 40°C	cSt	1 a 2
	Punto de Inflamación	°C	Min 38
	Presión de vapor	kPa	14 a 21

Fuente: Manual de los Hidrocarburos - Segunda edición: 2005

CAPÍTULO III

3. OPERACIÓN DE POLIDUCTOS

En el transporte de fluidos a través de tubería de productos derivados de petróleo dependen del gradiente de presión para el flujo caracterizados por las propiedades del fluido, específicamente de la viscosidad y la densidad, los cuales se manifiestan con mayores requerimientos de presión como consecuencia de la fricción entre el fluido y la pared de la tubería, que depende también de las características de la tubería.

El impacto debido a los cambios de niveles del terreno afecta de manera directa el consumo de la energía generada por el sistema de bombeo para transportar desde la entrega hasta la recepción, incidiendo directamente en la Operación en el Batcheo para el transporte de Petróleo y Derivados a través del poliducto.

El discernimiento del comportamiento hidráulico del poliducto permite determinar el número, la ubicación y la capacidad de las estaciones de bombeo y reducción necesarias para transportar el petróleo y sus derivados a través de una tubería que recorre distancias considerables permitiendo de esta manera desarrollar el diseño del poliducto.

En la operación del poliducto y específicamente en el sistema de bombeo hay que evitar el fenómeno de cavitación, que se produce cuando disminuye bruscamente la resistencia hidrodinámica al trabajar los álabes de la bomba en zona de fase vapor o lo que es lo mismo que trabajar en vacío; este fenómeno se produce como consecuencia de la vaporización del fluido líquido cuando trabaja por debajo de la presión de vapor o saturación del líquido a una temperatura dada, la cavitación ocasiona daños en la estructura del material como en bombas, afectando directamente al rendimiento.

3.1. CARACTERÍSTICAS DE LA TUBERÍA

La tubería es el medio por el cual se va a transportar petróleo o derivados de petróleo. Se le denomina oleoducto cuando se transporta petróleo, gasoducto cuando se transporta gas, y poliducto cuando se transportan varios productos derivados del petróleo y petróleo.

Las dimensiones de la tubería para el análisis del transporte de petróleo y derivados de petróleo son el Diámetro interior (d), Diámetro exterior (D), rugosidad absoluta (ε).

3.1.1. RUGOSIDAD

En el interior de la tubería existen protuberancias o irregularidades de diferentes formas y tamaños cuyo valor medio se conoce como *rugosidad absoluta* (ε), y que se define como *la variación media del radio interno de la tubería*.

Para un mismo valor de rugosidad absoluta puede ser muy importante en tubos de pequeño diámetro y ser insignificante en un tubo de gran diámetro; es decir, la influencia de la rugosidad absoluta depende del tamaño del tubo, por lo tanto para caracterizar a una tubería por su rugosidad es apropiado utilizar la *rugosidad relativa* (ε_R), misma que se define como *el cociente entre la rugosidad absoluta y el diámetro de la tubería*.

$$\varepsilon_R = \frac{\varepsilon}{D}$$

Donde:

ε *Rugosidad absoluta*

D *Diámetro interno de la tubería*

ε_R *Rugosidad Relativa*

3.1.2. PÉRDIDAS POR FRICCIÓN

A medida que un fluido viaja por una tubería se generan pérdidas de energía debido a la fricción entre el líquido y la pared de la tubería lo que genera una disminución de presión entre dos puntos del sistema de flujo¹.

$$H_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (3.1)$$

Donde:

H_f	Pérdidas por fricción
f	Factor de pérdidas por fricción
g	Aceleración de la gravedad
D	Diámetro del tubo
L	Longitud del tubo
V	Velocidad media en el tubo

La ecuación 3.1 sirve para determinar las pérdidas por fricción que ejerce sobre las paredes internas de la tubería de diámetro constante en la cual existe un flujo permanente; el factor de fricción f es adimensional y es una función del número de Reynolds (Re) y de la rugosidad relativa de la tubería (ϵ/D), para calcular el factor de pérdidas por rozamiento (f) utilizamos la ecuación de Colebrook-White.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad \text{ó} \quad \frac{1}{\sqrt{f}} = -0.86 \ln \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

La solución de la ecuación del factor de fricción f corresponde un procedimiento por aproximaciones y regresiones de valores que se realizan mediante un algoritmo, calculado a partir de métodos numéricos como el de Newton-Raphson.

¹ Ecuación deducida experimentalmente en 1850 por Darcy y Weisbach corregida y afinada por Colebrook-White.

3.2. OPERACIÓN EN EL BATCHEO PARA EL TRANSPORTE DE PETRÓLEO Y DERIVADOS

El control de la presión de la tubería, que es crucial para asegurar una operación segura, confiable y económica, ya que todas las tuberías están sujetas a los límites permisibles para la aplicación de presión mínima y máxima durante la operación, prolongando su vida útil con el mantenimiento, siendo esencial para preservar la integridad de la tubería, y evitar daños severos al equipo y sistema de bombeo, la presión de trabajo debe mantenerse por debajo de la presión máxima permisible (MAOP), misma que debe estar por encima de la presión de vapor del líquido, y la bomba de succión debe estar por encima de una presión determinada se llama como NPSH (Net Positive Suction Head).

La presión de vapor, es aquella que mantiene un líquido en equilibrio a una temperatura dada, es muy sensible a las variaciones de temperatura ya que aumenta exponencialmente con el acrecentamiento de temperatura.

Para controlar eficazmente la presión de la tubería, el producto líquido siempre debe mantener una presión superior a la presión de vapor, asegurando que sea una línea continua de líquido de llenado constante en todos los puntos a lo largo de la tubería, lo que contribuye a la estabilidad en la operación del sistema. Los parámetros de funcionamiento y restricciones del sistema de transporte está basada en:

- a) Presión máxima de trabajo permitida (MAOP)
 - a.1. Presión determinada por la zona, como las zonas pobladas o áreas de gran preocupación ambiental.
 - a.2 Tubos de espesor de pared y la fuerza es directamente proporcional a la resistencia del tubo.
 - a.3 Capacidad del tubo para resistir la presión interna
- b) Presión mínima de contracción.
- c) La presión de succión mínima y máxima de descarga en las estaciones de bombeo.
- d) Bomba de flujos mínimos y máximos.
- e) Potencia máxima.

Los Sistemas de Control de la tubería desde el punto de vista operativo del poliducto prevén la aparición de condiciones peligrosas como presiones bajas que afectan a la presión de vapor lo que ocasionaría ruptura de la tubería, siendo estas reacciones los primeros síntomas de desviación de las condiciones normales de operación; con lo cual se garantiza la continuidad de las operaciones y los mismos que se apagarían cuando existieran situaciones peligrosas. Un sistema de control de tubería proporciona al operador un control central con la capacidad de controlar el funcionamiento de las estaciones de bombeo y válvulas de control de presión, en cualquier ubicación en la tubería. El sistema de control también permite al operador controlar las presiones de operación en la tubería y las condiciones de alarma o anormales.

La presión de diseño es la presión máxima que se determina con la fórmula de Barlow en función de los factores de seguridad para un grado y el espesor de la tubería. Los puntos de control de presión se producen en los tramos elevados de la línea y en conductos de succión de la bomba, este control evitará el colapso de la línea y la cavitación en las bombas.

$$P_{design} = \left(\frac{2S \cdot t}{De} \right) \cdot F \cdot J \cdot T$$

Donde:

- | | |
|----|--|
| S | Esfuerzo mínimo de fluencia de la tubería, Psig |
| t | Espesor de la pared del tubo, pulgadas |
| De | Diámetro exterior de la tubería, pulgadas |
| F | Factor de diseño |
| J | Factor común |
| T | Factor de reducción de temperatura indicada, aplicable únicamente a los gasoductos |

El Transporte de petróleo y derivados a través de tuberías se puede realizar a través de:

- un ducto para un único producto; y,
- un ducto para varios productos en secuencia por lotes

En un sistema que se desea transportar varios productos, es más económico construir un poliducto para operar por lotes², en lugar de construir múltiples ductos dedicados para un producto en específico.

3.2.1. SISTEMA DE BOMBEO

El sistema de bombeo proporciona energía al fluido, aumentando la presión a una velocidad determinada, siendo la bomba o grupo de bombas caracterizadas principalmente por el caudal de flujo, la carga hidrostática, la potencia y la eficiencia.

3.2.1.1. Caudal de flujo

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho}$$

Donde

\dot{m} Flujo másico

ρ Densidad

3.2.1.2. Carga hidrostática

Es la diferencia de energía que el fluido tiene antes y después de pasar por la bomba.

$$h_B = \left(\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2g} + Z \right)_{Sale} - \left(\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2g} + Z \right)_{Entra}$$

3.2.1.3. Potencia

Es la cantidad de trabajo que requiere para transferir líquidos desde un punto de entrega a otro punto de recepción realizada una unidad de tiempo y venciendo las pérdidas generadas en el sistema de transporte.

$$Pu = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h_B$$

² Un lote es una cantidad específica y el tipo de producto con las especificaciones uniformes.

3.2.2. CAVITACIÓN

Es un fenómeno que ocurre en la bomba cuando se produce una aceleración, generando un diferencial de presión que es suficientemente baja, formando burbujas de vapor que traen como consecuencia dos efectos sobre el funcionamiento del sistema de bombeo:

- a. Erosión del rodete y/o álabes, que con el tiempo lleva a su destrucción.
- b. Disminución de la altura de elevación.

Las burbujas generadas van a las zonas de mayor presión a la de menor presión en la cual el vapor regresa al estado líquido de manera súbita, produciendo indicios de gas y desprendimiento de metal de la superficie en la que origina este fenómeno.

Para evitar la cavitación se requiere mantener una presión que sea por encima de la presión de vapor.

3.2.2.1. Carga de Aspiración Neta positiva

La Carga Neta Positiva en Aspiración CNPA (Net Positive Suction Head NPSH), es la diferencia entre la presión en ese punto, y la presión de vapor del líquido en ese punto en cualquier punto de un circuito hidráulico.

La Carga Neta Positiva en Aspiración es un parámetro importante en la operación del sistema de transporte de derivados de petróleo a través de poliductos; en el cual, si la presión es menor que la presión de vapor del líquido, ésta entrará en algo semejante a la ebullición, con lo cual el líquido se vaporiza produciéndose el fenómeno de cavitación que dificulta o impide la circulación de líquido causando daños en los elementos, sistemas y tuberías; desde el punto de vista de uso y de funcionamiento por lo tanto debemos asegurar que el NPSH sea ligeramente mayor que cero.

$$NPSH = \left(\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} \right)_{\text{Entra}} - \frac{P_v}{\rho g}$$

3.3. MODELO MATEMÁTICO DE LA HIDRODINÁMICA DE POLIDUCTOS EN ESTADO ESTABLE

Los fluidos son considerados como medios continuos, por lo que el fluido es considerado como un sistema infinitamente divisible, es decir un medio continuo a lo largo de la longitud del poliducto considerando que las propiedades en cada punto son constantes.

Para realizar el modelo matemático de la hidrodinámica del Poliducto hay que tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

1. El fluido es un líquido incompresible; es decir, que su densidad no varía.
2. El flujo de los líquidos están en régimen estable o estacionario; es decir, que la velocidad del líquido en un punto es independiente del tiempo con el cambio de presión a diferencia de lo que ocurre con los gases.
3. No existe transferencia de calor en el trayecto del poliducto.
4. La pérdida de energía por la viscosidad es despreciable; ya que se supone que un líquido es óptimo para fluir, y esta pérdida es mucho menor comparándola con la inercia de su movimiento.
5. La geometría del conducto es conocida.

Las consideraciones enunciadas son requeridas para aplicar la ecuación de la Continuidad, ecuación de la Energía, y el Gradiente de Presión que caracterizan y definen la curva del Perfil Piezométrico del poliducto para cada producto, conforme se desplaza en función del tiempo.

En poliductos que se transportan los derivados del petróleo uno a continuación de otro; como se describe en la figura No. 3.1, en la cual el punto $P(x)$ es instante en el cual el producto B recorre una distancia X , y el producto A que recorre una distancia $L - X$; el cual va de una presión inicial hasta una presión final mínima para la entrega final del producto.

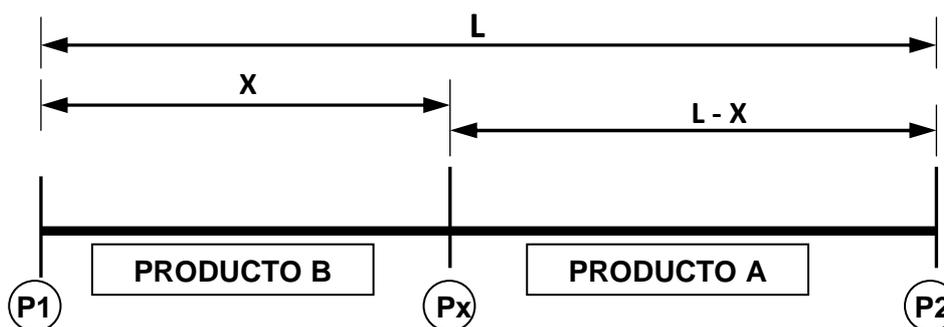


Figura 3.1.- Transporte de dos productos consecutivos a través del Poliducto

Donde:

- P1 Punto de inicio del recorrido del producto.
- Px Punto final del producto 1; y, punto inicial del producto 2.
- P2 Punto final del poliducto. (Entrega del producto)
- L Longitud del poliducto
- X Distancia recorrida por el producto 2, en función del tiempo.

3.3.1. CÁLCULO DE LA PIEZOMÉTRICA

3.3.1.1. Ecuación de la Continuidad

La continuidad se establece a partir de la conservación de la masa de fluido a través de dos secciones de una tubería en la que: **“la masa que entra es igual a la masa que sale”**, que se expresa en función de las propiedades geométricas de la tubería, la velocidad y el tipo de producto que se desplaza por el ducto.

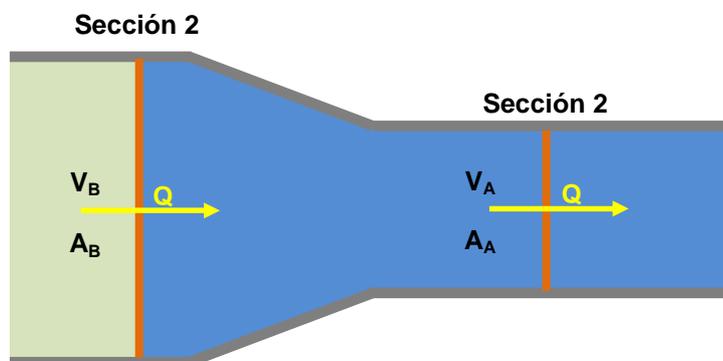


Figura 3.2.- Conservación de la masa – Ecuación de la Continuidad

$$\rho_B A_B V_B = \rho_A A_A V_A$$

En el transporte de productos derivados del petróleo se considera en un instante de tiempo en cual el fluido es el mismo por lo que las densidades ρ_A y ρ_B son iguales, momento en el cual el flujo está en un régimen permanente y constante, donde se tiene que $A_A V_A = A_B V_B$; por lo tanto, el caudal que entra es igual al caudal que sale.

3.3.1.2. Ecuación de la Energía

El comportamiento de un fluido en flujo laminar que se mueve a lo largo de una ducto mediante el cual expresa que un fluido ideal (sin viscosidad, ni rozamiento) en régimen de circulación por un conducto cerrado la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de su recorrido.

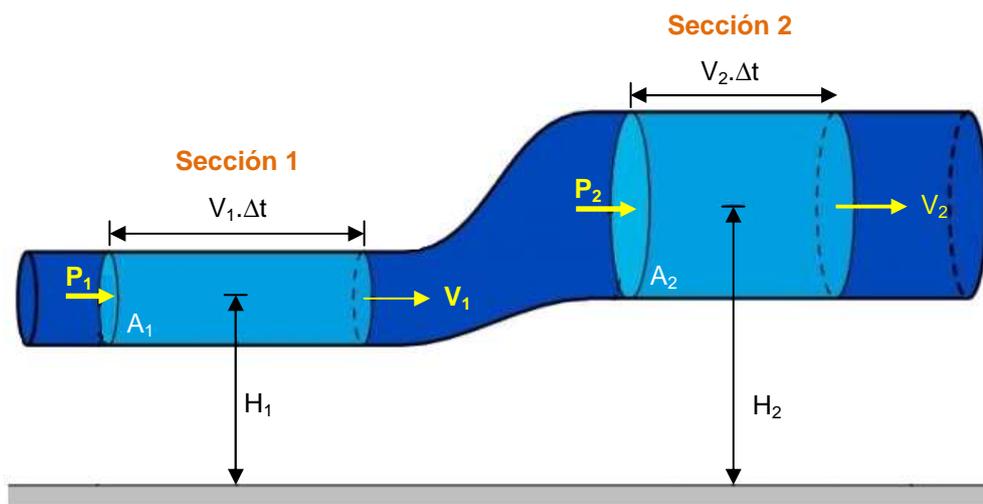


Figura 3.3.- Comportamiento del fluido en una tubería

La energía de un fluido en cualquier instante de tiempo consta de tres componentes:

1. Energía Cinética: Es la energía debida a la velocidad que posea el fluido.
2. Energía Potencial gravitacional: Es la energía debido a la altitud que un fluido posee.
3. Energía de flujo: Es la energía que un fluido contiene debido a la presión que posee, a la que se denomina Piezométrica.

$$P + \frac{V^2 \rho}{2} + \rho g Z = \text{Cte.}$$

Donde:

V = velocidad del fluido en la sección considerada.

ρ = densidad del fluido.

P = presión a lo largo de la línea de corriente.

g = aceleración gravitacional

Z = altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia.

Se realiza un balance de energías entre los puntos inicial y final, considerando la conservación de la masa se obtiene la siguiente igualdad:

$$\frac{P_{inicial}}{\rho_{inicial}} + \frac{V_{inicial}^2}{2} + gZ_{inicial} = \frac{P_{final}}{\rho_{final}} + \frac{V_{final}^2}{2} + gZ_{final} + gHf_{trayecto}$$

La velocidad es constante en las secciones, $V_1=V_2$, reemplazando en el balance de energía entre los puntos inicial y final.

$$\frac{P_{inicial}}{\rho_{inicial}} + gZ_{inicial} = \frac{P_{final}}{\rho_{final}} + gZ_{final} + gHf_{trayecto}$$

3.3.1.3. Piezométrica en función de la longitud del poliducto

Es la suma de las alturas de presión y de posición que se determina uniendo los puntos que alcanzaría el fluido circulante en distintos piezómetros conectados a lo largo de la tubería, expresado mediante la ecuación 3.2 y como se visualiza en la gráfica 3.4

$$Hs_f = Hs_o - f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (3.2)$$

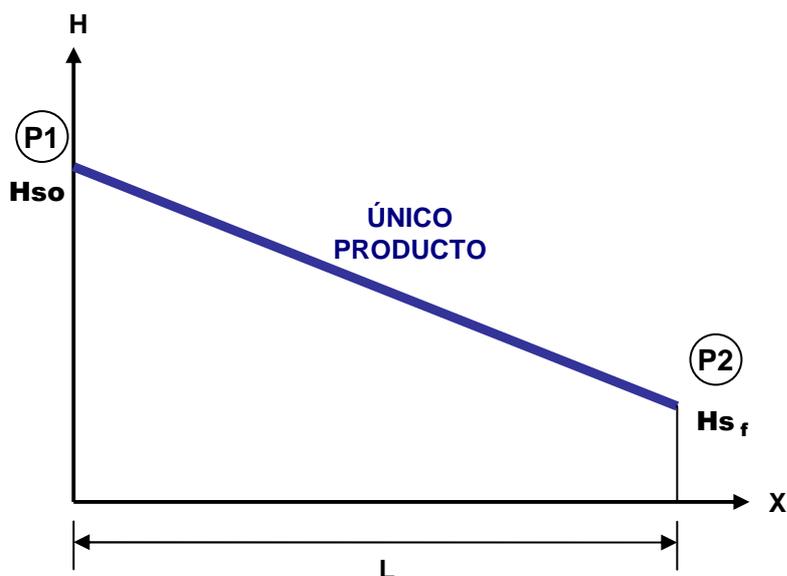


Figura 3.4.- Piezométrica para *un solo producto en la Longitud del Poliducto*

La curva piezométrica para dos productos que se transportan consecutivamente a través de la misma tubería que depende del factor de rozamiento que ejerce cada producto al momento de desplazarse, con una velocidad de operación la cual depende de tiempo que se demora en recorrer el fluido a lo largo de la tubería del poliducto para ir desde el punto P_1 hasta el punto P_2 .

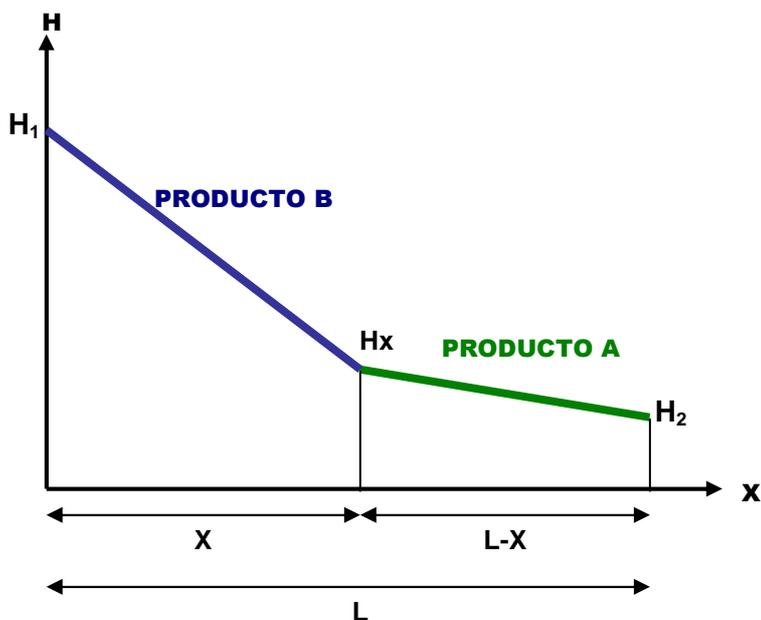


Figura 3.5.- Gradiente de Presión para dos *productos en la longitud del Poliducto*

Para el volumen de control representado en la figura 3.5, la distancia X varía conforme el producto B ingresa después del producto A desde una presión H_1 en el punto inicial 1 hasta una presión H_x que depende del factor de rozamiento que ejerce el producto transportado sobre la pared interior de la tubería.

$$\frac{P_1}{\rho_1} + gZ_1 = \frac{P_x}{\rho_x} + gZ_x + g \cdot Hf_{1 \rightarrow x}$$

$$\frac{P_1}{g\rho_1} + Z_1 = \frac{P_x}{g\rho_x} + Z_x + Hf_{1 \rightarrow x}$$

$$Hf_{1 \rightarrow x} = f_B \cdot \frac{X}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

El gradiente de presión del producto B está en función de la distancia X que recorre en función del tiempo a una velocidad de operación para alcanzar una presión H_x , instante que es el final del producto A y el inicio del producto B; representado gráficamente en la figura 3.4.

$$H_x = H_1 - Hf_{1 \rightarrow x}$$

$$H_x = H_1 - f_B \cdot \frac{x}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (3.3)$$

La cantidad de producto A contenido en la tubería a una distancia $(L-x)$ va desde una presión H_x hasta una presión H_2 , que depende del factor de rozamiento que ejerce el producto sobre la pared interior de la tubería.

$$\frac{P_x}{\rho_x} + gZ_x = \frac{P_2}{\rho_2} + gZ_2 + gHf_{x \rightarrow 2}$$

$$\frac{P_x}{g\rho_x} + Z_x = \frac{P_2}{g\rho_2} + Z_2 + Hf_{x \rightarrow 2}$$

$$Hf_{x \rightarrow 2} = f_A \left(\frac{L-x}{D} \right) \frac{V^2}{2g}$$

El gradiente de presión para el tramo $(L-x)$ que ocupa parte del producto A se encuentra desde una presión H_x , para llegar a una presión H_2 en el punto de entrega del producto definido en la ecuación 3.4, que depende del factor de fricción generado por el producto A, representado gráficamente en la figura 3.4

$$H_2 = H_x - Hf_{x \rightarrow 2}$$

$$H_x = H_2 + f_2 \left(\frac{L-X}{D} \right) \frac{V^2}{2g} \quad (3.4)$$

Igualando las ecuaciones 3.6 y 3.7, se obtiene la ecuación 3.5, la cual define el gradiente de presión para el sistema con dos productos que se transportan consecutivamente, mismos que se desplazan y dependen del tiempo que se demoran en ser recorrer el poliducto.

$$H_1 - f_B \frac{X V^2}{D 2g} = H_2 + f_A \left(\frac{L-X}{D} \right) \frac{V^2}{2g}$$

La energía H_2 es la necesaria para la entrega del producto el mismo que varía en función de los productos derivados, por lo que H_2 se define como función de la distancia X , para lo cual definimos la ecuación general para el sistema $H_{p(x)}$ para transportar dos productos derivados del petróleo consecutivamente.

$$H_{p(x)} = H_1 - f_B \frac{X V^2}{D 2g} - f_A \left(\frac{L-X}{D} \right) \frac{V^2}{2g} \quad (3.5)$$

3.3.2. SISTEMAS DE BOMBEO ACOPLADO A POLIDUCTOS

3.3.2.1. Curva del Sistema

El sistema está formado por tubería, equipos, instrumentos y accesorios necesarios para transportar el líquido desde la captación hasta el sitio de entrega; la carga total es la suma la carga estática más las pérdidas de carga.

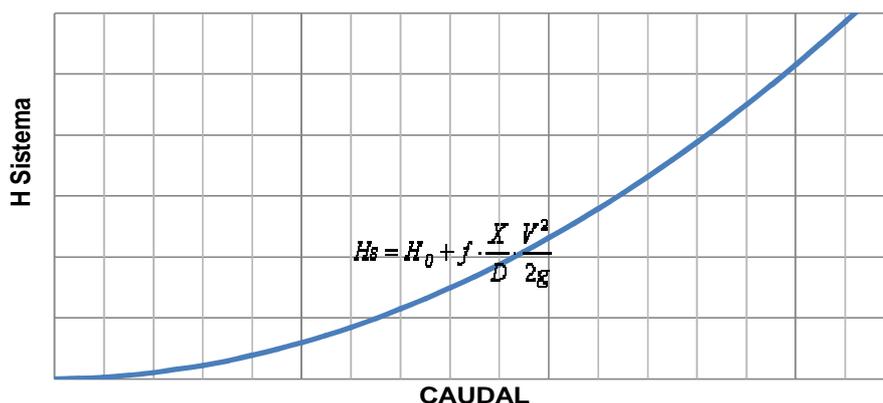


Figura 3.6.- Curva del Sistema en función del Caudal

Para determinar matemática y analíticamente la ecuación que define el sistema para dos productos transportados uno consecutivo de otro, que varían en volumen en función del tiempo que se visualiza en la figura 3.7.

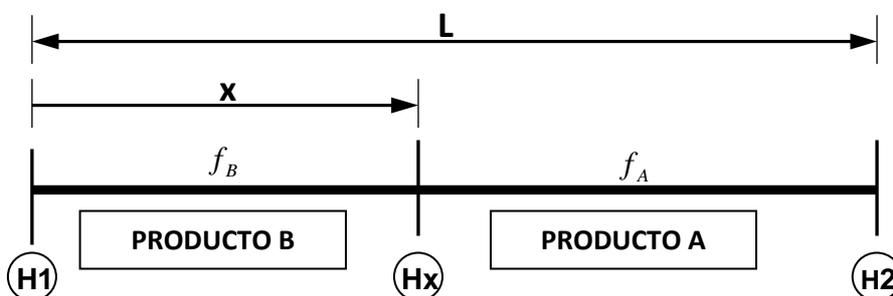


Figura 3.7.- Sistema para dos productos en el Poliducto

$$H_{s_x} = H_{s_1} + f_B \cdot \frac{X}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

$$H_{s_2} = H_{s_x} + f_A \cdot \left(\frac{L-X}{D} \right) \cdot \frac{V^2}{2g}$$

$$H_{s_x} = H_{s_2} - f_A \cdot \left(\frac{L-X}{D} \right) \cdot \frac{V^2}{2g}$$

$$\boxed{H_{s_1} + f_B \cdot \frac{X}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} = H_{s_2} - f_A \cdot \left(\frac{L-X}{D} \right) \cdot \frac{V^2}{2g}}$$

Condiciones de borde para la igualdad:

- a) Cuando $x = 0 \rightarrow t = 0$; el sistema a para transportar es exclusivo para el producto A.

$$H_{sistema} = H_{s_1} + f_A \frac{L V^2}{D 2g}$$

- b) Cuando $x = L \rightarrow t = t$; el sistema a para transportar es exclusivo para el producto B

$$H_{sistema} = H_{s_1} + f_B \cdot \frac{X}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

La curva del sistema está en función de la distancia recorrida X que varía de acuerdo al tiempo t transcurrido, para lo cual se obtiene la ecuación general del sistema para un poliducto.

$$H_{s(x)} = H_1 + f_A \cdot \left(\frac{L-X}{D} \right) \cdot \frac{V^2}{2g} + f_B \cdot \frac{X}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (3.6)$$

3.3.2.2. Curva de la bomba

El tamaño, diseño y construcción de la bomba caracterizan el comportamiento hidráulico, la curva característica de la bomba representa una analogía entre el caudal y la altura manométrica que está relacionado directamente con el rendimiento hidráulico, la potencia requerida y la altura de aspiración; estas curvas obtenidas son proporcionados por el fabricante a una velocidad de rotación (N), matemáticamente se expresa mediante la siguiente ecuación.

$$H_B = A Q_B^2 + B Q_B + C \quad (3.7)$$

El coeficiente A es negativo, y los coeficientes A, B y C de la ecuación 3.11 tienen unidades que se determinan a partir de información suministrada por el fabricante de la bomba, que usualmente provee una gráfica y no la ecuación misma. La representación gráfica de la ecuación 3.7, es de la forma que se expresa en la figura 3.8.

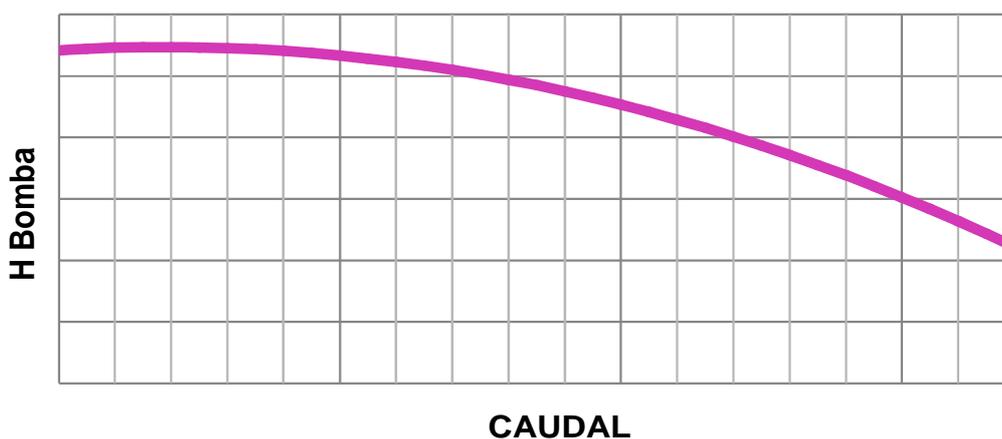


Figura 3.8.- Curva de la Bomba en función del Caudal

Como se observa en la gráfica, la bomba incrementa la energía (H_b) a un caudal (Q_b) de manera que la misma incorpora más energía cuando el caudal es menor; la relación es cuadrática con concavidad negativa.

Semejanza de las bombas

El modelo y el prototipo son geoméricamente semejantes tanto en los elementos interiores como en los exteriores y auxiliares, esta es una condición matemática debe cumplirse de forma reglamentaria.

$$\pi_1 = \frac{D_{MODELO}}{D_{PROTOTIPO}}$$

El modelo y el prototipo mantienen una proporcionalidad directa en los triángulos de velocidades en puntos de funcionamiento semejantes y ángulos iguales.

$$\pi_2 = \frac{N_{MODELO}}{N_{PROTOTIPO}}$$

Donde:

- Variables independientes:
 - ✓ N velocidad angular
 - ✓ D diámetro de la tubería

- Variables dependientes:
 - ✓ Q Caudal del flujo
 - ✓ H Altura de la bomba

Un prototipo tiene un comportamiento del sistema del transporte de los productos derivados que puede ser usado para realizar variaciones y ajustes en la operación y así clarificar las variables y requerimientos de funcionamiento, posee las características del sistema final; para lo cual definimos la relación de caudal y la relación de alturas entre el modelo y el prototipo.

a) Relación de Caudales

$$\frac{Q|_{Modelo}}{Q|_{Pr\ ototipo}} = \frac{V \cdot A|_{Modelo}}{V \cdot A|_{Pr\ ototipo}}$$

$$\frac{Q|_{Modelo}}{Q|_{Pr\ ototipo}} = \frac{N \cdot D/2 \cdot \pi \cdot D^2/4|_{Modelo}}{N \cdot D/2 \cdot \pi \cdot D^2/4|_{Pr\ ototipo}}$$

$$\frac{Q|_{Modelo}}{Q|_{Pr\ ototipo}} = \frac{N \cdot D^3|_{Modelo}}{N \cdot D^3|_{Pr\ ototipo}}$$

$$Q|_{Pr\ ototipo} = \frac{N \cdot D^3|_{Pr\ ototipo}}{N \cdot D^3|_{Modelo}} \cdot Q|_{Modelo}$$

b) Relación de Alturas

$$\frac{H|_{Modelo}}{H|_{Pr\ ototipo}} = \frac{V^2/g|_{Modelo}}{V^2/g|_{Pr\ ototipo}}$$

$$\frac{H|_{Modelo}}{H|_{Pr\ ototipo}} = \frac{V^2|_{Modelo}}{V^2|_{Pr\ ototipo}}$$

$$\frac{H|_{Modelo}}{H|_{Pr\ ototipo}} = \frac{(N \cdot D/2)^2|_{Modelo}}{(N \cdot D/2)^2|_{Pr\ ototipo}}$$

$$\frac{H|_{Modelo}}{H|_{Pr\ ototipo}} = \frac{N \cdot D^2|_{Modelo}}{N \cdot D^2|_{Pr\ ototipo}}$$

$$\frac{H|_{Modelo}}{H|_{Pr\ ototipo}} = \frac{N \cdot D^2|_{Modelo}}{N \cdot D^2|_{Pr\ ototipo}}$$

$$H|_{Pr\ ototipo} = \frac{N \cdot D^2|_{Pr\ ototipo}}{N \cdot D^2|_{Modelo}} \cdot H|_{Modelo}$$

Cada bomba tiene un impulsor de diámetro determinado que rota a la velocidad que le genera el motor que la propulsa, al variar la velocidad angular N la curva de la bomba también se modifica de la condición inicial.

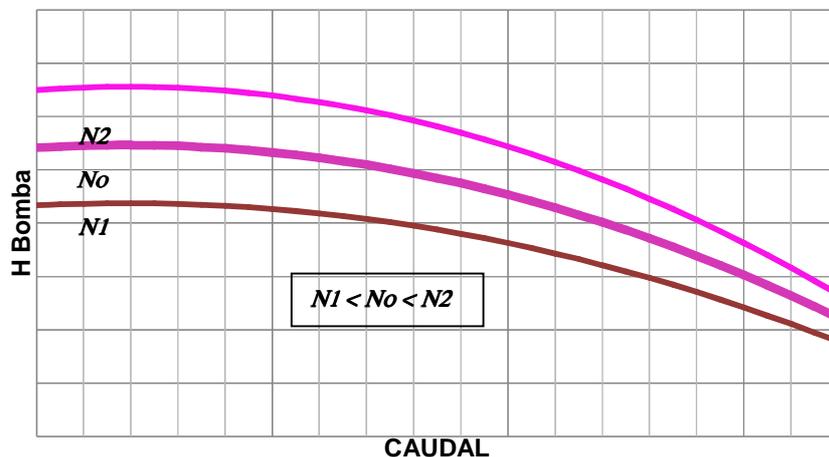


Figura 3.9.- Curva de la Bomba a diferentes revoluciones

En la curva del sistema para el transporte de petróleo y derivados se pueden obtener distintos puntos de operación, considerando:

- Cuando dos o más bombas se ubican en serie, se genera una altura que resulta de la suma de las individuales para cada caudal.

$$H_B' = H_{B.1} + H_{B.2} + \dots + H_{B.n}$$

- Cuando dos o varias bombas se ubican en paralelo dan como resultado una curva característica conjunta en la cual se suman los caudales para cada altura.

$$Q_B' = Q_{B.1} + Q_{B.2} + \dots + Q_{B.3}$$

El punto de operación del sistema corresponde a la intersección de las curvas, la específica del sistema y la que caracteriza al sistema de bombeo y la que corresponde a una solución de las ecuaciones 3.6 y 3.7.

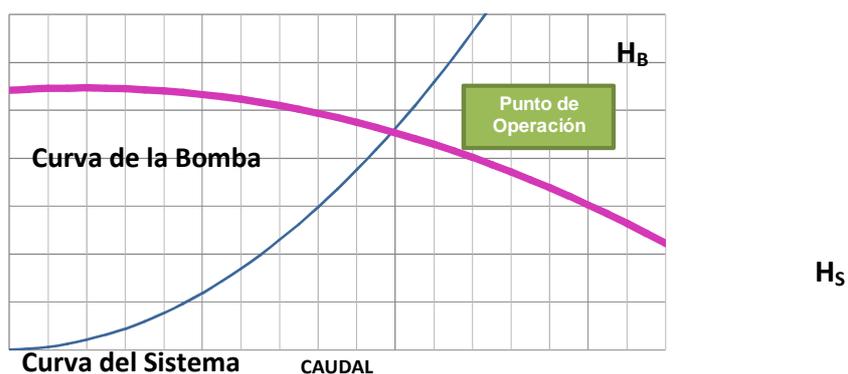


Figura 3.10.- Intersección de las Curvas de la Bomba y del Sistema

Dentro del modelo hidrodinámico que caracteriza al poliducto que transporta productos derivados del petróleo, en el cual definimos la bomba o grupo de bombas que actúa y satisface las condiciones necesarias para transportar los derivados de petróleo a través del sistema que conformado por la tubería.

La curva del sistema a medida que el producto recorre la longitud del poliducto es dependiente del tiempo a lo largo del eje x en la cual se determina los diferentes puntos de operación definiendo los caudales máximos y mínimos, análogamente si consideramos que el área interna de la tubería es constante con la cual determinamos valores de la velocidad correspondientes a cada instante de tiempo.

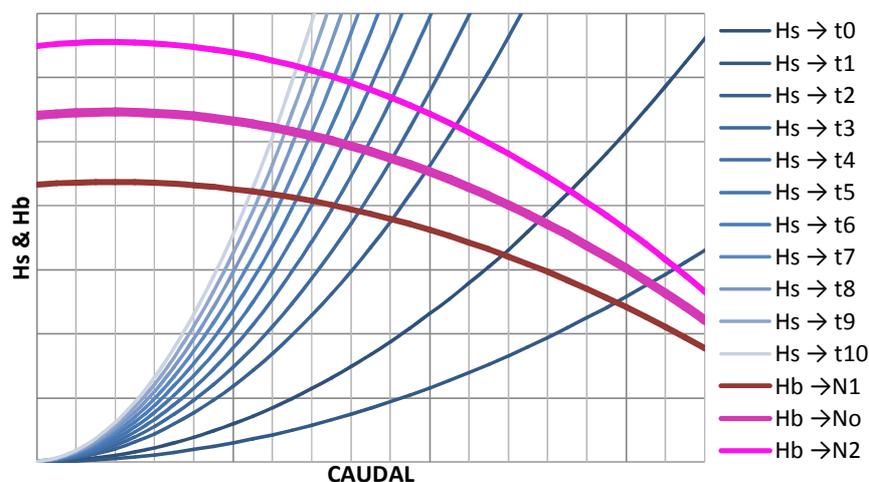


Figura 3.11.- Puntos de Operación para cada instante de tiempo

3.4. MODELO MATEMÁTICO PARA LA FORMACIÓN DE LA MEZCLA DE PRODUCTOS TRANSPORTADOS POR LOTES ³

Los derivados del petróleo poseen la propiedad de que el volumen V_A del primer producto se mezcla con un segundo producto con volumen V_B , el volumen de la mezcla resultante V_M con gran precisión es igual a la suma de los volúmenes de cada uno $V_M = V_A + V_B$; por lo tanto, la propiedad aditiva del volumen para la mezcla de estos componentes se toma como hipótesis principal en la construcción del modelo de formación de la mezcla en una tubería.

Para caracterizar a cada producto en contacto a través de la densidad ρ_A y ρ_B respectivamente la concentración volumétrica θ_A y θ_B de los productos, define la densidad de la mezcla en concordancia con la ley de conservación de la masa.

$$\rho_M V_M = \rho_A V_A + \rho_B V_B$$

Al dividir el volumen de la mezcla se obtiene la densidad de la mezcla en función del volumen y densidad de los productos transportados.

$$\rho_M = \rho_A \frac{V_A}{V_M} + \rho_B \frac{V_B}{V_M} \quad (3.8)$$

La concentración volumétrica θ_A y θ_B se define como la relación entre el volumen individual con respecto al volumen total, caracterizado por las siguientes relaciones volumétricas especificadas para cada producto.

$$\theta_A = \frac{V_A}{V_M} \quad \text{y} \quad \theta_B = \frac{V_B}{V_M}$$

Al reemplazar las concentraciones θ_A y θ_B en la ecuación 3.8, se obtiene la conservación de la masa en función de la concentración volumétrica.

$$\rho_M = \rho_A \theta_A + \rho_B \theta_B \quad (3.9)$$

³ Mikhail V. Lurie. *Pipeline Transportation of oil Products Batching*

La suma de las concentraciones de los productos es igual a la unidad.

$$\theta_A + \theta_B = 1 \quad (3.10)$$

Sea $\theta_B = 1 - \theta_A$ y reemplazando en la ecuación 3.9.

$$\rho_M = \rho_A \theta_A + \rho_B (1 - \theta_A)$$

Despejando θ_A , se obtiene la concentración del producto A en función de la densidad de la mezcla y de los productos A y B.

$$\theta_A = \frac{\rho_M - \rho_B}{\rho_A - \rho_B}$$

Análogamente tenemos la concentración del producto B.

$$\theta_B = \frac{\rho_M - \rho_A}{\rho_B - \rho_A}$$

El modelo matemático de la formación de la mezcla del fluido en la tubería dentro de la zona de contacto se caracteriza debido a que la concentración es una función del desplazamiento y del tiempo $\theta_{(x,t)}$ para uno de los productos derivados del petróleo; comprendido en la región de mezcla $0 < \theta < 1$.

Cuando la concentración θ es igual a 1 corresponde a la región del producto que se desplaza, y θ es igual a 0 cuando el producto que se encuentra delante y es desplazado por el siguiente producto.

Para establecer el modelo matemático que caracteriza la formación de la mezcla es importante tomar en cuenta las regularidades en la región de mezcla, con respecto al cambio en masa de productos que describe mediante la relación entre la tasa de flujo volumétrico $q_{(x,t)}$ de los productos del petróleo que se desplazan, siendo la velocidad de flujo volumétrico del producto a ser desplazado igual a $V_o - q_{(x,t)}$; y los parámetros de la distribución de la concentración $\theta_{(x,t)}$ en el flujo.

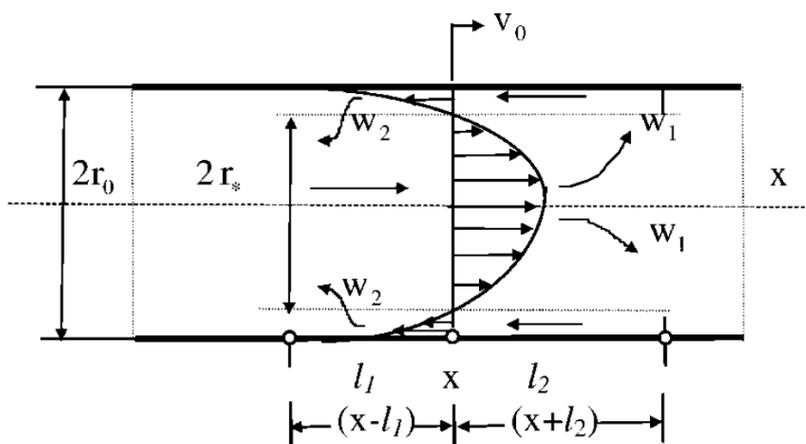


Figura 3.12 intercambio de masa en una sección transversal de la región de mezcla

Donde:

- r_0 Radio interno de la tubería
- r_* Radio en el cual actúa la Velocidad hidrodinámica media
- V_0 Velocidad del fluido
- w Velocidad del flujo (rata de flujo)
- l Distancia desde el punto de referencia

El intercambio de masa en una sección transversal de la región de mezcla es producido cuando el caudal del fluido total que pasa a través de la sección transversal en el marco de referencia del eje X en movimiento es igual a 0, pero las transferencias de fluido (producto de la mezcla) de izquierda a derecha con la rata de flujo w ocurre principalmente en la parte central de la tubería, mientras que el flujo de la mezcla invierte en la dirección de derecha a izquierda con velocidad de flujo w_1 , de la misma magnitud que w_2 , pero con sentido contrario que se genera principalmente cerca de la superficie interna de la tubería.

La velocidad de flujo $w = w_1 = -w_2$ es determinada por el perfil de la velocidad media $\bar{V}_{(r)}$ en el interior de la tubería desde $0 \leq r \leq r_*$

$$w = 2\pi \int_0^{r_*} r(\bar{V}_{(r)} - V_0) dr \quad (3.11)$$

El perfil de velocidades⁴ $\bar{V}_{(r)}$, se iguala con la ecuación que describe el perfil logarítmico en flujo turbulento.

$$\frac{\bar{V}_{(r)} - V_{\max}}{V_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(1 - \frac{r}{r_o}\right) \quad (3.12)$$

Donde:

κ Constante de Karman, igual a 0.4

V_* Velocidad dinámica

Se considera la relación efectiva entre el radio por el cual circula el flujo másico con respecto al radio de la tubería de 0.805.

$$r_* = 0.805 \cdot r_o \quad (3.13)$$

De la ecuación 3.39 despejamos $\bar{V}_{(r)}$

$$\bar{V}_{(r)} = V_{\max} + \frac{V_*}{\kappa} \ln\left(1 - \frac{r}{r_o}\right)$$

Sea $r = r_*$ y $\bar{V}_{(r)} = V_o$

$$\bar{V}_{(r)} = V_{\max} + \frac{V_*}{\kappa} \ln\left(1 - \frac{r_*}{r_o}\right) \quad (3.14)$$

Para $r_* = 0.805 \cdot r_o \rightarrow \bar{V}_{(r)} = V_o$

$$V_o = V_{\max} + \frac{V_*}{\kappa} \ln\left(1 - \frac{0.805 \cdot r_o}{r_o}\right)$$

Para $\kappa = 0.4$

$$V_o = V_{\max} + \frac{V_*}{0.4} \ln(0.195)$$

$$V_o = V_{\max} - 4.08 \cdot V_* \quad (3.15)$$

Reemplazo la ecuación 3.14 en la ecuación 3.11.

$$w = 2\pi \int_0^{r_*} r \left(\frac{V_*}{\kappa} \ln\left(1 - \frac{r}{r_o}\right) + V_{\max} - V_o \right) dr$$

⁴ Perfil de velocidades determinado por Loitzyskiy en 1987.

Se resuelve la integral para determinar la velocidad del flujo w .

$$w = 2\pi \left\{ \frac{V_*}{2\kappa} \left[(r^2 - r_o^2) \ln \left(1 - \frac{r}{r_o} \right) - r_o^2 \left(\frac{r^2}{2r_o^2} + \frac{r}{r_o} \right) \right] + \frac{r^2}{2} (V_{\max} - V_o) \right\} \Big|_0^{r_*}$$

$$w = 2\pi \left\{ \frac{V_*}{2\kappa} \left[(r_*^2 - r_o^2) \ln \left(1 - \frac{r_*}{r_o} \right) - r_o^2 \left(\frac{r_*^2}{2r_o^2} + \frac{r_*}{r_o} \right) \right] + \frac{r_*^2}{2} (V_{\max} - V_o) \right\}$$

Reemplazo en la ecuación 3.13.

$$w = 2\pi \left\{ \frac{V_*}{2\kappa} \left[((0.805 \cdot r_o)^2 - r_o^2) \ln \left(1 - \frac{0.805 \cdot r_o}{r_o} \right) - r_o^2 \left(\frac{(0.805 \cdot r_o)^2}{2r_o^2} + \frac{0.805 \cdot r_o}{r_o} \right) \right] + \frac{(0.805 \cdot r_o)^2}{2} (V_{\max} - V_o) \right\}$$

$$w = 2\pi \left\{ \frac{V_*}{2\kappa} \left[(-0.352 \cdot r_o^2) \ln(0.195) - r_o^2(0.324 + 0.805) \right] + \frac{0.648 \cdot r_o^2}{2} (V_{\max} - V_o) \right\}$$

$$w = 2\pi \left\{ \frac{V_*}{2\kappa} \left[0.575 \cdot r_o^2 - 1.129 \cdot r_o^2 \right] + 0.324 \cdot r_o^2 (V_{\max} - V_o) \right\}$$

Para $\kappa = 0.4$

$$w = 2\pi \left\{ \frac{V_*}{2(0.4)} \left[-0.554 \cdot r_o^2 \right] + 0.324 \cdot r_o^2 (V_{\max} - V_o) \right\}$$

$$w = 2\pi \left\{ -0.692 \cdot r_o^2 \cdot V_* + 0.324 \cdot r_o^2 (V_{\max} - V_o) \right\}$$

Reemplazo en la igualdad de la ecuación 3.15.

$$w = 2\pi \left\{ -0.692 \cdot r_o^2 \cdot V_* + 0.324 \cdot r_o^2 (V_{\max} - (V_{\max} - 4.08V_*)) \right\}$$

$$w = 2\pi \left\{ -0.692 \cdot r_o^2 \cdot V_* + 0.324 \cdot r_o^2 (V_{\max} - V_{\max} + 4.08V_*) \right\}$$

$$w = 2\pi \left\{ -0.692 \cdot r_o^2 \cdot V_* + 0.324 \cdot r_o^2 (4.08V_*) \right\}$$

$$w = 2\pi \left\{ -0.692 \cdot r_o^2 \cdot V_* + 1.321 \cdot r_o^2 \cdot V \right\}$$

$$w = 1.26 \cdot \pi \cdot r_o^2 \cdot V_*$$

Donde $A = \pi \cdot r_o^2$

$$w = 1.26 \cdot V_* \cdot A \quad (3.16)$$

El flujo generado por un fluido viscoso es turbulento el cual se desarrolla en una tubería con radio r_o , en la práctica se usa la velocidad media $V_{(r)}$, que es la velocidad promediada en el tiempo de las partículas del fluido que pasan a través de un punto de referencia considerado; y, suponiendo que las velocidades resultantes son paralelas al eje de la tubería e independiente de la coordenada radial r , que es la distancia entre el punto considerado de la sección transversal y el tubo del eje; de manera similar el promedio de las tensiones tangenciales entre las capas de fluido que se desplazan a velocidad media que se denomina esfuerzos de Reynolds.

El promedio del esfuerzo debido a la resistencia tangencial es representado por la fuerza de fricción que actúa entre las capas de flujo turbulento al aplicar sobre la superficie en el diferencial de área de la tubería que se expresa a través de la tensión de fricción tangencial τ_m en la pared de la tubería.

$$|\tau_m| = \rho V_*^2 \quad (3.17)$$

La velocidad dinámica en función del factor de resistencia hidráulica.

$$|\tau_m| = \frac{f}{8} \rho V_o^2 \quad (3.18)$$

Igualando la ecuación 3.17 con la ecuación 3.18.

$$\frac{f}{8} \rho V_o^2 = \rho V_*^2$$

Al despejar la velocidad dinámica V_* , se expresa en función del factor de rozamiento y de la velocidad.

$$V_*^2 = \sqrt{\frac{f}{8}} V_o \quad (3.19)$$

Se reemplaza la ecuación 3.19 en la ecuación 3.16, mediante la cual se expresa en función del flujo de masa con la velocidad y el área de la tubería.

$$w = 1.26 \sqrt{\frac{f}{8}} V_o \cdot A \quad (3.20)$$

Sea $Q = V \cdot A$, donde Q es el caudal que tiene que ser bombeado a través de la tubería.

$$w = 0.446\sqrt{f} \cdot Q \quad (3.21)$$

La ecuación 3.21 describe el flujo que ocasiona el cambio de velocidad del flujo másico y el caudal de bombeo para transportar líquidos a través de la tubería, de la cual se determina que el cambio de cantidad de flujo relativamente no es considerable.

La concentración w fluye en contracorriente con respecto a la transferencia de fluido, tanto en el primer producto como del segundo, a lo largo del eje x de la sección transversal en referencia al movimiento.

Las concentraciones medias θ' y θ'' en los flujos a transportar son diferentes; por lo tanto, la tasa de flujo $q_{(x,t)}$ del producto es desplazado en la sección transversal X , está dada por la igualdad.

$$q_{(x,t)} = w(\theta' - \theta'') \quad (3.22)$$

La concentración del primer producto θ' que fluye de izquierda a derecha, durante el desplazamiento en la sección transversal está ubicada a una distancia L_B detrás de $x=0$ de la sección transversal.

$$\theta' = \theta(x - L_B, t) \cong \theta(x, t) - L_B \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} + \dots \quad (3.23)$$

Semejante, para la concentración del segundo flujo del producto θ'' que va de derecha a izquierda, es igual en el desplazamiento a cierta distancia L_A por delante de la sección transversal.

$$\theta'' = \theta(x + L_A, t) \cong \theta(x, t) + L_A \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} + \dots \quad (3.24)$$

Las longitudes de mezcla L_A y L_B son iguales, debido a la difusión turbulenta de la mezcla y a la impureza en el canal de la sección transversal.

Resto la ecuación 3.23 de la ecuación 3.24.

$$\theta'' - \theta' = \left(\theta(x,t) + L_A \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) - \left(\theta(x,t) - L_B \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)$$

$$\theta'' - \theta' = \theta(x,t) + L_A \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} - \theta(x,t) + L_B \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x}$$

$$\theta'' - \theta' = L_A \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} + L_B \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x}$$

Reemplazo en la ecuación 3.22.

$$q(x,t) = -w(L_A + L_B) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (3.25)$$

Reemplazo en la ecuación 3.21.

$$q(x,t) = -0.446 \cdot \sqrt{f} \cdot (L_A + L_B) \cdot V_O \cdot A \quad (3.26)$$

Se define la constante K en función del factor de rozamiento de la longitud del poliducto y de la velocidad del flujo del fluido.

$$K = -0.446 \cdot \sqrt{f} \cdot (L_A + L_B) \cdot V_O \quad (3.27)$$

Donde la tasa de flujo se expresa en función de la constante K , el área y el gradiente de desplazamiento.

$$q(x,t) = -K \frac{\partial \theta}{\partial x} \cdot A \quad (3.28)$$

A la ecuación 3.28 se denomina “Ley Longitudinal de Mezcla”, la cual establece la proporcionalidad de la tasa de flujo volumétrico $q_{(x,t)}$ con el gradiente de desplazamiento de los productos $\partial\theta/\partial x$; siendo K el Factor Efectivo Longitudinal de la mezcla.

El Factor Efectivo Longitudinal tiene unidades de $[m^2 \cdot s^{-1}]$.

El signo menos en la ecuación muestra que el flujo de cada producto es dirigido desde la concentración más alta hacia la más baja y es opuesto al gradiente de concentración del producto líquido considerado.

Existen varias fórmulas teóricas y experimentales para el Factor Longitudinal de Mezcla⁵, donde K es:

$$K = 1.785\sqrt{f} \cdot V_o \cdot d \quad (3.29)$$

El cálculo del factor longitudinal de mezcla K , se establece bajo el supuesto de que las densidades y viscosidades de los fluidos en contacto se acercan el uno al otro; por lo tanto, esta ecuación no sería adecuada para el caso en que las densidades y viscosidades de los fluidos en contacto difieren significativamente entre sí. Estas situaciones se producen durante la operación y el bombeo de los productos derivados del petróleo, para el cual son aplicables; así por ejemplo cuando se bombea bencenos y diesel consecutivamente, donde se evidencia que el factor de fricción f de los fluidos hidráulicos es diferente.

Comparando la ecuación 3.27 con la ecuación 3.29, tenemos como resultado que la suma de las longitudes de mezcla $L_A + L_B$ es igual a cuatro veces el diámetro de la tubería $4D$, igualdad que se aplica siempre y cuando el número de Reynolds es superior a 3×10^4 .

⁵ *Ishmuchamedov et al., 1999 considera la solución aplicando el método de Taylor para la dispersión de una impureza para un flujo turbulento en una tubería.*

3.4.1. ECUACIÓN DE LA LONGITUD DE MEZCLA

El modelo matemático que describe el proceso de formación de la mezcla durante el desplazamiento de un producto que es empujado por otro consecutivo, se realiza mediante la ecuación del balance volumétrico en el que interviene cada componente estableciendo un equilibrio con las concentraciones θ_A y θ_B ; siendo, la suma de los productos A y B igual a 1. Considerando que la concentración del producto uno está en función de la distancia que recorre en un tiempo transcurrido se define como $\theta_B = \theta_{(x,t)}$.

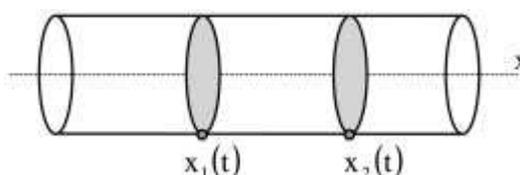


Figura 3. 13.- Volumen de mezcla

Reemplazo en la ecuación 3.11, mediante la cual se define la concentración del producto dos, como una función del primer producto transportado y en función a la distancia recorrida, tenemos: $\theta_A = 1 - \theta_{(x,t)}$

El desplazamiento de los líquidos que se encuentra en la sección transversal, limitada por $X_{A(t)}$ y $X_{B(t)}$, en el cual encierra al volumen V_1 .

$$V_1 = \int_{X_{1(t)}}^{X_{2(t)}} \theta(x,t) \cdot A dx$$

Al derivar con respecto al tiempo, tenemos el diferencial de volumen:

$$\frac{dV_1}{dt} = \frac{d}{dx} \left(\int_{X_B}^{X_A} \theta(x,t) \cdot A dx \right) \quad (3.30)$$

El volumen V_1 en primera aproximación se considera constante, mismo que durante el recorrido por la tubería a lo largo de la longitud del poliducto, pero en realidad varia debido a la penetración mutua de los productos, esta variación es definida por la diferencia de la transferencia del caudal desde $q(x_B, t) - q(x_A, t)$.

$$\frac{dV_1}{dt} = q(x_B, t) - q(x_A, t) \quad (3.31)$$

Se iguala con la ecuación 3.31 con la ecuación 3.32.

$$\frac{d}{dx} \left(\int_{X_B}^{X_A} \theta(x,t) \cdot A dx \right) = q(x_B,t) - q(x_A,t) \quad (3.32)$$

De la definición de integral, tenemos:

$$q(x_B,t) - q(x_A,t) = - \int_{X_B}^{X_A} \frac{\partial q}{\partial x} dx$$

Al igualar con la ecuación 3.32, tenemos la siguiente ecuación:

$$\frac{d}{dx} \left(\int_{X_B}^{X_A} \theta(x,t) \cdot A dx \right) = - \int_{X_B}^{X_A} \frac{\partial q}{\partial x} dx \quad (3.33)$$

De la ecuación de la Continuidad – Ley de la Conservación del Transporte de masa⁶.

$$\frac{d}{dx} \left(\int_{X_B}^{X_A} \theta(x,t) \cdot A dx \right) = - \int_{X_B}^{X_A} \left(\frac{\partial \theta A}{\partial t} + \frac{\partial \theta V_o \cdot A}{\partial x} \right) dx$$

Igualando con la ecuación 3.33.

$$\int_{X_B}^{X_A} \left(\frac{\partial \theta A}{\partial t} + \frac{\partial \theta V_o \cdot A}{\partial x} \right) dx = - \int_{X_B}^{X_A} \frac{\partial q}{\partial x} dx$$

Se resuelve la integral entre los límites X_A y X_B elegidos arbitrariamente en un instante de tiempo durante el recorrido del poliducto, para definir a la ecuación diferencial para la concentración $\theta(x,t)$ durante el desplazamiento de la mezcla:

$$\frac{\partial \theta A}{\partial t} + \frac{\partial \theta V_o \cdot A}{\partial x} = - \frac{\partial q}{\partial x} \quad (3.34)$$

Derivamos con respecto a x, la ecuación 3.28 que describe la tasa de flujo volumétrico q(x,t).

$$\frac{\partial q(x,t)}{\partial x} = -K \cdot A \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}$$

⁶ Ec. 1.4. Página 7.- Modeling of Oil Product and Gas Pipeline Transportation

Reemplazo en la ecuación 3.34.

$$\frac{\partial \theta \cdot A}{\partial t} + \frac{\partial \theta V_o \cdot A}{\partial x} = - \left(-K \cdot A \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \right) \quad (3.35)$$

Se considera que la Velocidad media V_o y el área A de la tubería son constantes en cualquier instante de tiempo t , son las variables que caracterizan a la ecuación diferencial para determinar la mezcla longitudinal entre dos productos transportados secuencialmente.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + V_o \frac{\partial \theta}{\partial x} = K \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (3.36)$$

Para adimensionar la ecuación definimos las igualdades $\bar{x} = \frac{x}{L}$, y $\bar{t} = \frac{t}{L/V_o}$.

De la igualdades anteriores, despejo x y t , respectivamente.

$$\checkmark \text{ Primera derivada} \quad \partial x = L \cdot \partial \bar{x}$$

$$\partial t = \frac{L}{V_o} \partial \bar{t}$$

De la igualdad $x = L \cdot \bar{x}$, elevamos al cuadrado y tenemos $x^2 = L^2 \cdot \bar{x}^2$, de la cual:

$$\checkmark \text{ Primera derivada} \quad 2x \cdot \partial x = 2L^2 \cdot \bar{x} \cdot \partial \bar{x}$$

$$x \cdot \partial x = L^2 \cdot \bar{x} \cdot \partial \bar{x}$$

$$\checkmark \text{ Segunda derivada} \quad \partial x \cdot \partial x = L^2 \cdot \partial \bar{x} \cdot \partial \bar{x}$$

$$\partial x^2 = L^2 \cdot \partial \bar{x}^2$$

Reemplazando ∂t , ∂x y ∂x^2 en la ecuación 3.36

$$\frac{\partial \theta}{L/V_o \cdot \partial \bar{t}} + V_o \frac{\partial \theta}{L \partial \bar{x}} = K \frac{\partial^2 \theta}{L^2 \partial \bar{x}^2}$$

$$\frac{V_o \partial \theta}{L \partial \bar{t}} + \frac{V_o \partial \theta}{L \partial \bar{x}} = \frac{K \partial^2 \theta}{L^2 \partial \bar{x}^2}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \bar{t}} + \frac{\partial \theta}{\partial \bar{x}} = \frac{K}{V_o \cdot L} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \bar{x}^2} \quad (3.37)$$

Dónde $Vo \cdot L/K$ es un parámetro adimensional⁷ que caracteriza la cantidad de mezcla del producto bombeado y transportado; los problemas originados en el desplazamiento de los productos derivados de petróleo en los cuales consideramos los parámetros dimensionales x , T , K , Vo , L ; reduciendo las variables, sin que varíe la física del proceso en el transporte, al cambiar a un marco de referencia $x_* = x - Vo \cdot t$, en el cual se mueve el fluido con una velocidad media Vo originado por el bombeo de los productos, considerando que:

- La derivada de la igualdad que adimensionaliza es $\partial_{x_*} = \partial_x$ y
- El gradiente de concentración con respecto a la longitud del poliducto es tiende a cero: $\partial\theta/\partial x \rightarrow 0$

La ecuación 3.37 se simplifica a:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = K \frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} \quad (3.38)$$

Aplicando las condiciones de borde de la tubería en la longitud de mezcla, dentro del marco de referencia dentro del eje móvil $x_* = x - Vo \cdot t$

Cuando:

$$X=0 \quad \rightarrow \quad x_* = -Vo \cdot t ; y$$

$$X=L \quad \rightarrow \quad x_* = L - Vo \cdot t$$

Al inicio del poliducto $\theta \rightarrow 1$, cuando $x \rightarrow -\infty$

Al final del poliducto $\theta \rightarrow 0$, cuando $x \rightarrow +\infty$

Para $t=0$, el instante en el cual se genera el cambio instantáneo de la mezcla de los productos.

$$\theta(x_*,0) = \begin{cases} 1, & x_* < 0 \\ 0, & x_* > 0 \end{cases}$$

⁷ Se denomina número de Peclet

La solución a la función θ dimensional, se reduce a una ecuación con cantidades tridimensionales en función de tres parámetros independientes x , t y K ; a la cual se realiza una combinación adimensional:

$$\psi = \frac{x_*}{\sqrt{K \cdot t}}$$

✓ Primera de derivada de ψ con respecto a t

$$\partial \psi = -\frac{1}{2} \frac{x_* \cdot t^{-3/2}}{\sqrt{K}} \cdot \partial t$$

$$\partial \psi = -\frac{1}{2} \frac{x_*}{t \cdot \sqrt{K \cdot t}} \cdot \partial t$$

Se reemplaza $\frac{x_*}{\sqrt{K \cdot t}}$ por ψ , y se obtiene:

$$\partial \psi = -\frac{1}{2} \frac{\psi}{t} \cdot \partial t$$

Se despeja ∂t .

$$\partial t = -\frac{2 \cdot t}{\psi} \partial \psi$$

Segunda derivada de ψ con respecto a x_* , elevemos al cuadro a la función ψ .

$$(\psi)^2 = \left(\frac{x_*}{\sqrt{K \cdot t}} \right)^2 \Rightarrow \psi^2 = \frac{x_*^2}{K \cdot t}$$

✓ Primera de derivada de ψ con respecto a t

$$2\psi \cdot \partial \psi = \frac{2x_*}{K \cdot t} \cdot \partial x_*$$

$$\psi \cdot \partial \psi = \frac{x_*}{K \cdot t} \cdot \partial x_*$$

$$\checkmark \text{ Segunda derivada} \quad \partial \psi \cdot \partial \psi = \frac{1}{K \cdot t} \cdot \partial x_* \cdot \partial x_*$$

$$\partial \psi^2 = \frac{1}{K \cdot t} \cdot \partial x_*^2$$

Se despeja ∂x_*^2

$$\partial x_*^2 = K \cdot t \cdot \partial \psi^2$$

Para la solución a la ecuación 3.38, misma que es dependiente de la constante adimensional ψ , de tal forma que $\theta(x_*, t)$ es igual a la función $\theta(\psi)$; para la solución de la ecuación en cualquier instante de tiempo t .

Reemplazo ∂x_*^2 y ∂t en la ecuación 3.38, se obtiene:

$$\frac{\partial \theta}{-\frac{2 \cdot t}{\psi} \partial \psi} = \frac{K}{K \cdot t} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \psi^2}$$

Al simplificar y ordenar se obtiene la ecuación diferencial ordinaria de segundo orden.

$$-\frac{\psi}{2} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \psi^2} \quad (3.39)$$

La solución a la ecuación diferencial: $\theta_{(\psi)} = A \int_0^{\psi} e^{-\alpha^2} d\alpha + B$

- Condiciones de borde:

1. Cuando $\theta \rightarrow 0$; $\psi \rightarrow \infty$

$$0 = A \int_0^{\infty} e^{-\alpha^2} d\alpha + B$$

$$B = -A \int_0^{\infty} e^{-\alpha^2} d\alpha \quad (3.40)$$

2. Cuando $\theta \rightarrow 1$; $\psi \rightarrow -\infty$

$$1 = A \int_0^{-\infty} e^{-\alpha^2} d\alpha + B \quad (3.41)$$

Reemplazo la ecuación 3.41 en la ecuación 3.39:

$$1 = A \int_0^{-\infty} e^{-\alpha^2} d\alpha - A \int_0^{\infty} e^{-\alpha^2} d\alpha \quad (3.42)$$

La solución a las integrales⁸:

$$\checkmark \text{ Int. I.- } \int_0^{\infty} e^{-\alpha} d\alpha = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

$$\checkmark \text{ Int. II.- } \int_0^{-\infty} e^{-\alpha} d\alpha = -\frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

Reemplazando la solución a las integrales I y II en la ecuación 3.41.

$$1 = A \left(-\frac{\sqrt{\pi}}{2} \right) - A \left(\frac{\sqrt{\pi}}{2} \right)$$

$$A = -\frac{1}{\sqrt{\pi}}$$

Se reemplaza la solución de integral I y el valor de la constante A en la ecuación 3.40.

$$B = -\left(-\frac{1}{\sqrt{\pi}} \right) \left(\frac{\sqrt{\pi}}{2} \right)$$

$$B = \frac{1}{2}$$

⁸ Corresponde a una solución obtenida en Matlab.

Una vez conocidas las constantes A y B, se reemplaza en la ecuación diferencial de segundo orden:

$$\theta_{(\psi)} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\psi} e^{-\alpha^2} d\alpha \right) \quad (3.43)$$

Si reemplazamos ψ por las variables x , K y t , se obtiene la ecuación de la distribución de la Concentración $\theta_{(x,t)}$

$$\theta_{(x,t)} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{x_*/2\sqrt{Kt}} e^{-\alpha^2} d\alpha \right) \quad (3.44)$$

En la figura 3.14 se representa la distribución de la concentración $\theta(x, t)$ dentro del marco de referencia del movimiento, la línea gruesa representa la distribución inicial, mientras que otras líneas muestran la distribución de la concentración a medida que el tiempo transcurre.

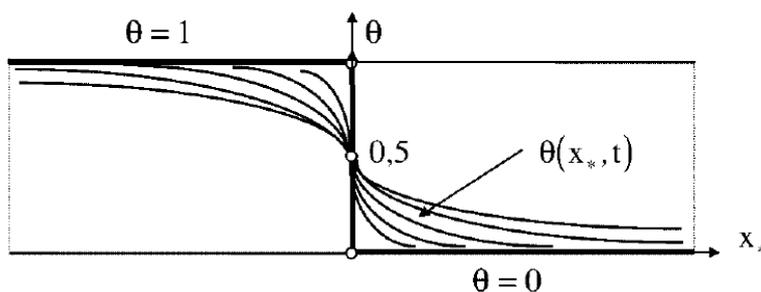


Figura 3.14.- Solución a la ecuación diferencial

El modelo de dispersión de la mezcla longitudinal, en la formación de una mezcla en la zona de contacto del fluido que empuja y el fluido que se desplaza, siendo un resultado óptimo a lo que sucede en la operación del poliducto.

La función $\theta(x, t)$ tiende rápidamente a cero cuando $x \rightarrow \infty$ y tiende a uno cuando $x \rightarrow -\infty$; en el dominio principal de la incertidumbre de esta función se aproxima al modelo de distribución de la concentración longitudinal en la zona de mezcla; por lo tanto, el modelo de dispersión longitudinal de mezcla basada en la ecuación 3.38 se aplica en el cálculo de la mezcla de los productos que se forman en la operación y transporte de de productos derivados del petróleo a través de poliductos.

3.4.2. VOLUMEN DE MEZCLA

El volumen de mezcla de dos productos derivados de petróleo bombeados consecutivamente, se forman en una tubería en el instante de tiempo t calculados por la ecuación 3.44 en el intervalo de concentración de $0,01 < \theta < 0,99$ la misma que se determina por la expresión.

$$V_M = 6.58 \frac{\pi \cdot D^2}{4} [K_M \cdot t]^{0.5}$$

Dinámicamente se define que la distancia es igual a la velocidad por el tiempo $d=V \cdot t$, despejando el tiempo t , para determinar el volumen de mezcla en función de la longitud del poliducto y la velocidad de operación.

$$V_M = 6.58 \frac{\pi \cdot D^2}{4} \left[K_M \cdot \frac{L}{V_o} \right]^{0.5} \quad (3.45)$$

De la fórmula para el volumen de mezcla V_M se define el factor longitudinal de mezcla K_M como la media aritmética del factor de mezcla de cada producto.

Primer Producto $K_A = 1.785 f_A^{0.5} \cdot V_o \cdot d$

Segundo Producto $K_B = 1.785 f_B^{0.5} \cdot V_o \cdot d$

$$K_M = \frac{1}{2} (K_A + K_B)$$

$$K_M = \frac{1}{2} (1.785 \cdot f_A^{0.5} \cdot V_o \cdot D + 1.785 \cdot f_B^{0.5} \cdot V_o \cdot D)$$

$$K_M = 0.8925 \cdot (f_A^{0.5} + f_B^{0.5}) \cdot V_o \cdot D$$

Utilizando como artificio matemático la suma de dos números elevados al cuadrado que es igual a la suma de los mismos y elevados al cuadrado, de cual tenemos:

$$K_M = 0.446(f_A^{0.25} + f_B^{0.25})^2 \cdot V_O \cdot D \quad (3.46)$$

Nota.- Cuando los productos son los mismos, el factor longitudinal de mezcla es igual a cero.

Se reemplaza K_M en la fórmula 3.45, obtenemos la ecuación para calcular el volumen de mezcla.

$$V_M = 6.58 \frac{\pi \cdot D^2}{4} \left[0.446 \cdot (f_1^{0.25} + f_2^{0.25})^2 \cdot V_O \cdot D \cdot \frac{L}{V_O} \right]^{0.5}$$

$$V_M = 4.394 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot (D \cdot L)^{0.5} \cdot (f_A^{0.25} + f_B^{0.25}) \quad (3.47)$$

3.4.3. LONGITUD DE MEZCLA

$$L_M = \frac{V_M}{A}$$

Donde:

A Es el área de la tubería por la cual se transportan los derivados del petróleo.

V_M Volumen de mezcla

$$L_M = \frac{V_M}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}}$$

$$L_M = 4.394 \cdot (D \cdot L)^{0.5} \cdot (f_A^{0.25} + f_B^{0.25}) \quad (3.48)$$

La ecuación 3.48 sirve para calcular la longitud de mezcla en función del diámetro de la tubería, longitud del poliducto y los factores de fricción de los productos transportados.

3.5. INCIDENCIA DEL BATCHEO EN LA OPERACIÓN DE UN POLIDUCTO

La recepción y entrega de los productos son entregados y recibidos desde la tubería hacia el/los tanque/s de almacenamiento.

- E/R desde Comercio Internacional a Refinerías.
- E/R desde Refinerías a través de Poliductos hasta terminales.

El control del flujo para asegurar el suministro adecuado de productos y la entrega a los puntos designados, a través del control de la presión de las bombas (las presiones que son demasiado bajas producen un flujo bajo que ocasiona un funcionamiento ineficiente) y los reguladores que se utilizan en la presión para que los productos sean entregados de manera segura, confiable y eficiente; entre otras actividades de operación es la inspección de tuberías, contadores y la administración de la estación de bombeo, raspado y/o mantenimiento del sistema.

El mantenimiento tiene factores de confiabilidad, seguridad, medio ambiente, calidad y productividad, disponibilidad, costo apropiado y uso racional del sistema para el transporte de productos derivados del petróleo.

La Empresa Pública de Hidrocarburos EP PETROECUADOR es la entidad encargada de realizar la programación del envío de productos a través de los poliductos, esto se realiza en base a la demanda de cada uno de los terminales, el stock mínimo no puede ser inferior a 4 días para que no exista desabastecimiento.

La secuencia y orden de los productos en batcheo se determinan según la compatibilidad y propiedades físicas de los productos con el afán de minimizar la contaminación en las interfaces, y que éstas sean lo más pequeñas posible, las interfaces que son producto contaminado o mezcla de los dos productos en contacto, no se pierde ya que como la cantidad es pequeña con respecto a los volúmenes de producto se la añade al producto de menor densidad o calidad.

El trabajo de los operadores del ducto es justamente seguir la programación de bombeo, con el manejo de los stocks en los terminales tanto de salida como de

llegada para distribuir de mejor manera en los tanques de recepción y despacho de combustibles.

3.5.1. CÁLCULO DE LA EFICIENCIA

La eficiencia para medir la capacidad y la calidad en el sistema de transporte de productos derivados del petróleo, obteniendo resultados mediante la optimización de los recursos para lograr minimizar la mezcla generada entre productos, de acuerdo a la variación y de las condiciones de operación.

La eficiencia dependerá directamente de acuerdo a la demanda nacional por productos, que está relacionada directamente a la programación y secuencia de productos a ser transportados.

Para determinar la validez de la fórmula de la longitud de mezcla aplicamos la siguiente ecuación:

$$Eficiencia = \frac{L - L_M}{L}$$

Donde:

L : Longitud del poliducto

L_M : Longitud de mezcla

3.5.2. INCERTIDUMBRE DE LA FÓRMULA DE LONGITUD DE MEZCLA

La longitud de mezcla depende de varias variables, las cuales determinan físicamente a la incertidumbre de la ecuación de acuerdo a la razón de cambio que presenta al modificar alguno de los parámetros que influyen en la ecuación 3.49. Para determinar la razón de cambio de una función de varias variables respecto a una de sus variables independientes se utiliza el proceso de derivación parcial.

La incidencia se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación diferencial.

$$\Delta_{LM} = \frac{\partial L_M}{\partial f_1} \Delta f_1 + \frac{\partial L_M}{\partial f_2} \Delta f_2 + \frac{\partial L_M}{\partial L_T} \Delta L_T + \frac{\partial L_M}{\partial D} \Delta D \quad (3.49)$$

Datos:

$$L, D, f_1, f_2$$

Definimos:

$$\Delta D, \Delta L_T$$

$$\frac{\partial L_M}{\partial f_1} = 1.0986 \cdot (L \cdot D)^{0.5} \cdot f_1^{-0.75} \quad (3.50)$$

$$\frac{\partial L_M}{\partial f_2} = 1.0986 \cdot (L \cdot D)^{0.5} \cdot f_2^{-0.75} \quad (3.51)$$

$$\frac{\partial L_M}{\partial L} = 2.197 \cdot \left(\frac{D}{L}\right)^{0.5} \cdot (f_1^{0.25} + f_2^{0.25}) \quad (3.52)$$

$$\frac{\partial L_M}{\partial D} = 2.197 \cdot \left(\frac{L}{D}\right)^{0.5} \cdot (f_1^{0.25} + f_2^{0.25}) \quad (3.53)$$

La ecuación de Colebrook-White para calcular el factor de pérdidas por fricción

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right)$$

$$\Delta f = \frac{\partial f}{\partial \varepsilon/D} \Delta \varepsilon/D + \frac{\partial f}{\partial \text{Re}} \Delta \text{Re} \quad (3.54)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial \varepsilon/D} = \frac{F(\text{Re}_1, \varepsilon/D + \Delta \varepsilon/D) - F(\text{Re}_1, \varepsilon/D)}{\Delta \varepsilon/D} \quad (3.55)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial \varepsilon/D} = \frac{F(\text{Re}_2, \varepsilon/D + \Delta \varepsilon/D) - F(\text{Re}_2, \varepsilon/D)}{\Delta \varepsilon/D} \quad (3.56)$$

Sea $Rugrel_inicial = \varepsilon/D$

$$Rugrel_final = (\varepsilon + \Delta\varepsilon)/(D + \Delta D)$$

$$\Delta Rugrel = Rugrel_final - Rugrel_inicial \quad (3.57)$$

Datos:

$$\varepsilon, D, Re_1, Re_2$$

Definimos:

$$\Delta\varepsilon, \Delta D$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial Re_1} = \frac{F(Re_1 + \Delta Re_1) - F(Re_1, \varepsilon/D)}{\Delta Re_1} \quad (3.58)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial Re_2} = \frac{F(Re_2 + \Delta Re_2) - F(Re_2, \varepsilon/D)}{\Delta Re_2} \quad (3.59)$$

Calculo del diferencial debido al número de Reynolds – Re

$$\Delta Re = \frac{\partial Re}{\partial V} \Delta V + \frac{\partial Re}{\partial \nu} \Delta \nu + \frac{\partial Re}{\partial D} \Delta D$$

$$\frac{\partial Re}{\partial V} = \frac{D}{\nu}$$

$$\frac{\partial Re}{\partial \nu} = -\frac{D \cdot V}{\nu^2}$$

$$\frac{\partial Re}{\partial D} = \frac{V}{\nu}$$

$$\Delta Re_1 = \frac{D}{\nu} \Delta V - \frac{D \cdot V}{\nu_1^2} \Delta \nu_1 + \frac{V}{\nu_1} \Delta D \quad (3.60)$$

$$\Delta Re_2 = \frac{D}{\nu} \Delta V - \frac{D \cdot V}{\nu_2^2} \Delta \nu_2 + \frac{V}{\nu_2} \Delta D \quad (3.61)$$

Datos:

$$D, V, \nu_1, \nu_2$$

Definimos:

$$\Delta D, \Delta V, \Delta \nu_1, \Delta \nu_2$$

- Reemplazo las igualdades para definir el delta longitud, de acuerdo a los siguientes pasos:
 - a. La ecuación 3.57 en la ecuación 3.55, para determinar el valor de $\frac{\partial f_1}{\partial \varepsilon/D}$.
 - b. La ecuación 3.57 en la ecuación 3.56, para determinar el valor de $\frac{\partial f_2}{\partial \varepsilon/D}$.
 - c. La ecuación 3.60 en la ecuación 3.58.
 - d. La ecuación 3.61 en la ecuación 3.59.
 - e. Reemplazo las acciones realizadas en a y c en la ecuación 3.54; con lo cual se calcula Δf_1 .
 - f. Reemplazo las acciones realizadas en b y d en la ecuación 3.54; con lo cual se calcula Δf_2 .
- Finalmente sustituyo los literales e y f; y, las ecuaciones 3.50, 3.51, 3.52 y 3.53 en la ecuación 3.49, para establecer la incidencia de las variables en la fórmula de la longitud de mezcla.

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS DEL BATCHEO

4.1. SECUENCIA DEL BATCHEO

La sucesión ordenada de los productos que guardan alguna relación entre sí deberán ser bombeados durante un período determinado que se denomina secuencia de los productos; el ciclo de la secuencia por lotes definido para diferentes productos, puede existir múltiples ciclos determinados por lotes en un período de presentación individual.

La secuencia por lotes no siempre es fijo, pero en la práctica puede ser considerado fijo para cada ciclo, la secuencia de dosificación está dispuesto de tal manera que es probable que resulte en la interfaz al lote de mezcla y el costo mínimo debido a la contaminación.

4.2. INTERFAZ DE LA MEZCLA

Las moléculas de un fluido que ejercen entre ellas, son fuerzas de atracción o de repulsión en las cuales un cuerpo líquido puro es constado por un solo tipo de moléculas, es evidente que estas moléculas ejerzan entre ellas una fuerza de atracción porque de otro modo no formarían un solo y único líquido (una sola fase). El interfaz se genera entre líquidos miscibles o líquidos no miscibles⁹; las moléculas de líquidos no miscibles sufren de dos fuerzas: una atracción al interior "de ellas mismas" y una repulsión con relación a las moléculas del otro líquido.

La forma mediante la cual se genera la interfaz del líquido-líquido se debe a las fuerzas de atracción (intra-líquida), la fuerza de repulsión (inter-líquida) y la fuerza gravitacional. En el transporte de derivados de petróleos la interfaz o mezcla tiene lugar en los límites entre dos productos o lotes adyacentes.

⁹ *Dos líquidos son miscibles si al mezclar se forman solo una fase, si son líquidos no miscibles forman dos fases muy distintas.*

El producto que resulte de la mezcla que cumpla con las especificaciones para el envío de productos contaminados se puede realizar las siguientes acciones:

1. Mezclar con otro producto tolerable y compatible con la mezcla.
2. Cortar en uno o en el otro producto para dividir entre los dos productos adyacentes en el punto medio de la gravedad.
3. Acumular en un tanque y luego puede ser enviado a una refinería para su reprocesamiento.

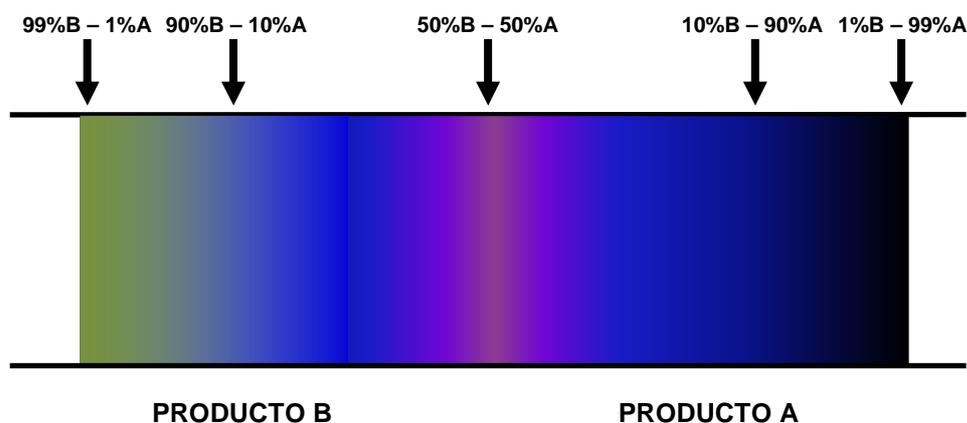


Figura 4.1.- Perfil de la Interfaz de Mezcla

4.3. CICLO DEL BATCHEO

Es la secuencia de etapas que atraviesan durante la operación para el transporte de productos derivados del petróleo a través de una tubería mediante el cual está enmarcado en un suceso con características periódicas y del grupo de productos líquidos que se reiteran en un cierto orden, como se detalla en la figura 4.2.

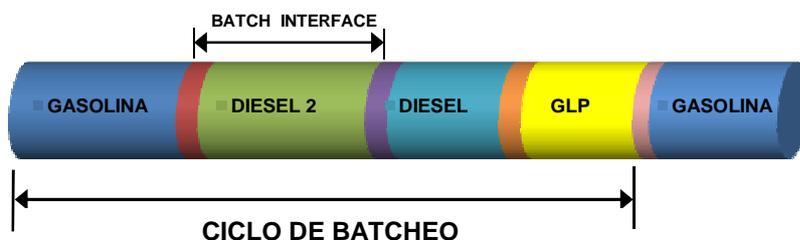


Figura 4.2.- Representación esquemática del Ciclo del Batcheo

4.4. TAMAÑO DE LA MEZCLA

El tamaño de la mezcla depende de las propiedades del producto tales como la gravedad y la viscosidad, la velocidad del fluido, diámetro de la tubería, y la distancia del poliducto; normalmente, la secuencia de los lotes es tal que los productos estrechamente relacionados son adyacentes en orden descendente o ascendente de la calidad o la gravedad para minimizar las interfaces de proceso por lotes, se puede utilizar un tampón para separar dos productos caros.

4.5. DETECCIÓN DE LA INTERFAZ DEL BATCHEO

Para detectar la interfaz de los lotes es necesario notificar al despachador de la llegada lote, y tomar las acciones posteriores para la operación y funcionamiento, esta longitud de la interfaz de mezcla y volúmenes deben ser estimados para hacer frente a mezcla de productos.

La interfaz por lotes puede ser detectado medidores de densidad, viscosidad y detectores de interface altamente calificados, los cuales están agrupados según su principio de operación:

- a. Los ultrasónicos (SoundTrack) que detectan la interface y la medición de densidad y viscosidad en línea a todo lo ancho de la tubería en un solo equipo, sin partes móviles.
- b. Los vibratorios para la medición de densidad y concentración por principio vibratorio al paso del líquido.

Estos instrumentos detectores de la interfaz normalmente son instalados aguas arriba de los lugares de entrega.

Si los lotes están separados por una esfera, entonces la esfera tiene que ser insertado en el momento del lanzamiento de lote y se retira cuando se llega al punto de entrega.

En la operación de los poliductos realizados por la Empresa Pública de Hidrocarburos EP PETROECUADOR se sigue con la siguiente secuencia:

4.5.1. SECUENCIA POLIDUCTO QUITO – AMBATO

Gasolina Base → Gasolina Súper → Gasolina Extra → Diesel 1 →
 → Diesel Premium → Diesel 1 → Diesel 2 → Diesel 1 → Gasolina Base

4.5.2. SECUENCIA DEL POLIDUCTO SHUSHUFINDI – QUITO

Gasolina Base → GLP → Diesel 1 → Diesel 2 → Diesel 1 → Jet Fuel →
 → Diesel 1 → Gasolina Base

El Diesel 1 es un producto que se utiliza como separador de otros productos especialmente entre la gasolina extra y el diesel; entre la gasolina súper y la extra no se utiliza diesel 1 ya que sus densidades son prácticamente iguales y casi no hay mezcla.

4.6. DATOS Y RESULTADOS

4.6.1. DATOS

4.6.1.1. Características de la tubería

Tubería	=	API 5LX-52
Longitud del Poliducto (L)	=	100000 m
Diámetro interno de la tubería (D)	=	0.2000 m
Espesor (e)	=	5.5626 mm
Rugosidad ¹⁰ (Rug)	=	0.0900 mm

¹⁰ Acero comercial y soldado: Entre 0.03 y 0.09 mm.

4.6.1.2. *Datos de la bomba***Tabla 4.1.- Datos de la Bomba**

Velocidad Angular NO = 3560 RPM	
Caudal – Q (gpm)	Altura – H (ft)
47.7	3930.0
117.8	3928.3
242.9	3840.3
352.9	3693.2
482.6	3378.7
580.3	3075.1
691.7	2599.2

Fuente.- GROULDS PUMPS - ITT INDUSTRIES
Modelo 3600. Etapas 10 Motor 372.9 KW, Eléctrico.

4.6.1.3. *Viscosidad de los Productos a transportar @ 15.5 °C***Tabla 4.2.- Viscosidad de los derivados a 15°C**

Producto	Viscosidad ¹¹ (cSt)
GLP	0.35
Jet Fuel	0.8
Gasolina 87	0.9
Gasolina 92	1
Fuel Oil	3.9
Diesel 2	4
Diesel Premiun	6

Fuente.- GERENCIA DE COMERCIALIZACIÓN
EP PETROECUADOR

¹¹ 1cSt = 10⁻⁶ m²/s

4.6.1.4. Resultados del batcheo

Tabla 4.3.- Volumen y Longitud de mezcla entre dos productos derivados del petróleo

<u>ANÁLISIS DE LA LONGITUD DE LA MEZCLA</u>			MEZCLA		
BATCHEO	VISCOSIDAD		VOLUMEN MÁXIMA	LONGITUD MÁXIMA	PORCENTAJE
	cSt	CSt	m ³	m	%
GLP - Jet Fuel	0.35	0.8	14.408	458.6147	0.4586%
GLP - Gasolina 87	0.35	0.9	14.419	458.9665	0.4590%
GLP - Gasolina 92	0.35	1	14.429	459.2972	0.4593%
GLP - Fuel Oil	0.35	3.9	14.721	468.5958	0.4686%
GLP - Diesel 2	0.35	4	14.736	469.0547	0.4691%
GLP - Diesel Premiun	0.35	6	14.896	474.1469	0.4741%
Jet Fuel - Gasolina 87	0.8	0.9	14.476	460.7682	0.4608%
Jet Fuel - Gasolina 92	0.8	1	14.486	461.1004	0.4611%
Jet Fuel - Fuel Oil	0.8	3.9	14.780	470.4632	0.4705%
Jet Fuel - Diesel 2	0.8	4	14.794	470.9117	0.4709%
Jet Fuel - Diesel Premiun	0.8	6	14.955	476.0383	0.4760%
Gasolina 87 - Gasolina 92	0.9	1	14.497	461.4369	0.4614%
Gasolina 87 - Fuel Oil	0.9	3.9	14.791	470.8207	0.4708%
Gasolina 87 - Diesel 2	0.9	4	14.801	471.1139	0.4711%
Gasolina 87 - Diesel Premiun	0.9	6	14.959	476.1488	0.4761%
Gasolina 92 - Fuel Oil	1	3.9	14.802	471.1679	0.4712%
Gasolina 92 - Diesel 2	1	4	14.811	471.4617	0.4715%
Gasolina 92 - Diesel Premiun	1	6	14.970	476.5085	0.4765%
Fuel Oil - Diesel 2	3.9	4	15.102	480.6983	0.4807%
Fuel Oil - Diesel Premiun	3.9	6	15.271	486.0771	0.4861%
Diesel 2 - Diesel Premiun	4	6	15.279	486.3488	0.4863%

Fuente.- Salinas R.

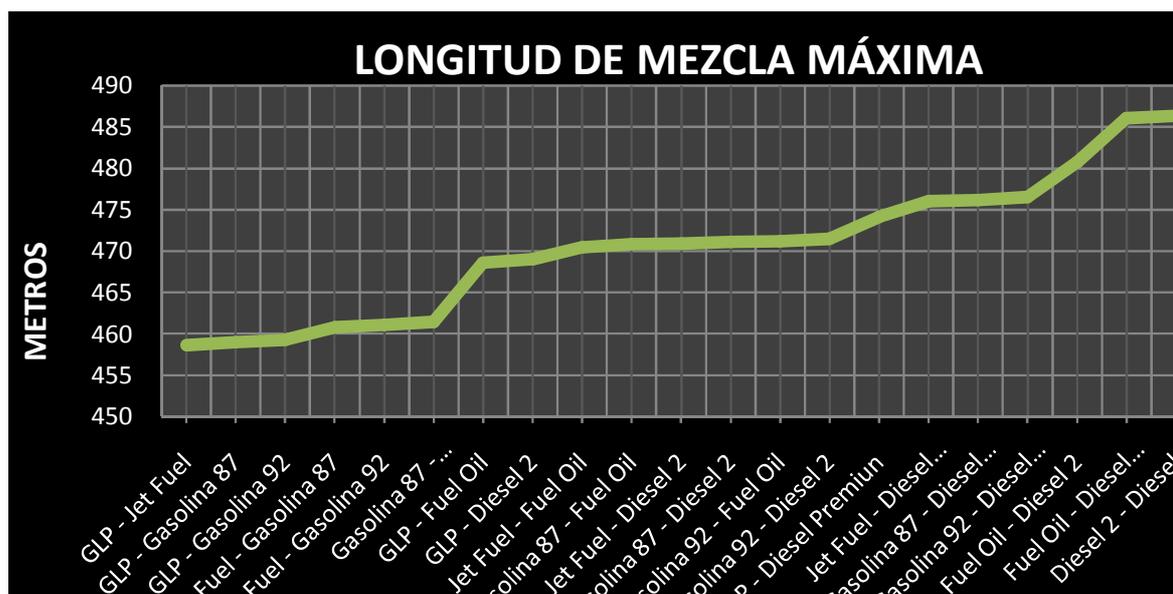


Figura 4.3.- Longitud de mezcla de menor a mayor

4.6.1.5. Incidencia de la fórmula de longitud de mezcla

ECUACIÓN DE LA LONGITUD DE MEZCLA
 =====

$$\frac{2197 D \quad \frac{1}{2} L \quad \frac{1}{2} (f1 + f2)}{500}$$

DATOS INICIALES PARA DETERMINAR LA INCIDENCIA DE LAS VARIABLES
 EN LA ECUACIÓN DE LONGITUD DE MEZCLA

Longitud	Diámetro	Velocidad	Rugrel	f1	f2
100000	0.20	1.0383	2.500e-004	0.0233	0.0405

DELTAS PARA REALIZAR EL CÁLCULO DE LA INCIDENCIA DE LAS VARIABLES

delta L	delta D	delta V	deltaRug	deltaVisCin1	deltaVisCin2
1	0.01	0.1000	1.000e-004	5.000e-008	5.000e-008

VisCin1	VisCin2	deltaRe1	deltaRe2	df1_dRugrel	df2_dRugrel
0.35	0.80	12783.469	15265.938	-8.45	-42.65
0.35	0.90	12783.469	15172.037	-8.45	-42.34
0.35	1.00	12783.469	14808.500	-8.45	-42.04
0.35	3.90	12783.469	5776.716	-8.45	-35.35
0.35	4.00	12783.469	5648.938	-8.45	-35.16
0.35	6.00	12783.469	3910.167	-8.45	-31.84
0.80	0.90	15265.938	15172.037	-6.94	-42.34
0.80	1.00	15265.938	14808.500	-6.94	-42.04
0.80	3.90	15265.938	5776.716	-6.94	-35.35
0.80	4.00	15265.938	5648.938	-6.94	-35.16
0.80	6.00	15265.938	3910.167	-6.94	-31.84
0.90	1.00	15172.037	14808.500	-6.63	-42.04
0.90	3.90	15172.037	5776.716	-6.63	-35.35
0.90	4.00	15172.037	5648.938	-6.63	-35.16
0.90	6.00	15172.037	3910.167	-6.63	-31.84
1.00	3.90	14808.500	5776.716	-6.33	-35.35
1.00	4.00	14808.500	5648.938	-6.33	-35.16
1.00	6.00	14808.500	3910.167	-6.33	-31.84
3.90	4.00	5776.716	5648.938	0.35	-35.16
3.90	6.00	5776.716	3910.167	0.35	-31.84
4.00	6.00	5648.938	3910.167	0.54	-31.84

df1_dRe	df2_dRe	deltaf1	deltaf2	deltaLM
-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0097	-0.0510	-112.98
-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0097	-0.0506	-112.40
-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0097	-0.0498	-110.91
-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0097	-0.0285	-74.39
-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0097	-0.0282	-73.80
-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0097	-0.0231	-65.09
-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0101	-0.0506	-113.37
-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0101	-0.0498	-111.87
-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0101	-0.0285	-75.36
-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0101	-0.0282	-74.77
-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0101	-0.0231	-66.05
-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0099	-0.0498	-111.37
-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0099	-0.0285	-74.86
-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0099	-0.0282	-74.27
-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0099	-0.0231	-65.56
-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0096	-0.0285	-74.06
-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0096	-0.0282	-73.47
-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0096	-0.0231	-64.76
-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0024	-0.0282	-54.70
-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0024	-0.0231	-45.98
-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0022	-0.0231	-45.60

4.7. ANÁLISIS ECONÓMICO

El análisis económico en el transporte de productos derivados a través de la red de poliductos en el Ecuador es fundamental para realizar el movimiento de producto obteniendo la mejor rentabilidad y optimizar los recursos a partir de calcular el volumen de mezcla entre dos productos que se desplazan consecutivamente.

La planificación y secuencia de los productos derivados del petróleo de acuerdo a la demanda nacional es de vital importancia para realizar un análisis económico para conocer la rentabilidad en el transporte de los productos a través de tubería.

La rentabilidad en el transporte de productos derivados del petróleo se expresa por el porcentaje volumétrico de mezcla generada por las condiciones de operación y las variables que inciden en el sistema de transporte constituido principalmente por tubería, bombas y accesorios.

El porcentaje de mezcla es el índice que representa la cantidad en dólares que se percibe o se pierde por cada producto que se transporta.

4.7.1. COSTO DEL PRODUCTO

Los productos generados en las refinerías estatales de petróleo sirven para satisfacer una parte de la demanda interna de combustible, puesto que la EP PETROECUADOR debe importar productos como: diesel, naftas y GLP a precio internacional para satisfacer la totalidad de la demanda.

El precio es un criterio central de la valoración, pues permite asegurar la coherencia entre el valor del equilibrio de la oferta, por otro lado, desde el punto de vista técnico lo que ocasiona que los derivados se valoren en momentos distintos de la producción.

En vista de que el diferencial de precios en la comercialización interna de derivados implica la concesión de un subsidio a los productos que está incluido en el precio básico; éste debe explicitarse para obtener el precio de productor; y,

además, debe añadirse los márgenes de comercio, transporte y el Impuesto al Valor Agregado (IVA), para establecer el precio de comprador.

El presente análisis económico se realiza con referencia al precio internacional.

Tabla 4.4.- Costo del Producto derivado del petróleo

PRODUCTO	COSTO (USD/Barriles)	COSTO (USD/m³)
GLP	89.2211	561.1828
Jet Fuel	158.9873	999.9983
Gasolina 87	121.8000	766.0976
Gasolina 92	158.9873	999.9983
Fuel Oil	91.3400	574.5103
Diesel 2	99.9800	628.8542
Diesel Premiun	139.1558	875.2622

Fuente.- <http://www.oil-price.net/?qclid=CKCor5r9n7cCFRJP7AodbCAAew>
<http://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=jet-fuel>

4.7.2. PORCENTAJE DE CONSUMO POR PRODUCTO

Tabla 4.5.- Porcentaje de participación de los Productos en el mercado nacional

PRODUCTO	Porcentaje Consumo de Derivados
Diesel Premiun	25.65%
Gasolina 87	21.99%
Gasolina 92	16.30%
Diesel 2	13.62%
GLP	13.04%
Jet Fuel	7.77%
Fuel Oil	1.62%

Fuente: Estadísticas Banco Central del Ecuador

Elaboración: AIHE

Tabla 4.6. Costo de la Mezcla de producto por unidad de volumen

BATCH	PORCENTAJE	COSTO POR	COSTO TOTAL
	PORCENTAJE DE MEZCLA	PORCENTAJE DE MEZCLA	POR DEMANDA
	%	USD/m ³	USD/m ³
GLP - Jet Fuel	0.4586%	3.580	0.372
GLP - Gasolina 87	0.4590%	3.046	0.533
GLP - Gasolina 92	0.4593%	3.585	0.526
GLP - Fuel Oil	0.4686%	2.661	0.195
GLP - Diesel 2	0.4691%	2.791	0.372
GLP - Diesel Premiun	0.4741%	3.405	0.659
Jet Fuel - Gasolina 87	0.4608%	4.069	0.606
Jet Fuel - Gasolina 92	0.4611%	4.611	0.555
Jet Fuel - Fuel Oil	0.4705%	3.704	0.174
Jet Fuel - Diesel 2	0.4709%	3.835	0.410
Jet Fuel - Diesel Premiun	0.4760%	4.463	0.746
Gasolina 87 - Gasolina 92	0.4614%	4.075	0.780
Gasolina 87 - Fuel Oil	0.4708%	3.156	0.373
Gasolina 87 - Diesel 2	0.4711%	3.286	0.585
Gasolina 87 - Diesel Premiun	0.4761%	3.908	0.931
Gasolina 92 - Fuel Oil	0.4712%	3.709	0.332
Gasolina 92 - Diesel 2	0.4715%	3.840	0.574
Gasolina 92 - Diesel Premiun	0.4765%	4.468	0.937
Fuel Oil - Diesel 2	0.4807%	2.892	0.220
Fuel Oil - Diesel Premiun	0.4861%	3.524	0.481
Diesel 2 - Diesel Premiun	0.4863%	3.658	0.718

Fuente.- Salinas, R.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El flujo estacionario de líquido en tuberías se justifica en la ecuación fundamental para el flujo de fluidos en tuberías, en el cual interviene el factor de fricción de acuerdo al impacto en el transporte de un fluido al operar dentro del régimen de flujo laminar o turbulento en el interior de la tubería.
- Las variables que influyen en el flujo del líquido a través de la tubería mediante la cual se registran las pérdidas según el método de cálculo aplicado en el presente, sirve para determinar la longitud de mezcla y se representa a través de la Hidráulica de la tubería a lo largo del poliducto, con un perfil irregular que transporta derivados del petróleo de forma estacionaria e isotérmica.
- Las bombas y su comportamiento son fundamentales para establecer las condiciones de operación del sistema de transporte de derivados al definir los puntos de operación, de caudal y de velocidad, para determinar la eficiencia del sistema.
- La cantidad de mezcla que se genera al transportar productos secuencialmente es una función de la longitud del poliducto, del factor de fricción del producto y el diámetro de la tubería, implícitamente de la rugosidad de la tubería, viscosidad del producto y la velocidad de transporte.
- Para realizar el análisis en el tamaño de la mezcla, se considera como constante el diámetro interno de la tubería con una misma rugosidad a lo largo de la tubería del poliducto.

- La longitud de mezcla del producto es directamente proporcional a la velocidad, por lo que a mayor velocidad, mayor es la longitud de mezcla que se genera durante la operación del sistema de bombeo, e influye directamente en la eficiencia en el transporte.
- La optimización desde el punto de vista hidráulico para una mezcla específica implica el diferencial de presión por influencia del diámetro del poliducto, impacto del perfil del terreno y la separación de la columna de líquido.
- La viscosidad es una de las características más importantes de los hidrocarburos en los aspectos operacionales de producción, transporte, refinación y petroquímica; pues indica la resistencia que opone el producto al flujo interno.
- Los modelos utilizados para simular el desempeño relacionado con la longitud de mezcla, se manifiestan como apropiados los resultados obtenidos analíticamente mismos que son coherentes con las variables que influyen en la operación de los poliductos.
- El modelo matemático permite tener o determinar escenarios que posibilitan la operación óptima del poliducto, generando valores de los parámetros más importantes que influyen en el sistema de transporte de los derivados.
- Operativamente la secuencia también depende de la demanda de los derivados, así como de las propiedades físico-químicas, determinadas por el Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN y/o las normas internacionales.
- El análisis económico influiría en la secuencia del transporte de los productos, pues en una combinación puede tener una longitud mayor que otra mezcla, pero el costo de cada mezcla definiría la secuencia para elegir la óptima.

- Desarrollar un plan de análisis hidrodinámico para todos los poliductos de nuestro país, para realizar un control que optimice las condiciones de operación y funcionamiento del sistema del transporte.
- Realizar un análisis económico que determine una secuencia en función de los costos, de la demanda de cada producto y el referido modelo matemático.

ANEXO 1

RED DE POLIDUCTOS EN EL ECUADOR



ANEXO 2

***DIAGRAMA RED INDUSTRIAL DE UNA
ESTACIÓN DE BOMBEO DEL
POLIDUCTO***

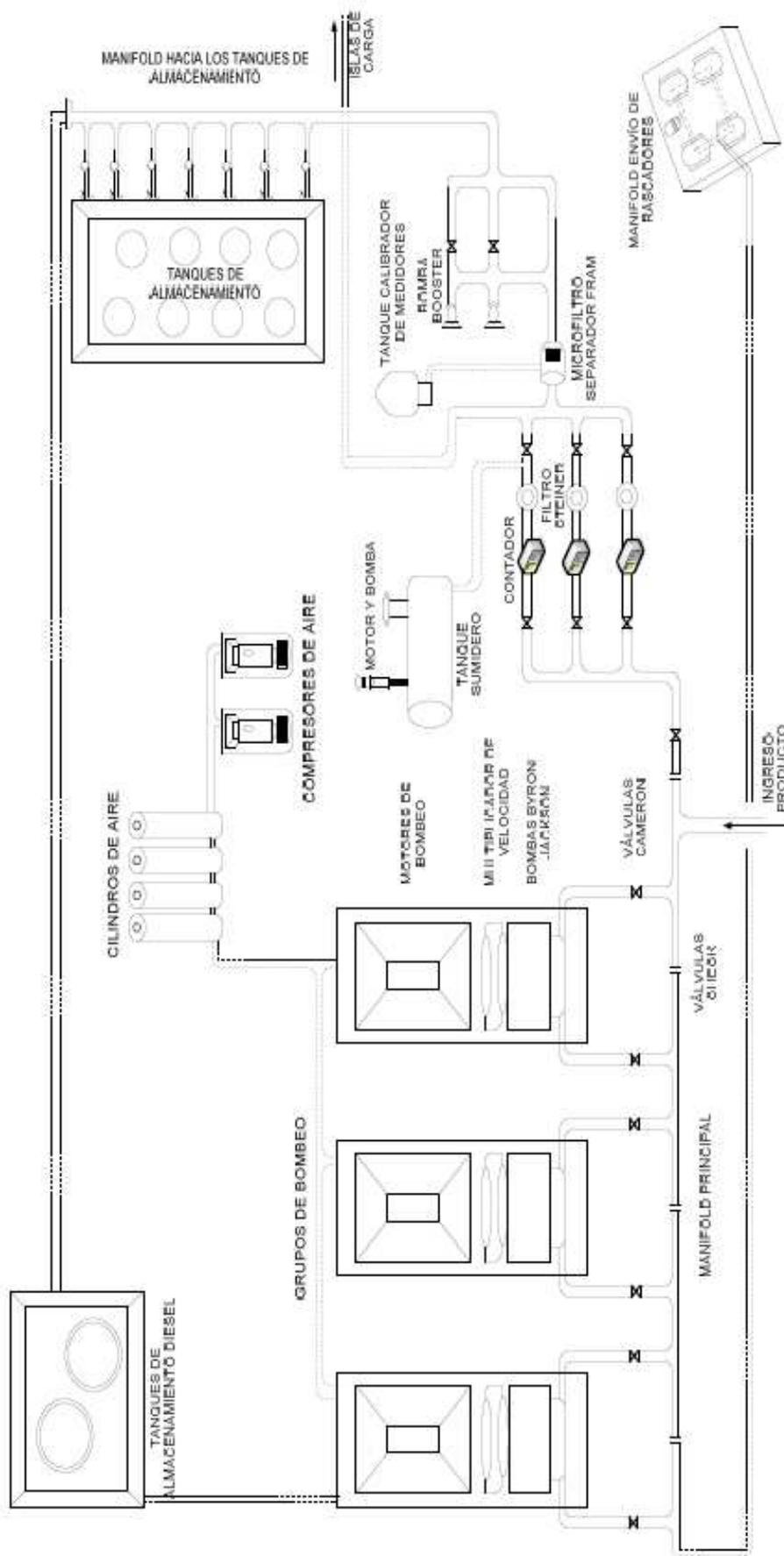


Diagrama red industrial de una estación de bombeo del poliducto

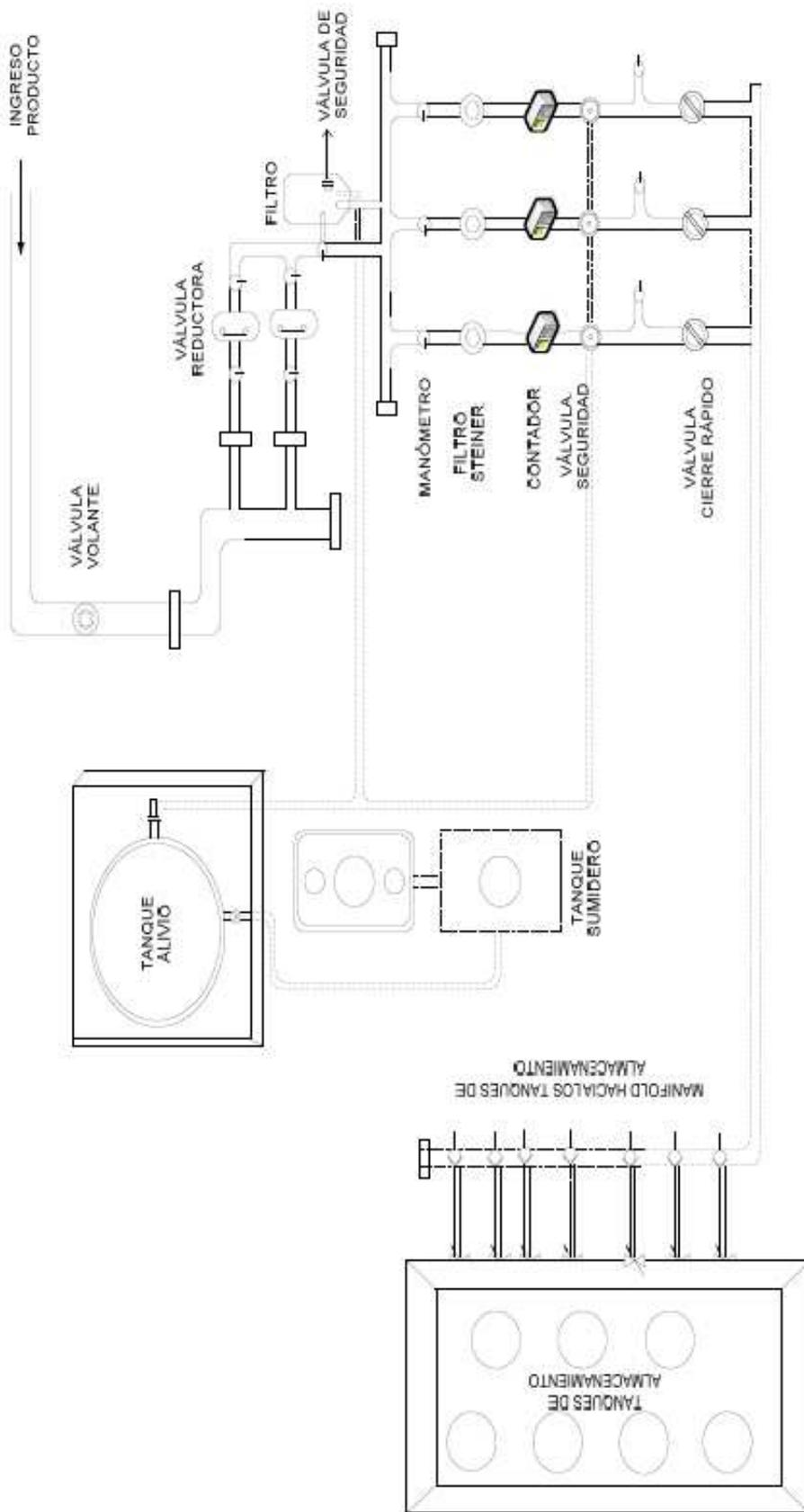


Diagrama red industrial de una estación reductora del poliducto

ANEXO 3

***EQUIPOS Y ACCESORIOS PARA
TRANSPORTAR PETRÓLEO Y
DERIVADOS***



Manifold Principal.



Juego de válvulas Check y Compuerta.



Bomba Booster.



Bomba Booster y Motor Eléctrico.



Microfiltro o Separador FRAM.



Tanque Calibrador de Medidores.



Motor de Combustión Interna



Multiplicador de Velocidad



Bomba Centrífuga Multietapa.



Tanques de Almacenamiento



Motor eléctrico y Compresor de Aire



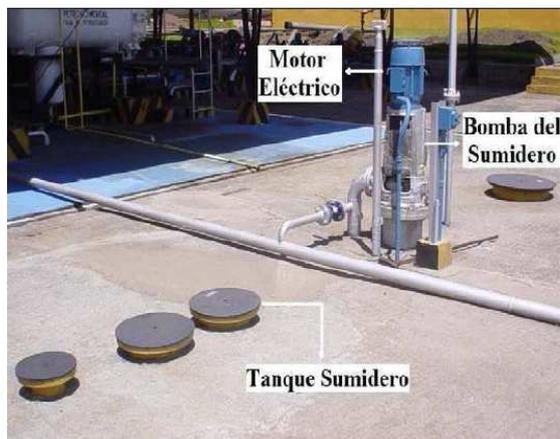
Sobrepesor



Manifold Secundario de Salida



Tablero de Control.



Tanque Sumidero



Manifold de envío de Rascadores.



Válvulas Reductoras de Presión



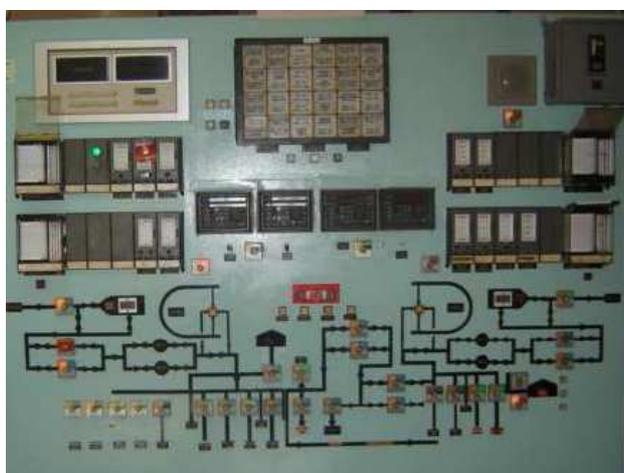
Filtros Steiner.



Contadores de Combustible.



Manifold hacia los tanques de almacenamiento.



Tablero de Control.

ANEXO 4

DATOS Y CURVA DE LA BOMBA

GOULDS PUMPS, INC.
ENGINEERED PRODUCTS DIVISION

PERFORMANCE TEST REPORT

CUSTOMER: ORPOGOIL SA			TEST TYPE: API 610 8th EDIT								
>	MODEL: 3600	IMP. DIA: 9.780									
ORDER > SERIAL NO.: E256c058	SIZE: 3X6-10/10	ORD. DIA: 9.780									
INFO. > QUANTITY: 1	MAT'L: ----	DWG. NO.: ----									
>	SEAL DESC: BURGMANN AQ1UMG	PATT. NO.: ----									
TEST > TEST LOCAT: VHMT-3	FLOW METER: 4*MAG	GAGE CORR.: 0 FT									
INFO. > TEST MOTOR: M-4	SUCT. GAGE: ABS11	SUCT. I.D.: 6.080 IN									
> ROTATION: CCW	DISCH. GAGE: 2000D3	DISCH. I.D.: 3.118 IN									
> RATED SPEED: 3560 RPM	TEST SPEED: 3560 RPM	Cust. Mtr:500 ,SF 1.15									
RATING > RATED FLOW: 350 GPM	TEST FLOW: 350 GPM	Cust. S.G.: 0.850									
INFO. > RATED HEAD: 3680FT	TEST HEAD: 3680FT										
> RATED EFF.: 61 %	ATM. PRESS.: 33.6 FT										
Remarks:	Test Mtr:1000 BHP @ 3573 rpm										
***** PERFORMANCE AT TEST SPEED AND SPEC. GRAVITY=1.0 *****											
PT NO	SUCT. HEAD (FT)	GAGE DIFF. (FT)	VEL. HEAD (FT)	DISCH. HEAD (FT)	TOTAL HEAD (FT)	DEFL. POINT	TORQUE READING	POWER (BHP)	SPEED (RPM)	EFF (%)	
1	-21.5	0.0	0.1	3974.8	3953.0		47.8	1602.34	294.83	3570.	16
2	-22.4	0.0	0.4	3975.0	3952.5		118.2	1822.47	344.76	3571.	34
3	-22.7	0.0	1.5	3886.0	3864.4		243.6	2234.60	438.18	3571.	54
4	-22.6	0.0	3.2	3735.5	3715.7		354.0	2605.47	522.18	3571.	63
5	-21.7	0.0	6.0	3416.9	3400.8		484.1	2965.38	603.87	3572.	68
6	-21.6	0.0	8.7	3106.9	3093.6		582.1	3156.97	647.13	3571.	70
7	-20.7	0.0	12.3	2623.2	2614.4		693.7	3306.00	680.84	3570.	67
AS-BUILT PERFORMANCE AT RATED SPEED=3560 RPM						***** AND SPEC. GRAV.=0.850 *****					
PT NO	CAPACITY (US GPM)	TOTAL HEAD (FT)	POWER (BHP)	EFF (%)	NOTES						
1	47.7	3930.0	249.27	16	TOTAL HD = SUCT. HEAD + GAGE DIP. + VEL. HEAD + DISCH. HEAD + GAGE CORR. EFF=(CAPxTOTAL HEADxSG)/(POWERx3960) * NEG SUC. HEAD IS BOOST, POS. IS LIFT						
2	117.8	3928.3	291.39	34							
3	242.9	3840.3	370.46	54							
4	352.9	3693.2	442.23	63							
5	482.6	3378.7	511.44	68							
6	580.3	3075.1	548.85	70							
7	691.7	2599.2	577.91	67	Goulds Serial No.: E256C058 Customer: Orpogoil SA Customer P.O. No.: 002-2006 Pump Item No.: 001 Service: Productos Limpios De Petroleo						
TEST DATE: 02-23-07											
APPROVED BY:					WITNESSED BY:						
<i>[Signature]</i>											

Form No.: TP6

Program Version 3.9.1

FINAL CERTIFIED

DOC. NO.: 256058 T-LOG
(ENGLISH UNITS)

GOULDS SERIAL NO:
E256C058

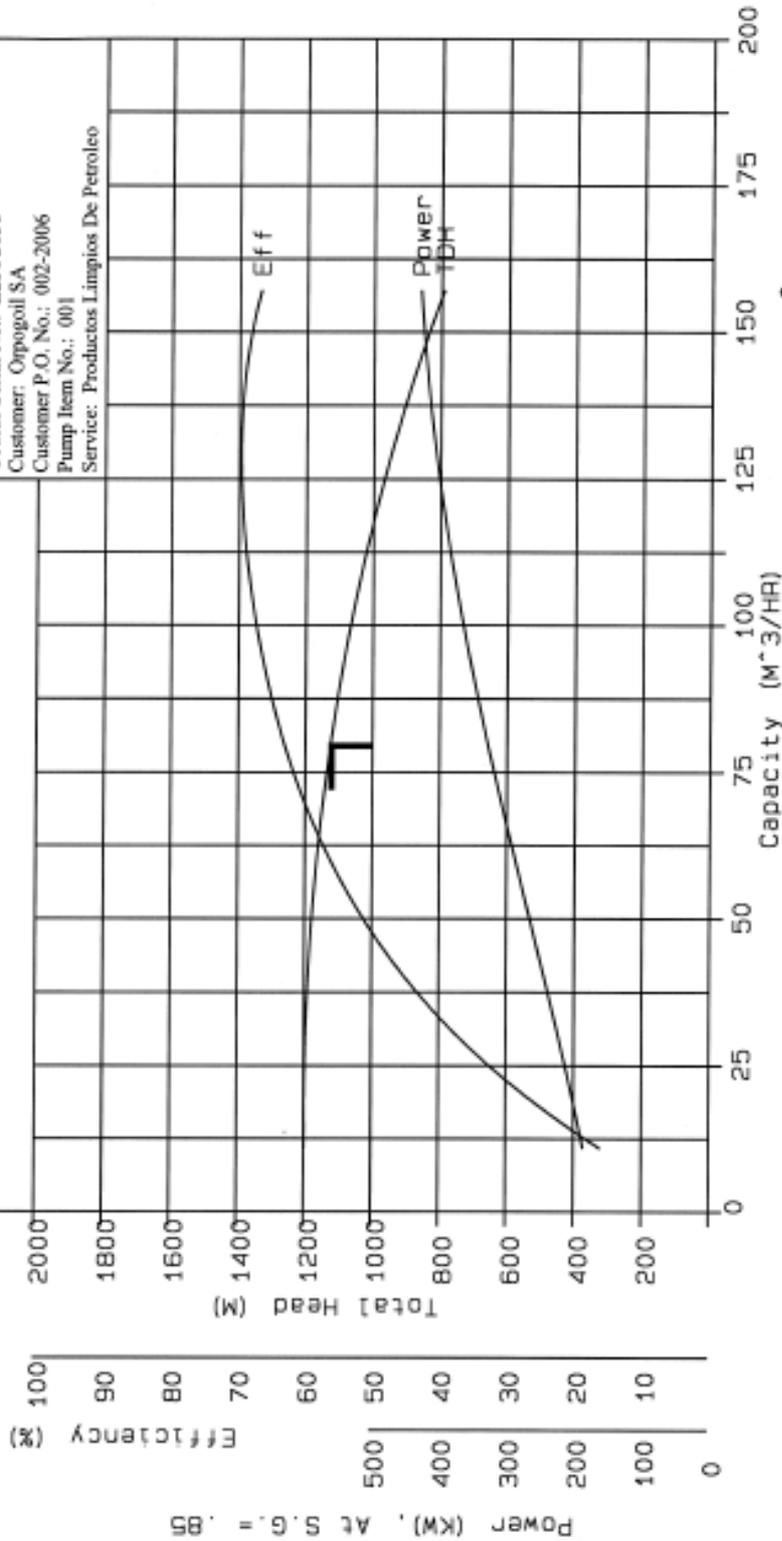
GOULDS PUMPS INC

MODEL: 3600
 SIZE: 3X6-10/10
 SPEED: 3560 RPM
 IMPELLER DIA: 9.780
 DRAWING NO: ----
 PATTERN NO: ----

TEST DATE: 02-23-07
 AS-BUILT PERFORMANCE CURVE

Engineered Products Div.
 Seneca Falls, N.Y. 13148

Goolds Serial No.: E256C058
 Customer: Orpogoil SA
 Customer P.O. No.: 002-2006
 Pump Item No.: 001
 Service: Productos Limpios De Petroleo



Certified Test Data
 By: [Signature]
 Date: 2/23/07

DOC. NO.: 256058 T-CRV
 (METRIC UNITS)

FINAL CERTIFIED

ANEXO 5

***CÓDIGO FUENTE DE LOS PROGRAMAS
PARA CALCULAR LA LONGITUD DE
MEZCLA***

A 4.1 PROGRAMA PARA CALCULAR DE LA LOGITUD DE MEZCLA

```

clear
clc
% NOMBRE: LONGITUDDEMEZCLA.m
% PROGRAMA PARA RESOLVER LA PIEZOMETRICA DE UN POLIDUCTO
% SE USA LA ECUACION:
% Hsistema=Ho+(f1*X0/D)*V^2/(2*g)+f2*((L-X0)/D)*V^2/(2*g)
% donde X0=V*t, t=tiempo
%
% DATOS DE POLIDUCTO
L=100000;
%L=109727.75;
Delta_L=10000; % corresponde a diferentes valores de X0
Num_tramos=L/Delta_L+1;
Delta_v=0.1;
V=0.1:Delta_v:2;
Ho=0;
%H límite
%Hfinal=1084.2;

%Caracteristica de la tubería
% Espesor
e=5.5626; %[mm]
e=e/1000;

% Diámetro interno de la tubería
D=0.2;

%Rugosidad
Rug=0.09; %[mm]: acero comercial y soldado entre 0.03 y 0.09 mm,
Rug=Rug/1000;

%Rugosidad Relativa
Rugrel=Rug/D;

%PROPIEDADES DE LOS LIQUIDOS - DERIVADOS DE PETRÓLEO

%Viscosidad Cinemática del Producto 1
VisCin1=6; %[cSt]
VisCin1=VisCin1*1e-6;

%Viscosidad Cinemática del Producto 2
VisCin2=0.8; %[cSt]
VisCin2=VisCin2*1e-6;

%Cálculo del Número de Reynolds
Re1=V*D/VisCin1;
Re2=V*D/VisCin2;

% Punto Final de la matriz de Reynolds para calcular término por término.
% Se utiliza un for-end para calcular el factor de fricción con la
ecuación
% de Colebrook
[p0,pf]=size(V);

```

```

%Cálculo del factor de Fricción - Ec. Colebrook
%1./(f.^0.5)=-0.86*ln(rugrel/3.7+2.51./(R.*(f.^0.5)))

%Factor de Fricción - Producto 1
for i=1:pf
    f1(1,i)=FactFricc(Rugrel,Rel(1,i));
end

%Factor de Fricción - Producto 2
for i=1:pf
    f2(1,i)=FactFricc(Rugrel,Re2(1,i));
end
%f1=0.01;
%f2=0.02;

% DATOS BOMBA
Q=[0.00300940236828 0.00743202513592 0.01532460870556 0.02226453030956
0.03044732878264 0.03661124097092 0.04363948884988];
Hb=[1197.864 1197.34584 1170.52344 1125.68736 1029.82776 937.29048
792.23616];
N0=3560;
N=3400;

%Relación de semejanza:      Q2=Q1*(N2/N1)
%                             H2=H1*(N2/N1)^2

% Ajuste de revoluciones - curva bombas
% N=1200
Qbomba=(N/N0)*Q;
Hbomba=((N/N0)^2)*Hb;

NumBombParal=1;
NumbBombSerie=1;

%Corrección de la bomba: ubicación en PARALELO
Qbomba=Qbomba*NumBombParal;

%Corrección de la bomba: ubicación en SERIE
Hbomba=Hbomba*NumbBombSerie;

%Ecuación de la Bomba
%[ConstBomb]=polyfit(Q,Hbomba,2);
%[ConstBomb]=polyfit(Qbomba,Hbomba,2);

% Cálculo de la Velocidad del flujo que pasa por la Bomba, para
% determinar
% la Ecuación.
Vb=Qbomba./(pi*D^2/4);

%La ecuación de la bomba:      Pbomba= A*Q^2+B*Q+C
%Coeficientes A,B y C caracterizan a la bomba.
% el coeficiente A, siempre es negativo
Pbomba=polyfit(Vb,Hbomba,2);
%

% Formulación de la CURVA DEL SISTEMA
% HSISTEMA=D*Q^2+E*Q+F

```

```

% Se formula matemáticamente la Ecuación del Sistema para cada instante
de
% tiempo t.
% HSISTEMA(t)=D*Q^2+E*Q+F

for i=1:Num_tramos
    X0=i*Delta_L;
    for k=1:20
        V(k)=k*Delta_v;
        %El factor de fricción varía de acuerdo a la longitud del
        %Poliducto
        Hsistema(1,k)=Ho+f1(k)*(X0)/D*V(k)^2/(2*9.81)+f2(k)*(L-
X0)/D*V(k)^2/(2*9.81);
    end
    hold on
    plot(V,Hsistema)

% CALCULO DEL PUNTO DE INTERSECCIÓN ENTRE LA CURVA DE LA BOMBA Y LA CURVA
% DEL SISTEMA EN EL TRANCURSO DEL TIEMPO t
% RESTO LA CURVA DE LA BOMBA DE LA CURVA DEL SISTEMA E IGUALO A CERO
% Pbomba - PHS = 0 ---> Punto de intersección = Punto de Operación
"Pop"
% (A-D)*Q^2+(B-E)*Q+(C-F)=0

    if i==1
        PHS0=polyfit(V,Hsistema,2);
        Pop=Pbomba-PHS0;
        Vop0=roots(Pop);
        %Vopr(1,1)=Vop0(2,1);
        if Vop0(1,1)>0
            Vopr(1,1)=Vop0(1,1);
        end
        if Vop0(2,1)>0
            Vopr(1,1)=Vop0(2,1);
        end
    end

    if i==2
        PHS1=polyfit(V,Hsistema,2);
        Pop=Pbomba-PHS1;
        Vop1=roots(Pop);
        %Vopr(1,2)=Vop1(2,1);
        if Vop1(1,1)>0
            Vopr(1,2)=Vop1(1,1);
        end
        if Vop1(2,1)>0
            Vopr(1,2)=Vop1(2,1);
        end
    end

    if i==3
        PHS2=polyfit(V,Hsistema,2);
        Pop=Pbomba-PHS2;
        Vop2=roots(Pop);
        %Vopr(1,3)=Vop2(2,1);
        if Vop2(1,1)>0
            Vopr(1,3)=Vop2(1,1);
        end
    end

```

```

        if Vop2(2,1)>0
            Vopr(1,3)=Vop2(2,1);
        end
    end
    if i==4
        PHS3=polyfit(V,Hsistema,2);
        Pop=Pbomba-PHS3;
        Vop3=roots(Pop);
        %Vopr(1,4)=Vop3(2,1);
        if Vop3(1,1)>0
            Vopr(1,4)=Vop3(1,1);
        end
        if Vop3(2,1)>0
            Vopr(1,4)=Vop3(2,1);
        end
    end

    if i==5
        PHS4=polyfit(V,Hsistema,2);
        Pop=Pbomba-PHS4;
        Vop4=roots(Pop);
        %Vopr(1,5)=Vop4(2,1);
        if Vop4(1,1)>0
            Vopr(1,5)=Vop4(1,1);
        end
        if Vop4(2,1)>0
            Vopr(1,5)=Vop4(2,1);
        end
    end

    if i==6
        PHS5=polyfit(V,Hsistema,2);
        Pop=Pbomba-PHS5;
        Vop5=roots(Pop);
        %Vopr(1,6)=Vop5(2,1);
        if Vop5(1,1)>0
            Vopr(1,6)=Vop5(1,1);
        end
        if Vop5(2,1)>0
            Vopr(1,6)=Vop5(2,1);
        end
    end

    if i==7
        PHS6=polyfit(V,Hsistema,2);
        Pop=Pbomba-PHS6;
        Vop6=roots(Pop);
        %Vopr(1,7)=Vop6(2,1);
        if Vop6(1,1)>0
            Vopr(1,7)=Vop6(1,1);
        end
        if Vop6(2,1)>0
            Vopr(1,7)=Vop6(2,1);
        end
    end

    if i==8
        PHS7=polyfit(V,Hsistema,2);
        Pop=Pbomba-PHS7;
    end

```

```

    Vop7=roots(Pop);
    %Vopr(1,8)=Vop7(2,1);
    if Vop7(1,1)>0
    Vopr(1,8)=Vop7(1,1);
    end
    if Vop7(2,1)>0
    Vopr(1,8)=Vop7(2,1);
    end
end

if i==9
    PHS8=polyfit(V,Hsistema,2);
    Pop=Pbomba-PHS8;
    Vop8=roots(Pop);
    %Vopr(1,9)=Vop8(2,1);
    if Vop8(1,1)>0
    Vopr(1,9)=Vop8(1,1);
    end
    if Vop8(2,1)>0
    Vopr(1,9)=Vop8(2,1);
    end
end

if i==10
    PHS9=polyfit(V,Hsistema,2);
    Pop=Pbomba-PHS9;
    Vop9=roots(Pop);
    if Vop9(1,1)>0
    Vopr(1,10)=Vop9(1,1);
    end
    if Vop9(2,1)>0
    Vopr(1,10)=Vop9(2,1);
    end
end

if i==11
    PHS10=polyfit(V,Hsistema,2);
    Pop=Pbomba-PHS10;
    Vop10=roots(Pop);
    if Vop10(1,1)>0
    Vopr(1,11)=Vop10(1,1);
    end
    if Vop10(2,1)>0
    Vopr(1,11)=Vop10(2,1);
    end
end

end

% Cálculo del Caudal en función de la velocidad de operación calculada
Qopr=Vopr.*(pi*D^2/4);
Hopr=polyval (Pbomba,Vopr);

% GRAFICA DE LA CURVA DE LA BOMBA
% Ecuación de la bomba en función de la velocidad
plot (V,polyval(Pbomba,V),'m')
grid minor
xlim([0 2])

```

```

% Polinomio característico del factor de fricción en función de la
Velocidad
% Evalúa la longitud de mezcla, de acuerdo a los puntos de
% intersección, entre la curva del sistema y la curva de la bomba
Pf1=polyfit (V,f1,10);
Pf2=polyfit (V,f2,10);

f1=polyval(Pf1,Vopr);
f2=polyval(Pf2,Vopr);

%=====
==
%=====
==
%CALCULO DE LA LONGITUD DE MEZCLA QUE SE PRODUCE EN EL TRANSPORTE DE
%PRODUCTOS DERIVADOS CON LA ECUACIÓN:
%LM=VM/(pi*D^2/4)
%Volumen de Mezcla
%VM=6.58*[(pi*D^2)/4]*(KLM*L/Vopr)^0.5
%Factor Longitudinal de Mezcla
%FLM=0.446.*Vopr.*D.*(f1.^0.25+f2.^0.25).^2
%LM=4.394.*(L*D).^0.5*(f1.^0.25+f2.^0.25)

% Cálculo del Factor Longitudinal de Mezcla entre dos productos
FLM=0.446.*Vopr.*D.*(f1.^0.25+f2.^0.25).^2;
if f1-f2==0
    FLM=0;
else
    FLM=0.446.*Vopr.*D.*(f1.^0.25+f2.^0.25).^2;
end

%FLM=0.446.*Vopr.*D.*(FC.*(f1.^0.25-f2.^0.25).^2)

% Cálculo del Volumen de Mezcla
VM=6.58*(pi*(D^2)/4).*(FLM*L./Vopr).^0.5;
VMmax=max (VM)
%Cálculo de la Longitud de Mezcla entre Producto P1 y Producto P2
LM=VM./(pi*D^2/4);
LMmax=max (LM)

Eficiencia=(L-LM)./L;

% LAS ECUACIONES DE VELOCIDAD, FACTOR DE FRICCIÓN Y TIEMPO EN FUNCIÓN DE
LA
% DISTANCIA X0
X0=[0:Delta_L:L];
PVopr=polyfit(X0,Vopr,1);

%Tiempo t
%t=X0./polyval (PVopr,X0)
t=X0./Vopr;

% Grafica de la Piezométrica del Producto 1
% PiezoM=H0-f1*L/D*V/(2*9.81)
% Altura del perfil de la tubería Zo=2910 del perfil
Zo=3200;

```

```

Hopr=Hopr+Zo;
PHopr=polyfit (X0,Hopr,1);

figure
hold on
grid minor
j=1;

%Gráfica inicial de la Piezométrica de cada producto
Piezom1=Hopr(1,j)-f1(1,j).*Vopr(1,j).*t/D.*Vopr(1,j)^2/(2*9.81);
Piezom2=Hopr(1,j)-f2(1,j).*Vopr(1,j).*t/D.*Vopr(1,j)^2/(2*9.81);
pz1=Piezom1;
pz2=Piezom2;

for j=1:Num_tramos
    Piezom1=Hopr(1,j)-f1(1,j).*Vopr(1,j).*t/D.*Vopr(1,j)^2/(2*9.81);
    Piezom2=Hopr(1,j)-f2(1,j).*Vopr(1,j).*t/D.*Vopr(1,j)^2/(2*9.81);
    Pp1=polyfit (X0,Piezom1,1);
    Pp2=polyfit (X0,Piezom2,1);
    VAR=polyval (Pp2,j*10000)-polyval (Pp1,j*10000);

    if j==1
        X1=[0:10000:Num_tramos*10000];
        Po=polyval (Pp1,X1);
        plot(X1,Po,'b')
        X2=[0:10000:j*10000];
        X1=[j*10000:10000:Num_tramos*10000];
        P1=polyval (Pp1,X1)+VAR;
        P2=polyval (Pp2,X2);
        plot(X2,P2,'g',X1,P1,'b')
    else
        X2=[0:10000:j*10000];
        X1=[j*10000:10000:Num_tramos*10000];
        P1=polyval (Pp1,X1)+VAR;
        P2=polyval (Pp2,X2);
        plot(X2,P2,'g',X1,P1,'b')
    end
end

end

Perfil_Poliducto=[2910 3010 3041 3059 3051 3039 3050 3083 3080 3048 2909
2822 2808 2813 2814 2820 2806 2799 2833 2854 2868 2903 2937 2963 2980
3007 3045 3073 3112 3132 3156 3250 3270 3432 3470 3554 3555 3508 3518
3514 3506 3466 3370 3330 3223 3165 3126 3099 3081 3059 3039 3042 3017
3005 2994 2989 2955 2945 2936 2925 2913 2898 2879 2872 2859 2853 2842
2829 2816 2805 2807 2799 2798 2781 2769 2756 2745 2737 2729 2728 2727
2717 2724 2710 2710 2687 2679 2622 2606 2757 2741 2724 2715 2701 2700
2694 2726 2718 2747 2775 2793 2754 2805 2758 2737 2674 2584 2580 2534
2479 2466 2528 2684 2698 2731];

Longitud_Poliducto=[0 913.01 1877.92 2867.21 3863.02 4958.24 5454.24
5935.98 6856.72 7807.88 9093.5 9551.72 10569.18 11637.3 12618.36 13613.28
14582.19 15571.32 16508.38 18035.19 18504.01 19527.72 20635.1 21628.29
22628.79 23654.6 24674.5 25672.24 26555.27 27654.07 28657.3 30456.81

```


A4.2 PROGRAMA PARA CALCULAR EL FACTOR DE FRICCIÓN

```
function f=FactFricc(rugrel,R)

fold=0.01;
%R=input('Reynolds=')

nitermax=200;
Deltaf=0.01;
for J=1:nitermax;
    Num=Fi(fold,rugrel,R);
    if Num <1E-4;break,end;

    fdelt=fold+Deltaf;

    Den=(Fi(fdelt,rugrel,R)-Fi(fold,rugrel,R))/Deltaf;

    fnew=fold-Num./Den;
    fold=fnew;
end
f=fold;
%if R <=2000; f=64./R; end;
```



```

L=100000;

% CALCULO DEL DELTA F, PARA CADA PRODUCTO
% 1/f^0.5=-0.86*Ln[Rug/(3.7*D)+2.51/(Re*f^0.5)]
% deltaf=df/dRugrel*deltaRugrel+df/dRe*deltaRe

% Re=V*D/VisCin
% deltaRe=dRe/dV*deltaV+dRe/dVisCin*deltaVisCin+dRe/dD*deltaD
% dRe/dV=D/VisCin
% dRe/dD=V/VisCin
% dRe/dVisCin=-D*V/VisCin^2
deltaRel=abs(D./VisCin1*deltaV-
D*V./VisCin1.^2*deltaVisCin1+V./VisCin1*deltaD);
deltaRe2=abs(D./VisCin2*deltaV-
D*V./VisCin2.^2*deltaVisCin2+V./VisCin2*deltaD);

% df/dRugrel=(f(Re1,Rugrel+deltaRugrel)-f(Re,Rugrel))/deltaRugrel
Rugrel_u=(Rug+deltaRug)/(D+deltaD);
deltaRugrel=Rugrel_u-Rugrel;
%Cálculo del Número de Reynolds
Re1=V*D./VisCin1;
Re2=V*D./VisCin2;

fu1=FactFricc(Rugrel_u,Re1);
df1_dRugrel=(fu1-f1)/deltaRugrel;

fu2=FactFricc(Rugrel_u,Re2);
df2_dRugrel=(fu2-f2)/deltaRugrel;

% df/dRe=(f(Re+deltaRe,Rugrel)-f(Re,Rugrel))/deltaRe

Reu1=Re1+deltaRel;
fu1=FactFricc(Rugrel,Reu1);
df1_dRe=(fu1-f1)/deltaRel;

Reu2=Re2+deltaRe2;
fu2=FactFricc(Rugrel,Reu2);
df2_dRe=(fu2-f2)/deltaRe2;

deltaf1=df1_dRugrel*deltaRugrel+df1_dRe*deltaRel;
deltaf2=df2_dRugrel*deltaRugrel+df2_dRe*deltaRe2;

dLM_f1=(2197*D^(1/2)*L^(1/2))/(2000*f1^(3/4));
dLM_f2=(2197*D^(1/2)*L^(1/2))/(2000*f2^(3/4));
dLM_L=(2197*D^(1/2)*(f1^(1/4)+f2^(1/4)))/(1000*L^(1/2));
dLM_D=(2197*L^(1/2)*(f1^(1/4)+f2^(1/4)))/(1000*D^(1/2));

deltaLM=dLM_f1*deltaf1+dLM_f2*deltaf2+dLM_L*deltaL+dLM_D*deltaD;

fprintf('\n\n\n\t\tDATOS INICIALES PARA DETERMINAR LA INCIDENCIA DE LAS
VARIABLES \n\t\t\t\t\t EN LA ECUACIÓN DE LONGITUD DE MEZCLA\n\n')
fprintf('Longitud \t Diámetro \t Velocidad \t\t Rugrel \t\t f1 \t\t
f2\n')

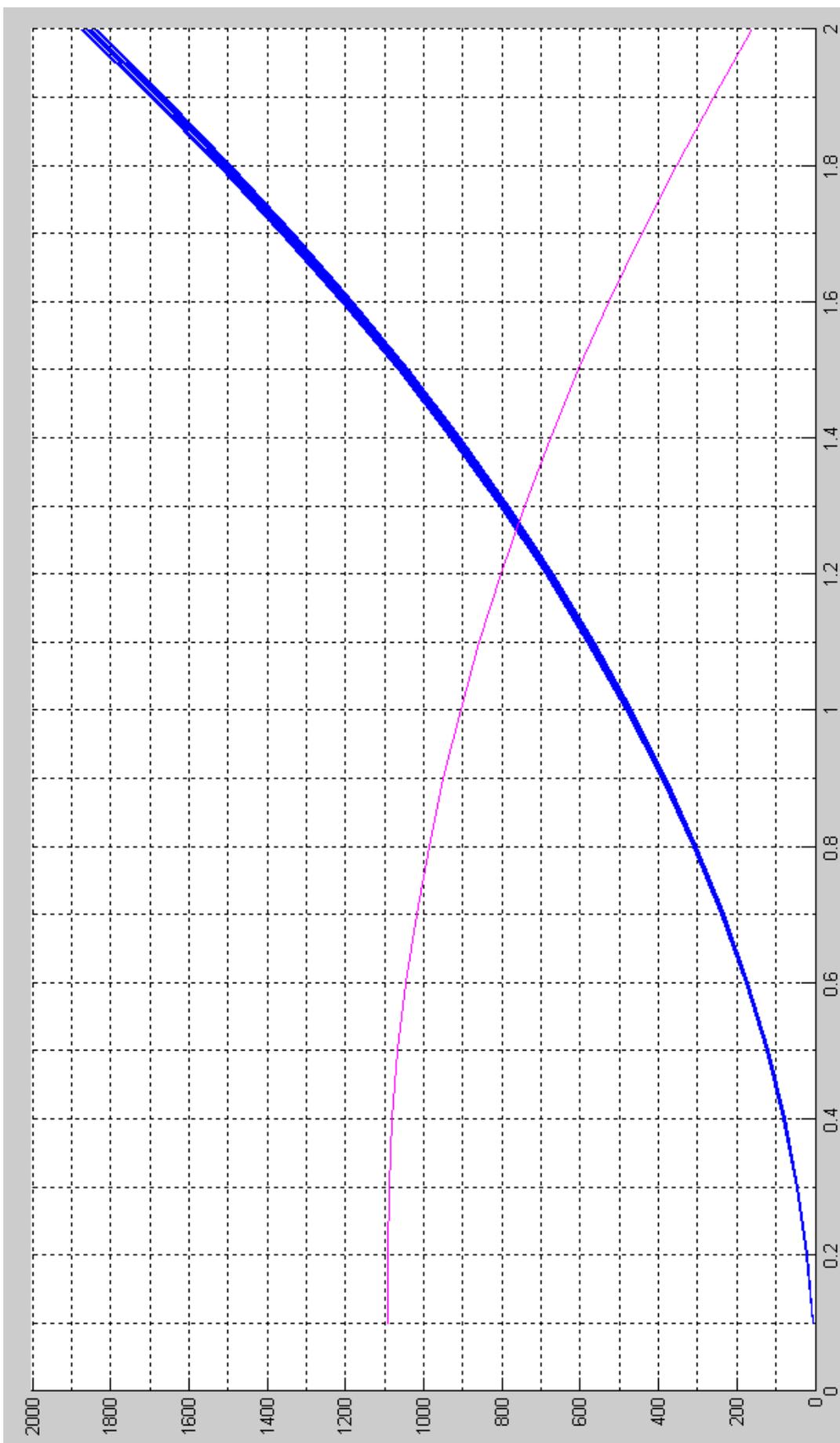
```

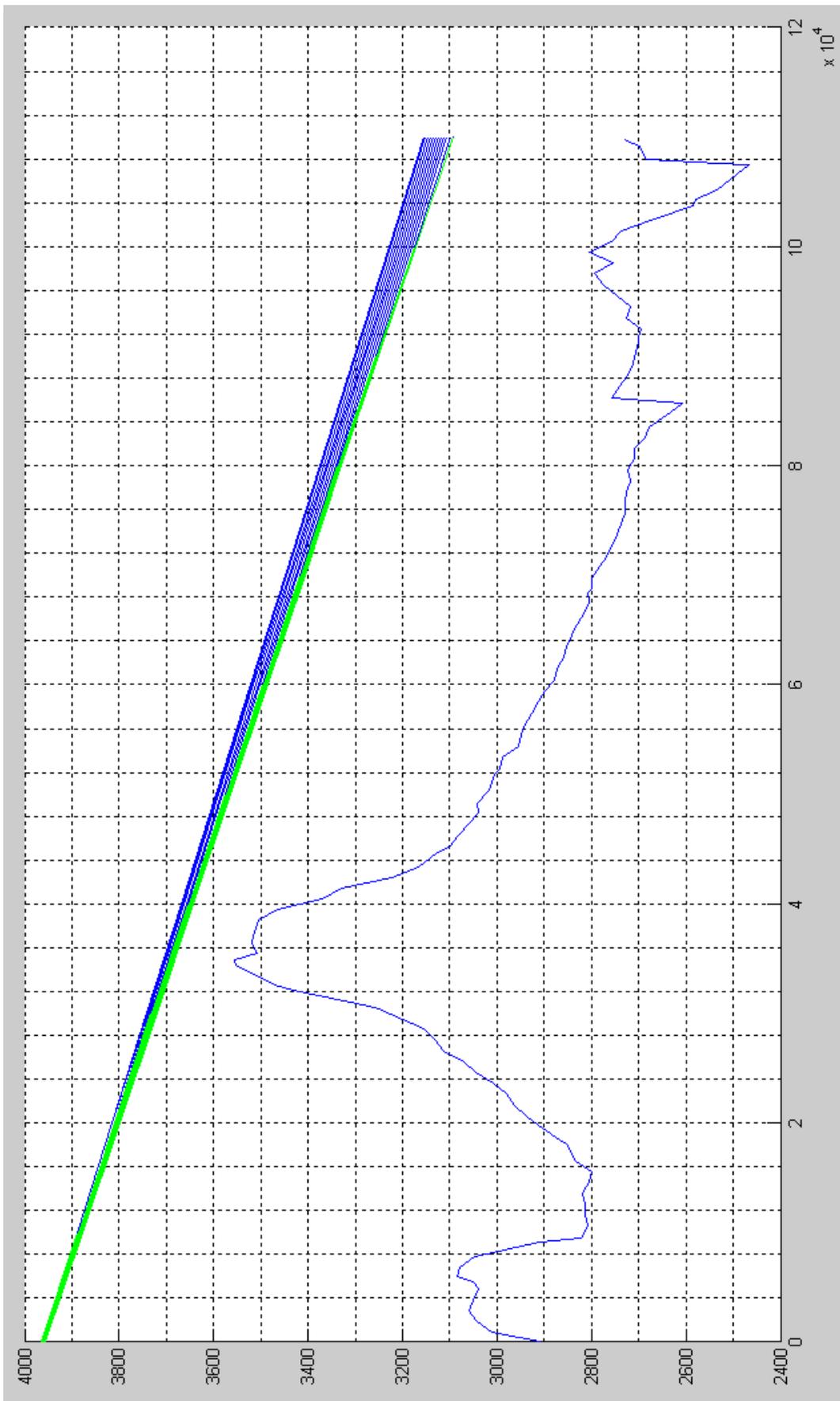

ANEXO 6

***RESULTADOS DEL BATCHEO POR
PRODUCTOS TRANSPORTADOS***

Gas Licuado de Petróleo - Jet Fuel

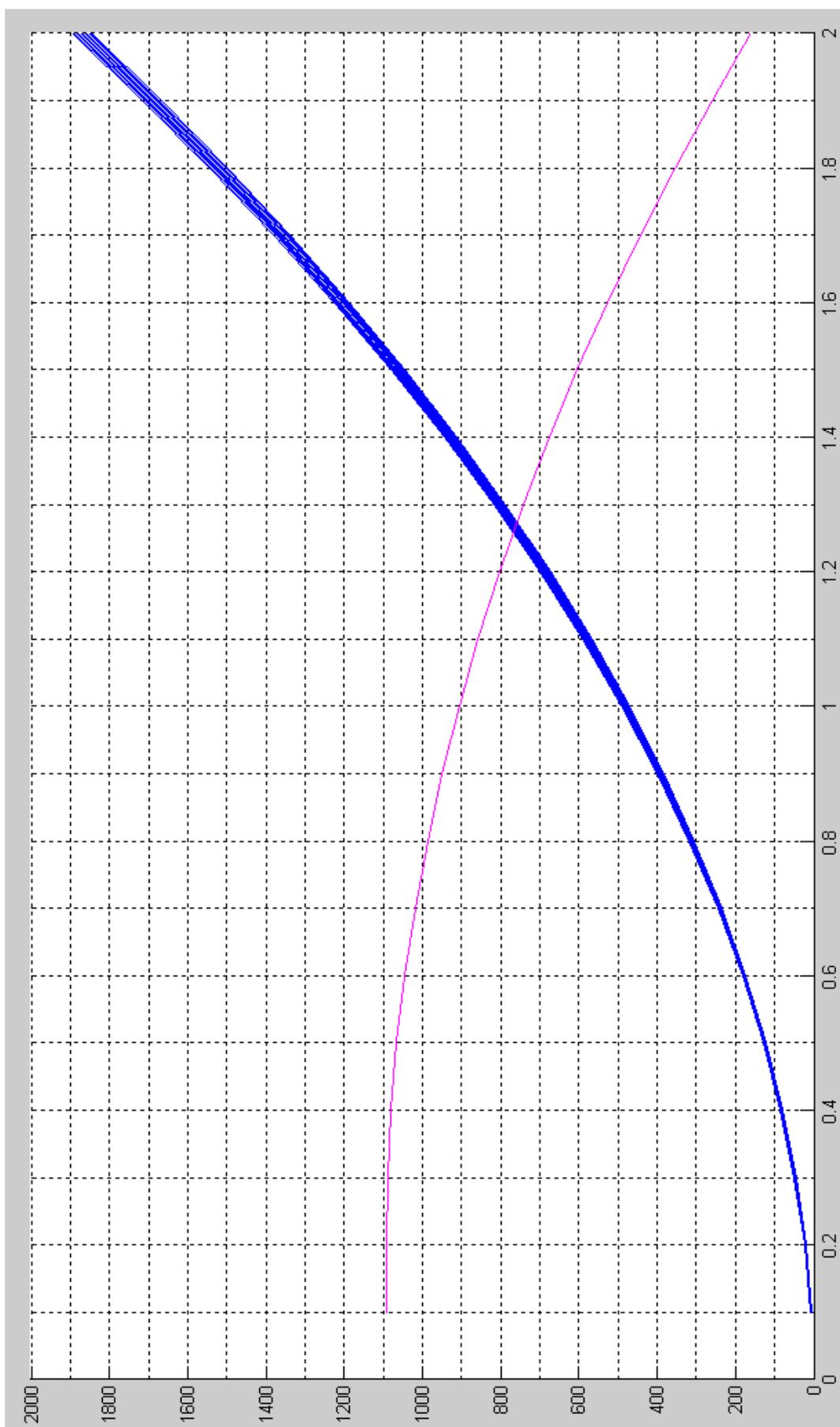
Posición	Tiempo s	Caudal m ³ /s	Piezométrica m	FLM	Volumen Mezcla m ³	Longitud Mezcla m	Eficiencia O/O
0	0.000	0.0397	3964.533	0.06143	14.4078	458.615	99.54139
1	2.194	0.0398	3963.735	0.06149	14.4077	458.611	99.54139
2	4.384	0.0398	3962.935	0.06156	14.4076	458.608	99.54139
3	6.570	0.0399	3962.133	0.06162	14.4075	458.604	99.54140
4	8.750	0.0399	3961.329	0.06168	14.4074	458.600	99.54140
5	10.927	0.0399	3960.522	0.06174	14.4072	458.597	99.54140
6	13.098	0.0400	3959.713	0.06181	14.4071	458.593	99.54141
7	15.266	0.0400	3958.902	0.06187	14.4070	458.590	99.54141
8	17.429	0.0401	3958.089	0.06193	14.4069	458.586	99.54141
9	19.587	0.0401	3957.273	0.06200	14.4068	458.583	99.54142
10	21.741	0.0401	3956.456	0.06206	14.4067	458.579	99.54142

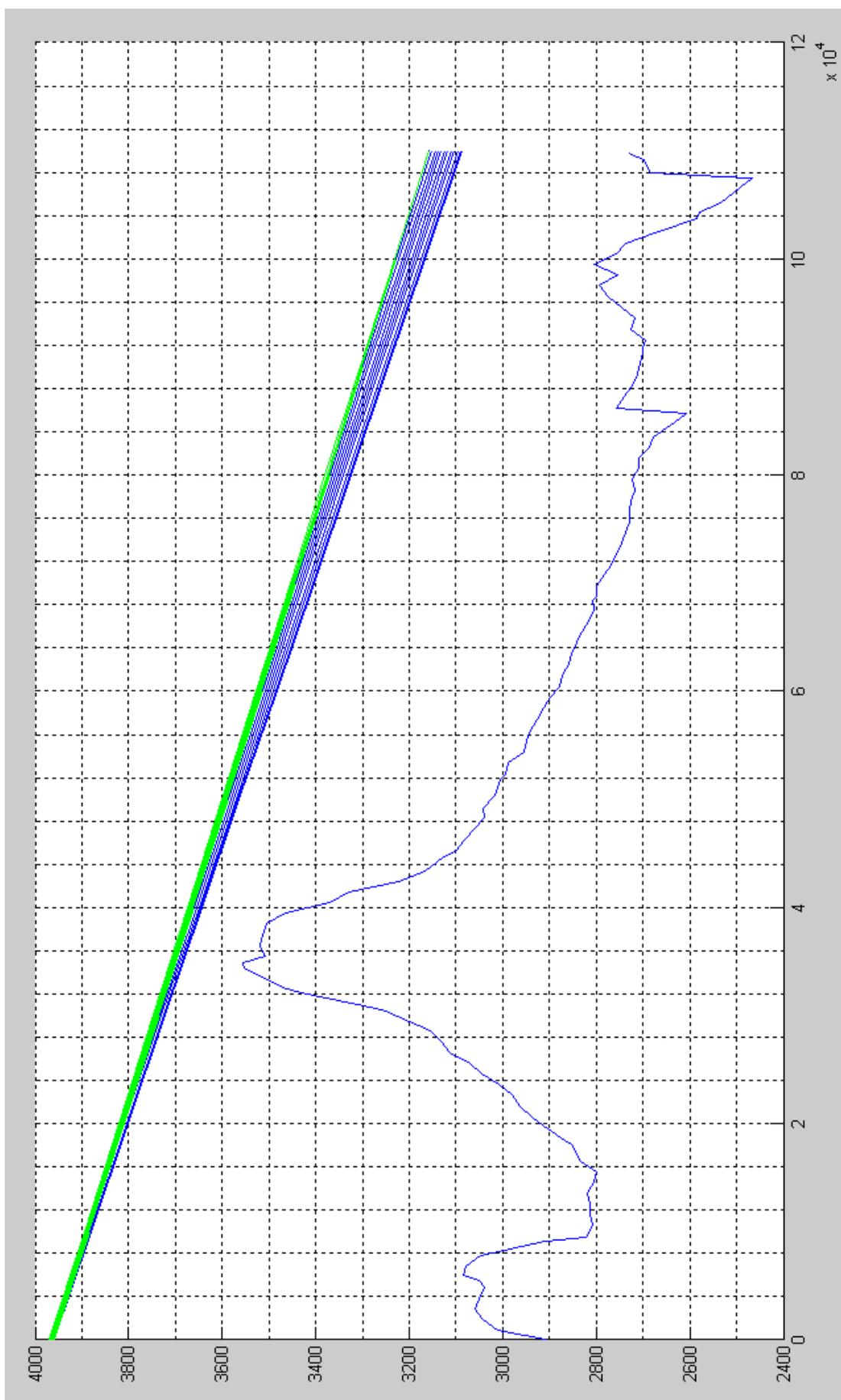




Gas Licuado de Petróleo - Gasolina 87

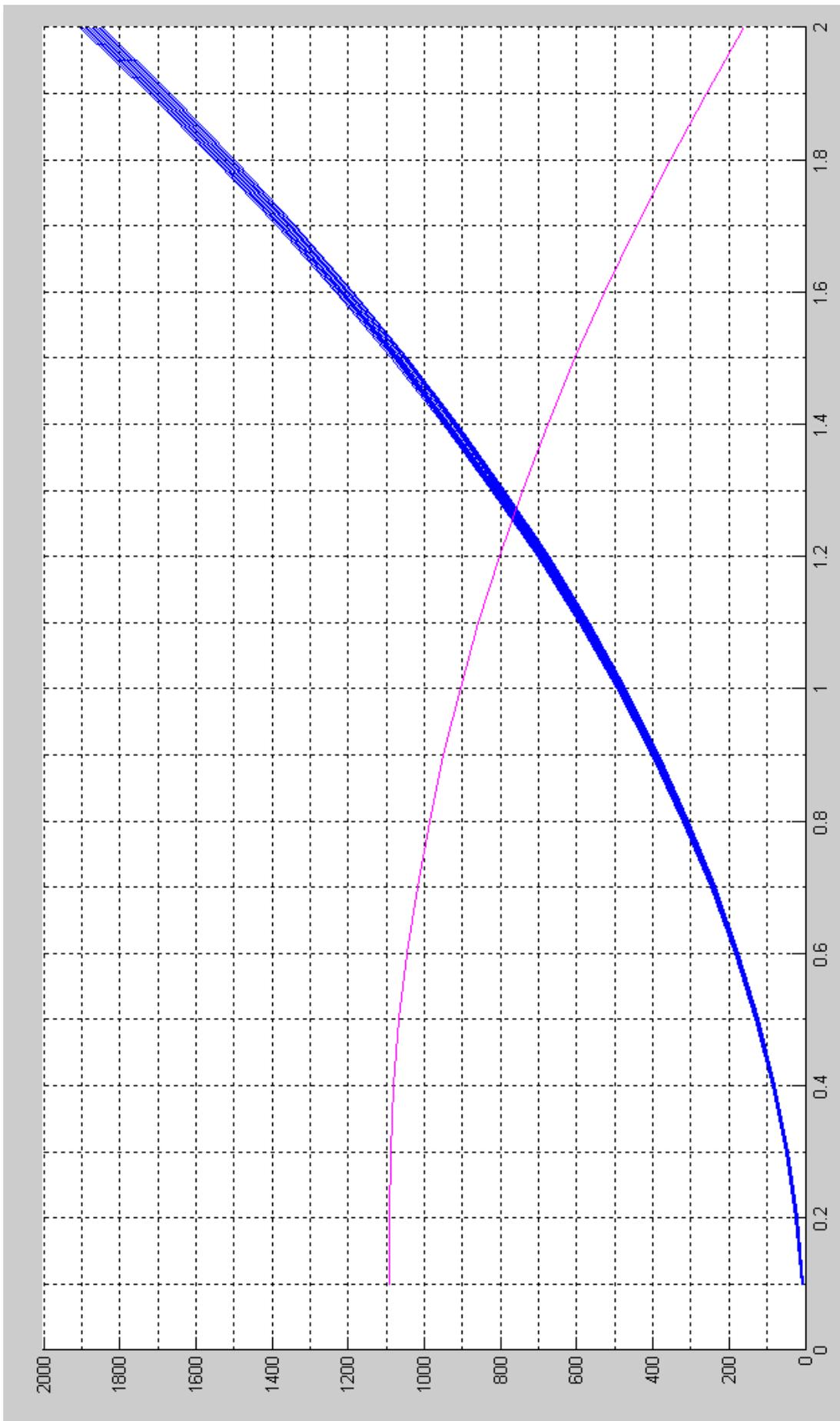
Posición	Tiempo s	Caudal m ³ /s	Piezométrica m	FLM	Volumen Mezcla m ³	Longitud Mezcla m	Eficiencia O/O
0	0.000	0.0400	3958.247	0.06201	14.4174	458.920	99.54108
1	2.182	0.0400	3959.218	0.06193	14.4175	458.925	99.54108
2	4.369	0.0399	3960.186	0.06186	14.4177	458.929	99.54107
3	6.561	0.0399	3961.150	0.06178	14.4178	458.934	99.54107
4	8.759	0.0399	3962.111	0.06171	14.4180	458.939	99.54106
5	10.962	0.0398	3963.069	0.06163	14.4181	458.943	99.54106
6	13.171	0.0398	3964.024	0.06156	14.4183	458.948	99.54105
7	15.385	0.0397	3964.975	0.06149	14.4184	458.953	99.54105
8	17.605	0.0397	3965.924	0.06141	14.4186	458.957	99.54104
9	19.830	0.0396	3966.869	0.06134	14.4187	458.962	99.54104
10	22.060	0.0396	3967.811	0.06126	14.4189	458.967	99.54103

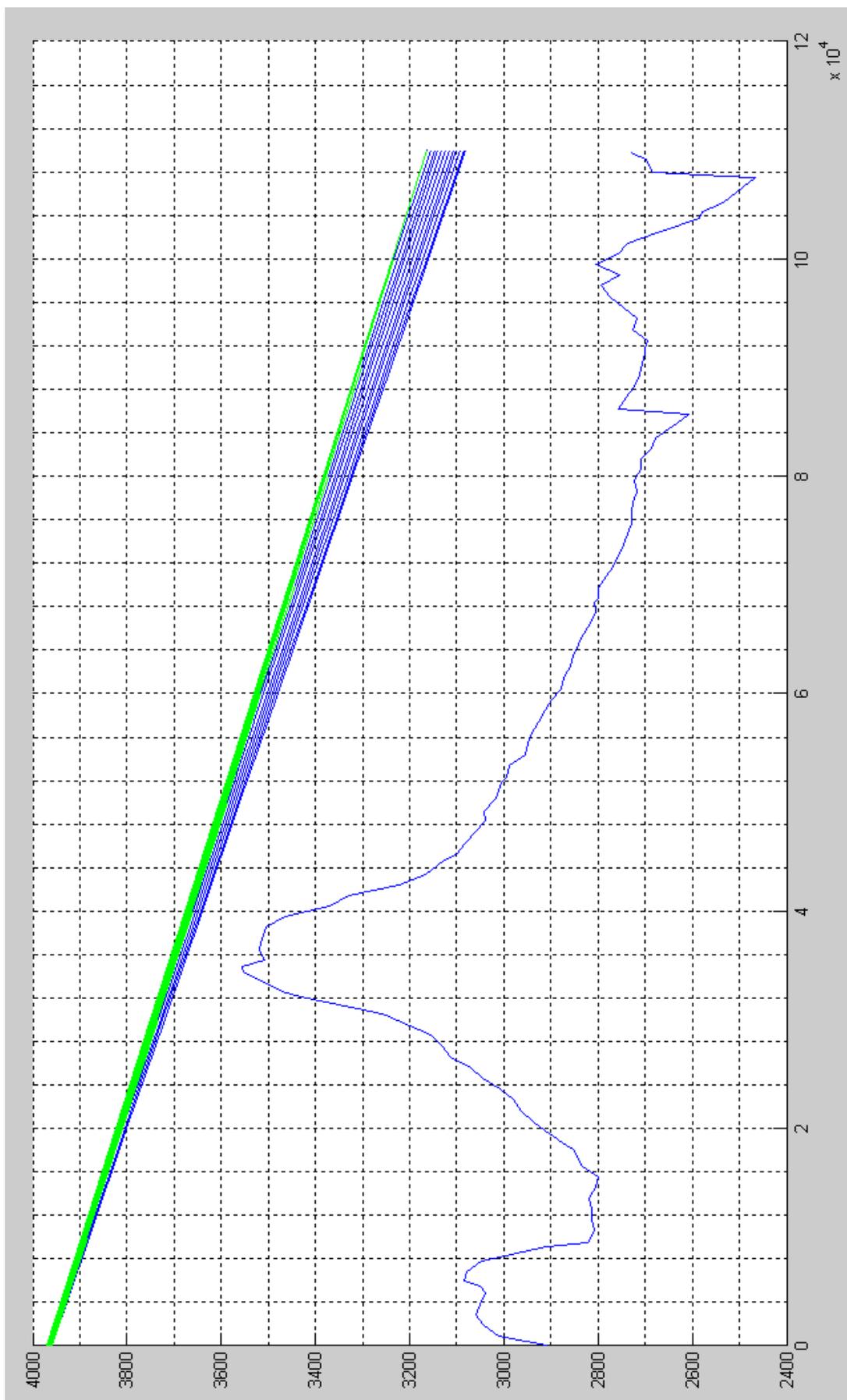




Gas Licuado de Petróleo - Gasolina 92

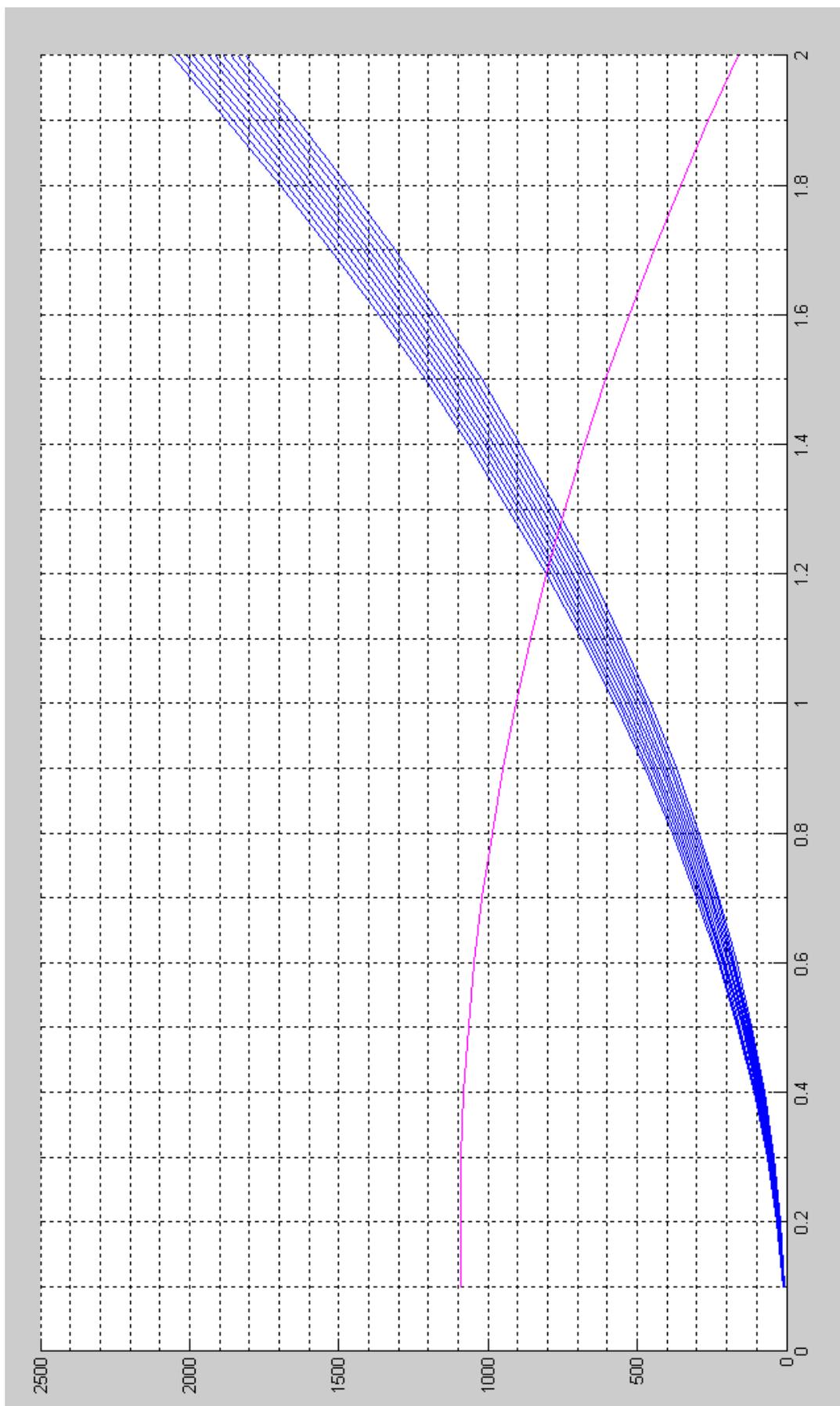
Posición	Tiempo s	Caudal m ³ /s	Piezométrica m	FLM	Volumen Mezcla m ³	Longitud Mezcla m	Eficiencia 0/0
0	0.000	0.0400	3958.399	0.06208	14.4274	459.237	99.54076
1	2.183	0.0400	3959.521	0.06200	14.4275	459.243	99.54076
2	4.371	0.0399	3960.638	0.06191	14.4277	459.249	99.54075
3	6.566	0.0399	3961.751	0.06182	14.4279	459.255	99.54074
4	8.768	0.0398	3962.860	0.06174	14.4281	459.261	99.54074
5	10.975	0.0398	3963.964	0.06165	14.4283	459.267	99.54073
6	13.189	0.0397	3965.064	0.06156	14.4285	459.273	99.54073
7	15.409	0.0396	3966.160	0.06148	14.4287	459.279	99.54072
8	17.635	0.0396	3967.252	0.06139	14.4289	459.285	99.54071
9	19.868	0.0395	3968.339	0.06131	14.4291	459.291	99.54071
10	22.107	0.0395	3969.423	0.06122	14.4292	459.297	99.54070

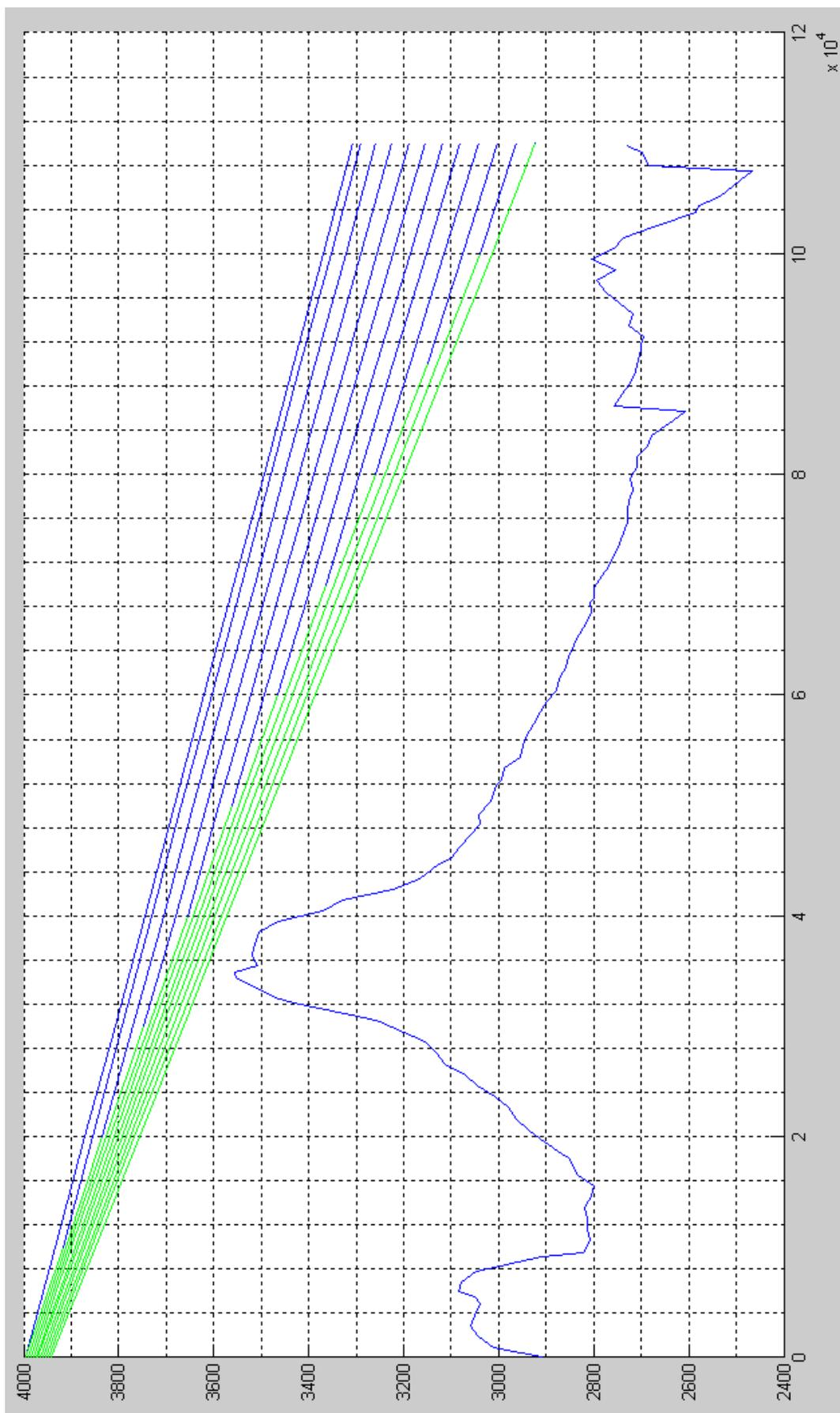




Gas Licuado de Petróleo - Fuel Oil

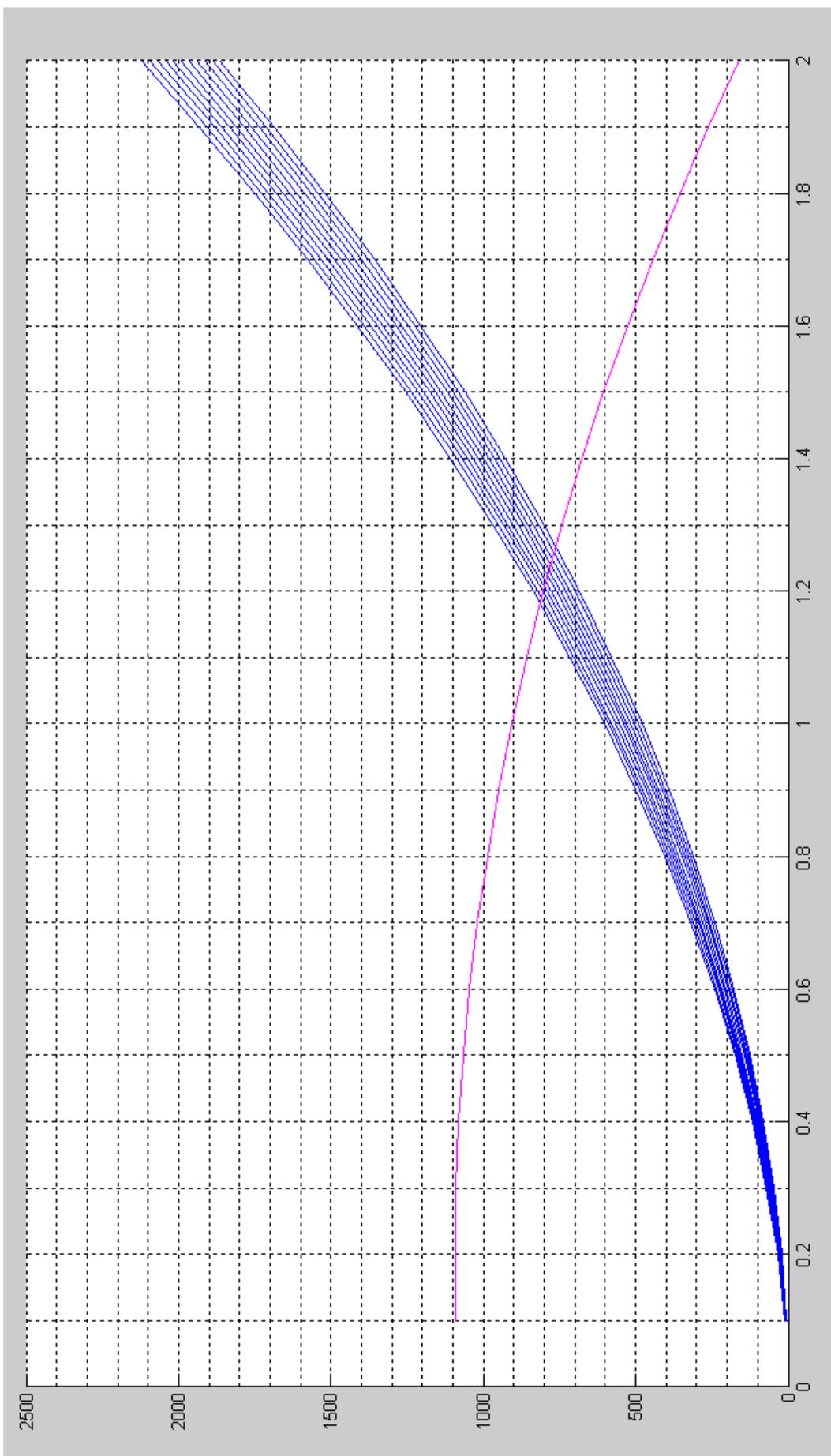
Posición	Tiempo s	Caudal m ³ /s	Piezométrica m	FLM	Volumen Mezcla m ³	Longitud Mezcla m	Eficiencia 0/0
0	0.000	0.0377	4002.469	0.06089	14.7214	468.596	99.53140
1	2.298	0.0380	3997.765	0.06128	14.7188	468.515	99.53148
2	4.565	0.0382	3992.983	0.06168	14.7163	468.435	99.53157
3	6.801	0.0385	3988.124	0.06208	14.7138	468.355	99.53165
4	9.007	0.0388	3983.185	0.06248	14.7113	468.275	99.53172
5	11.182	0.0390	3978.167	0.06288	14.7088	468.196	99.53180
6	13.328	0.0393	3973.068	0.06329	14.7063	468.117	99.53188
7	15.444	0.0396	3967.886	0.06370	14.7039	468.039	99.53196
8	17.530	0.0398	3962.622	0.06412	14.7014	467.961	99.53204
9	19.587	0.0401	3957.273	0.06454	14.6990	467.882	99.53212
10	21.615	0.0404	3951.840	0.06496	14.6965	467.804	99.53220





Gas Licuado de Petróleo - Diesel 2

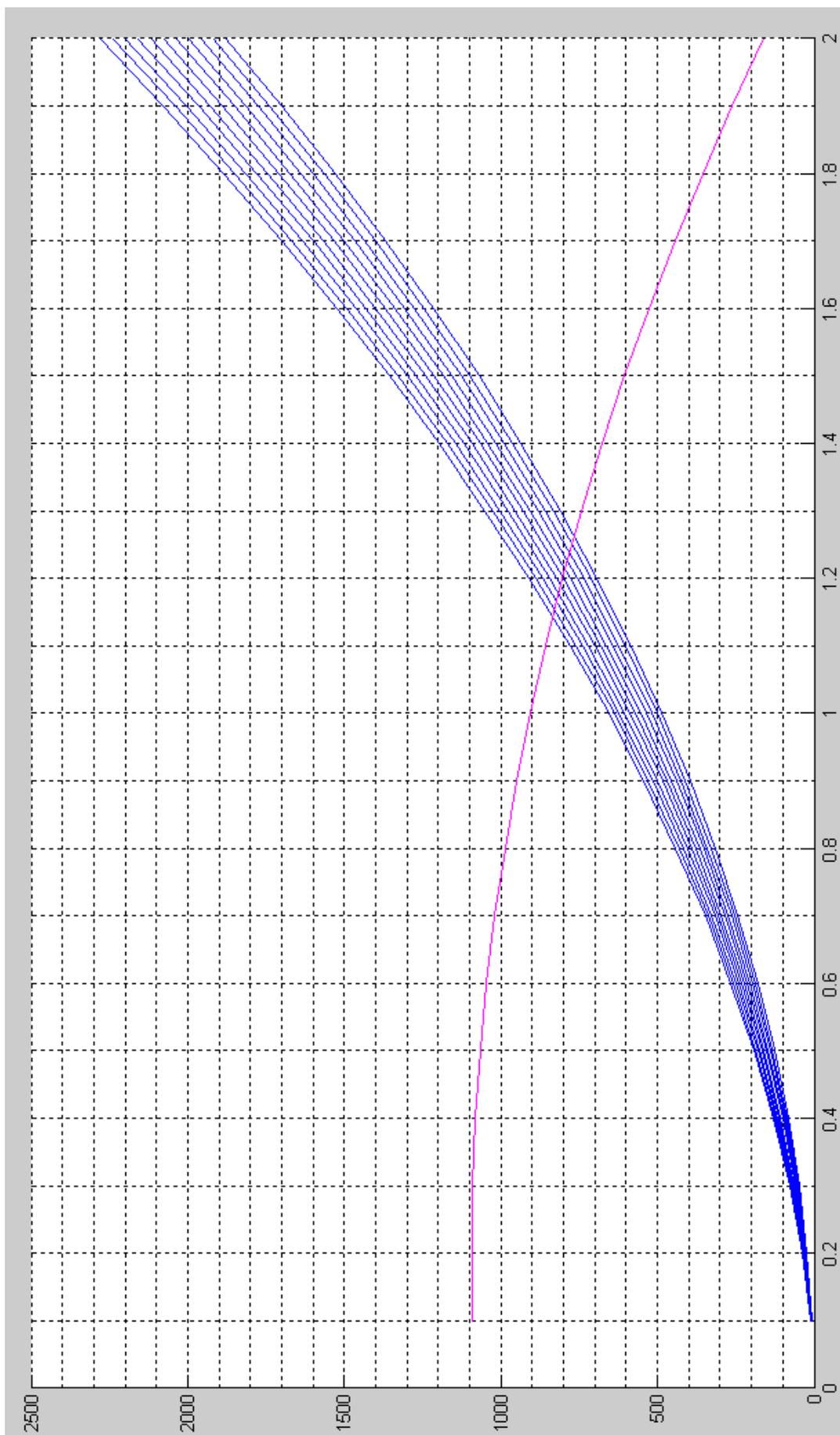
Posición	Tiempo s	Caudal m ³ /s	Piezométrica m	FLM	Volumen Mezcla m ³	Longitud Mezcla m	Eficiencia O/O
0	0.000	0.0398	3962.760	0.06418	14.7099	468.231	99.53177
1	2.207	0.0395	3968.156	0.06376	14.7125	468.312	99.53169
2	4.445	0.0393	3973.465	0.06333	14.7150	468.393	99.53161
3	6.714	0.0390	3978.687	0.06291	14.7176	468.474	99.53153
4	9.015	0.0387	3983.823	0.06250	14.7201	468.556	99.53144
5	11.347	0.0385	3988.874	0.06209	14.7227	468.638	99.53136
6	13.711	0.0382	3993.841	0.06168	14.7253	468.721	99.53128
7	16.108	0.0379	3998.727	0.06127	14.7279	468.803	99.53120
8	18.537	0.0377	4003.531	0.06087	14.7305	468.887	99.53111
9	20.999	0.0374	4008.255	0.06048	14.7331	468.970	99.53103
10	23.494	0.0371	4012.900	0.06008	14.7358	469.055	99.53095





Gas Licuado de Petróleo - Diesel Premium

Posición	Tiempo s	Caudal m ³ /s	Piezométrica m	FLM	Volumen Mezcla m ³	Longitud Mezcla m	Eficiencia O/O
0	0.000	0.0397	3965.169	0.06525	14.8552	472.855	99.52715
1	2.221	0.0393	3972.858	0.06463	14.8591	472.981	99.52702
2	4.486	0.0389	3980.346	0.06402	14.8631	473.108	99.52689
3	6.797	0.0385	3987.638	0.06342	14.8671	473.235	99.52677
4	9.153	0.0381	3994.740	0.06283	14.8711	473.362	99.52664
5	11.554	0.0378	4001.656	0.06224	14.8752	473.491	99.52651
6	14.002	0.0374	4008.391	0.06167	14.8792	473.620	99.52638
7	16.496	0.0370	4014.951	0.06110	14.8833	473.751	99.52625
8	19.037	0.0367	4021.339	0.06054	14.8874	473.882	99.52612
9	21.625	0.0363	4027.561	0.05999	14.8916	474.014	99.52599
10	24.261	0.0360	4033.621	0.05945	14.8958	474.147	99.52585

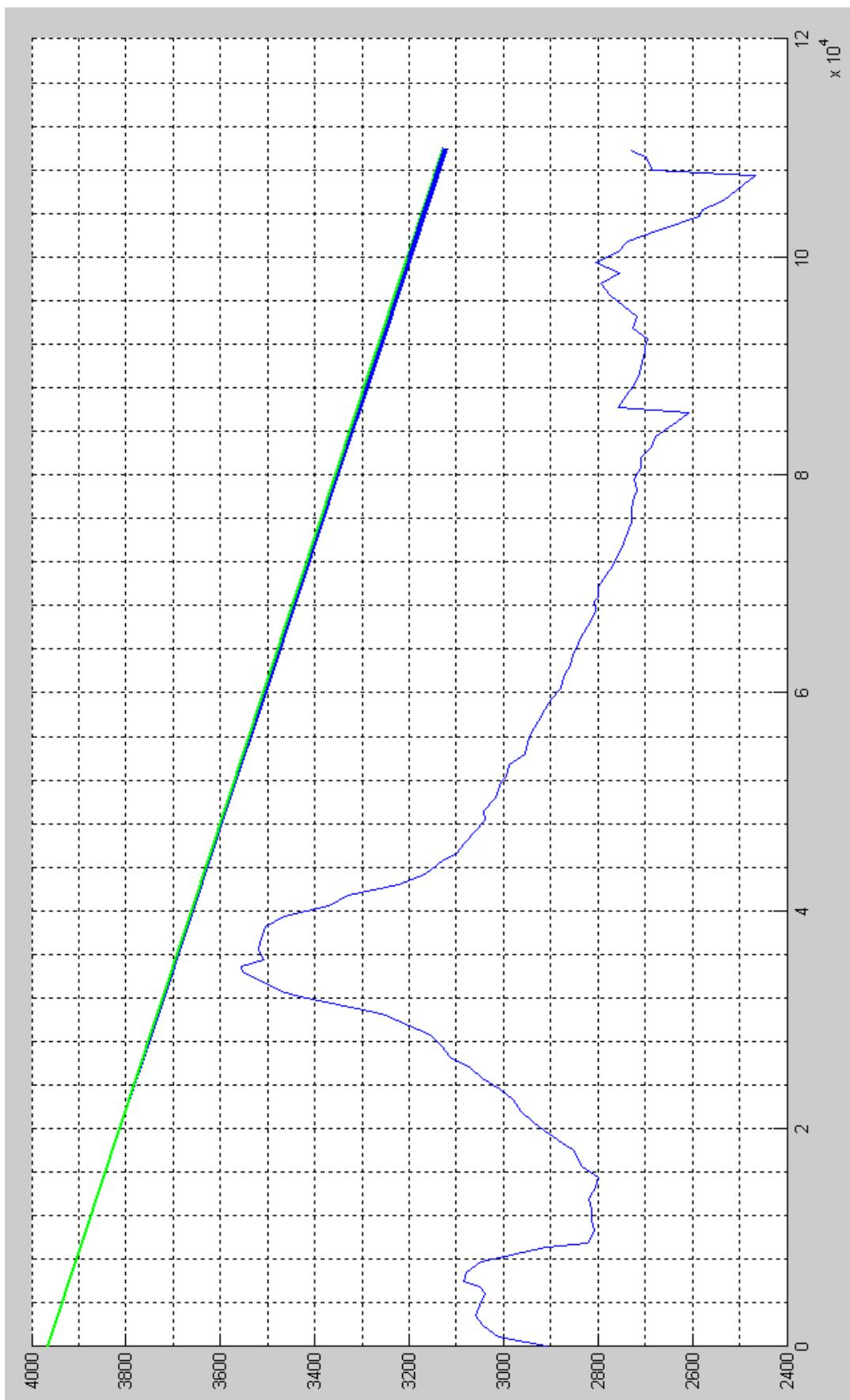




Jet Fuel – Gasolina 87

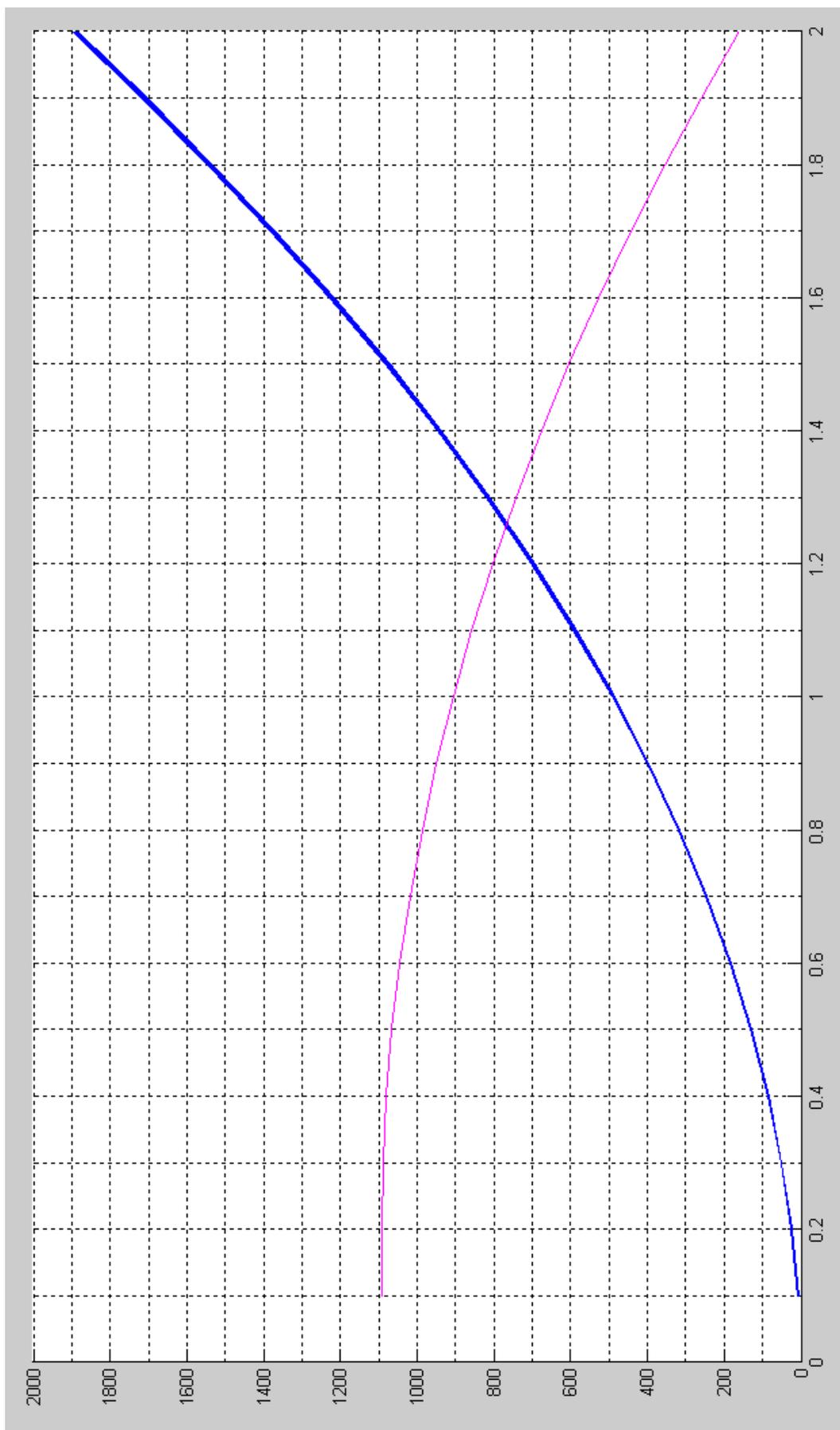
Posición	Tiempo s	Caudal m ³ /s	Piezométrica m	FLM	Volumen Mezcla m ³	Longitud Mezcla m	Eficiencia 0/0
0	0.000	0.0397	3965.483	0.06193	14.4752	460.759	99.53924
1	2.200	0.0397	3965.637	0.06192	14.4752	460.760	99.53924
2	4.400	0.0397	3965.791	0.06191	14.4752	460.761	99.53924
3	6.602	0.0397	3965.946	0.06189	14.4753	460.762	99.53924
4	8.804	0.0396	3966.100	0.06188	14.4753	460.762	99.53924
5	11.008	0.0396	3966.254	0.06187	14.4753	460.763	99.53924
6	13.212	0.0396	3966.408	0.06186	14.4753	460.764	99.53924
7	15.417	0.0396	3966.562	0.06185	14.4754	460.765	99.53923
8	17.623	0.0396	3966.715	0.06183	14.4754	460.766	99.53923
9	19.830	0.0396	3966.869	0.06182	14.4754	460.767	99.53923
10	22.037	0.0396	3967.023	0.06181	14.4755	460.768	99.53923

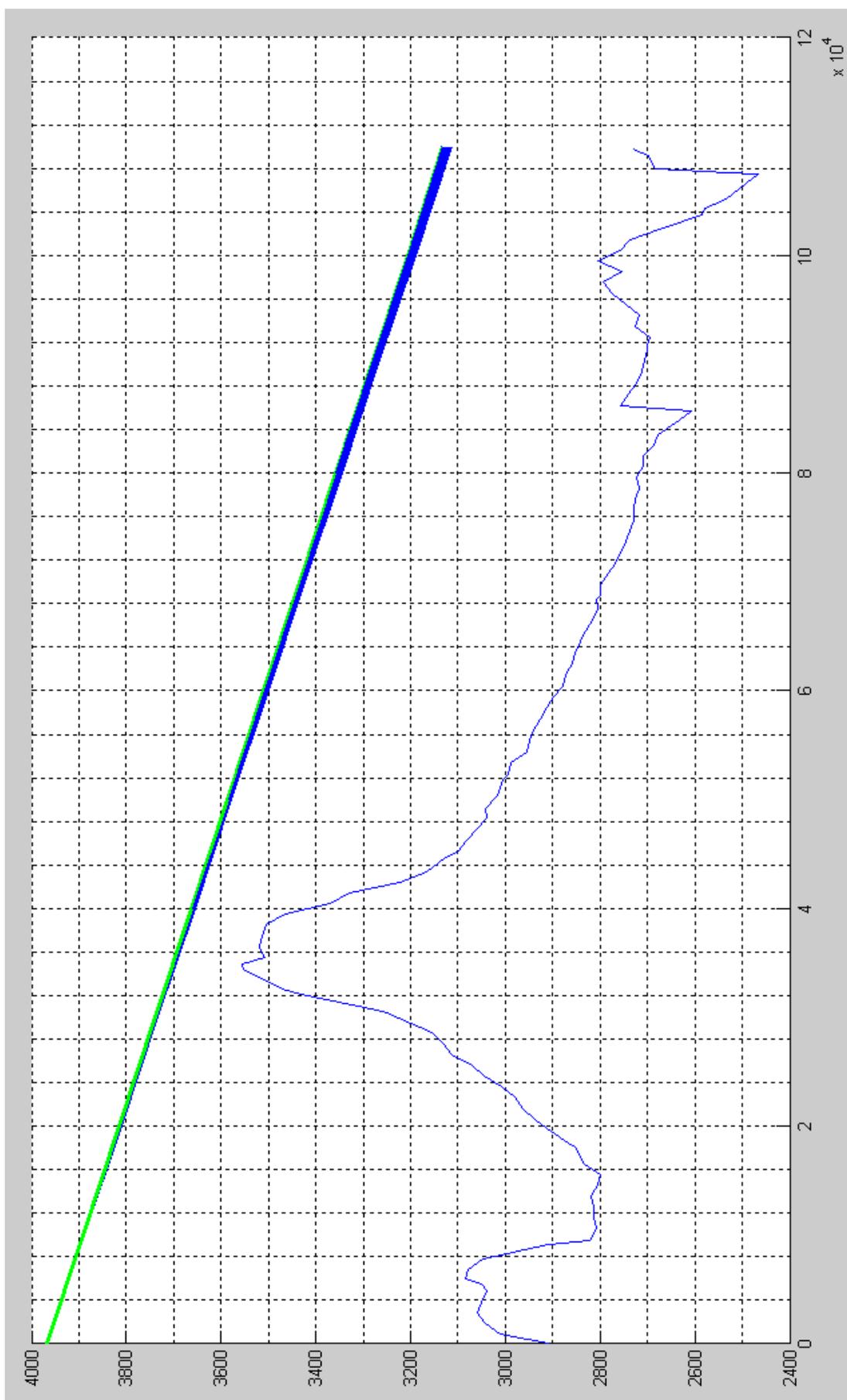




Jet Fuel –Gasolina 92

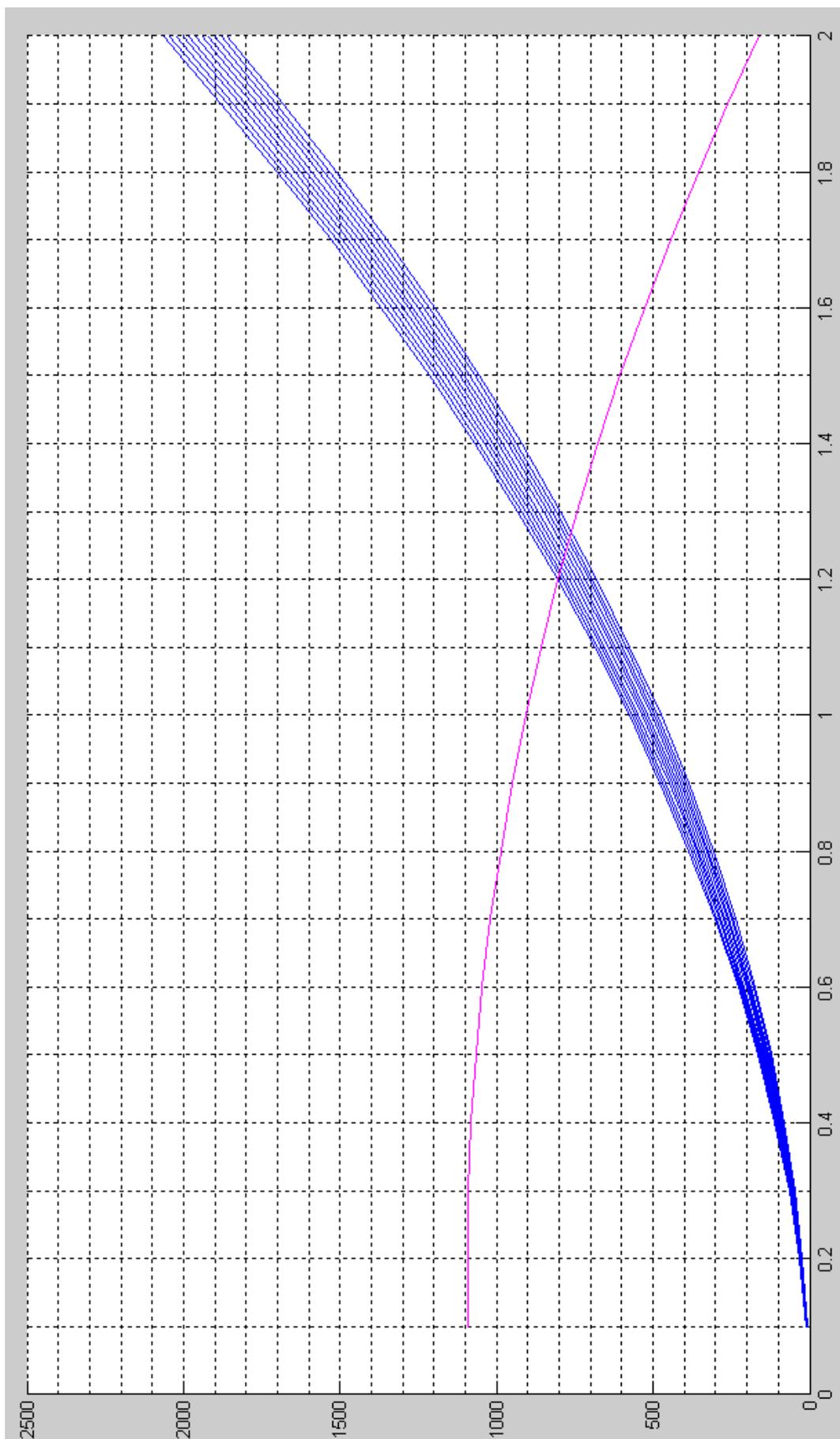
Posición	Tiempo s	Caudal m ³ /s	Piezométrica m	FLM	Volumen Mezcla m ³	Longitud Mezcla m	Eficiencia O/O
0	0.000	0.0397	3965.631	0.06200	14.4853	461.080	99.53892
1	2.201	0.0397	3965.933	0.06198	14.4853	461.082	99.53892
2	4.403	0.0396	3966.235	0.06196	14.4854	461.084	99.53892
3	6.607	0.0396	3966.537	0.06193	14.4854	461.086	99.53891
4	8.813	0.0396	3966.838	0.06191	14.4855	461.088	99.53891
5	11.020	0.0396	3967.139	0.06189	14.4856	461.090	99.53891
6	13.230	0.0396	3967.439	0.06186	14.4856	461.092	99.53891
7	15.441	0.0396	3967.740	0.06184	14.4857	461.094	99.53891
8	17.653	0.0395	3968.040	0.06181	14.4858	461.096	99.53890
9	19.868	0.0395	3968.339	0.06179	14.4858	461.098	99.53890
10	22.084	0.0395	3968.639	0.06177	14.4859	461.100	99.53890

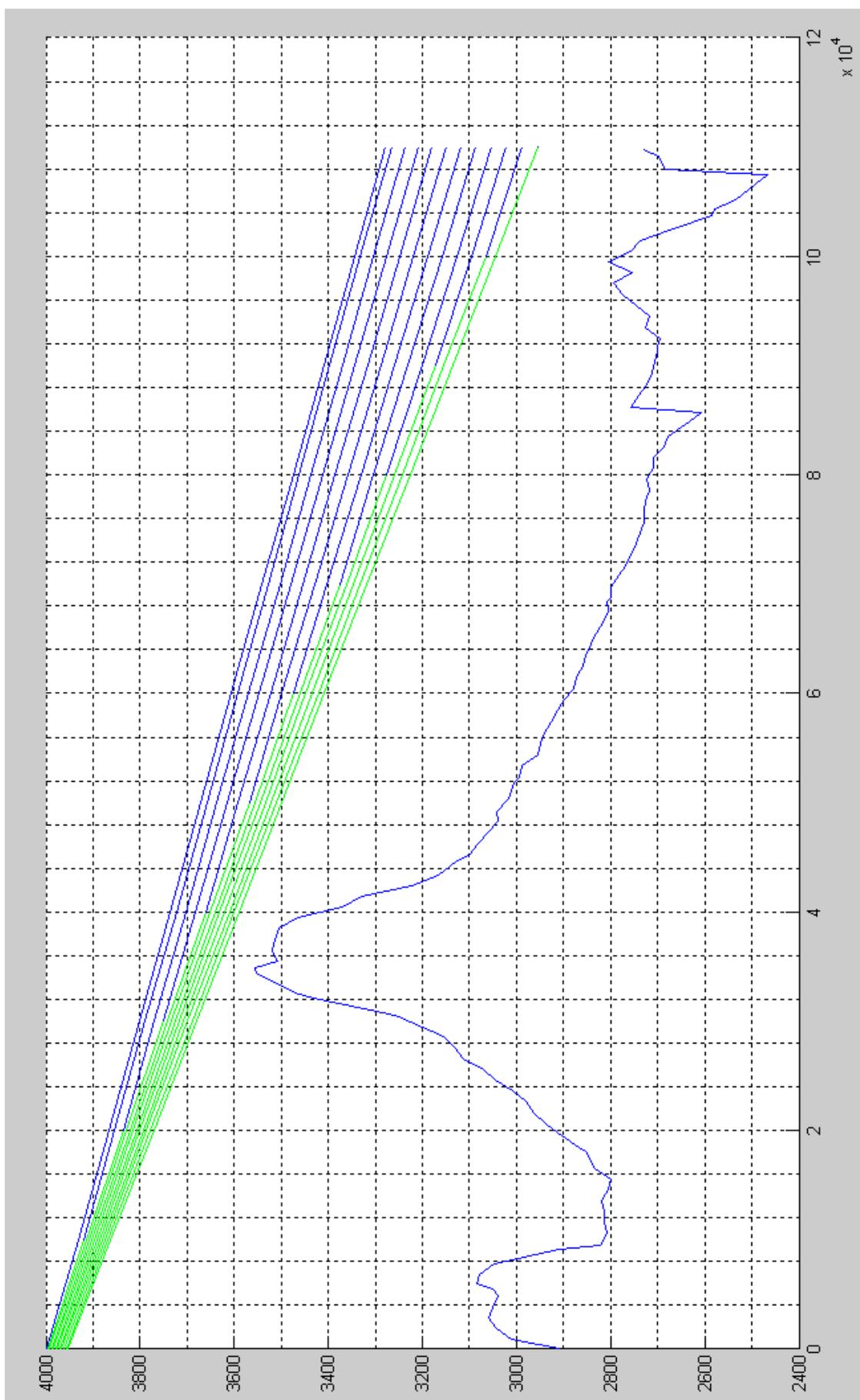




Jet Fuel – Fuel Oil

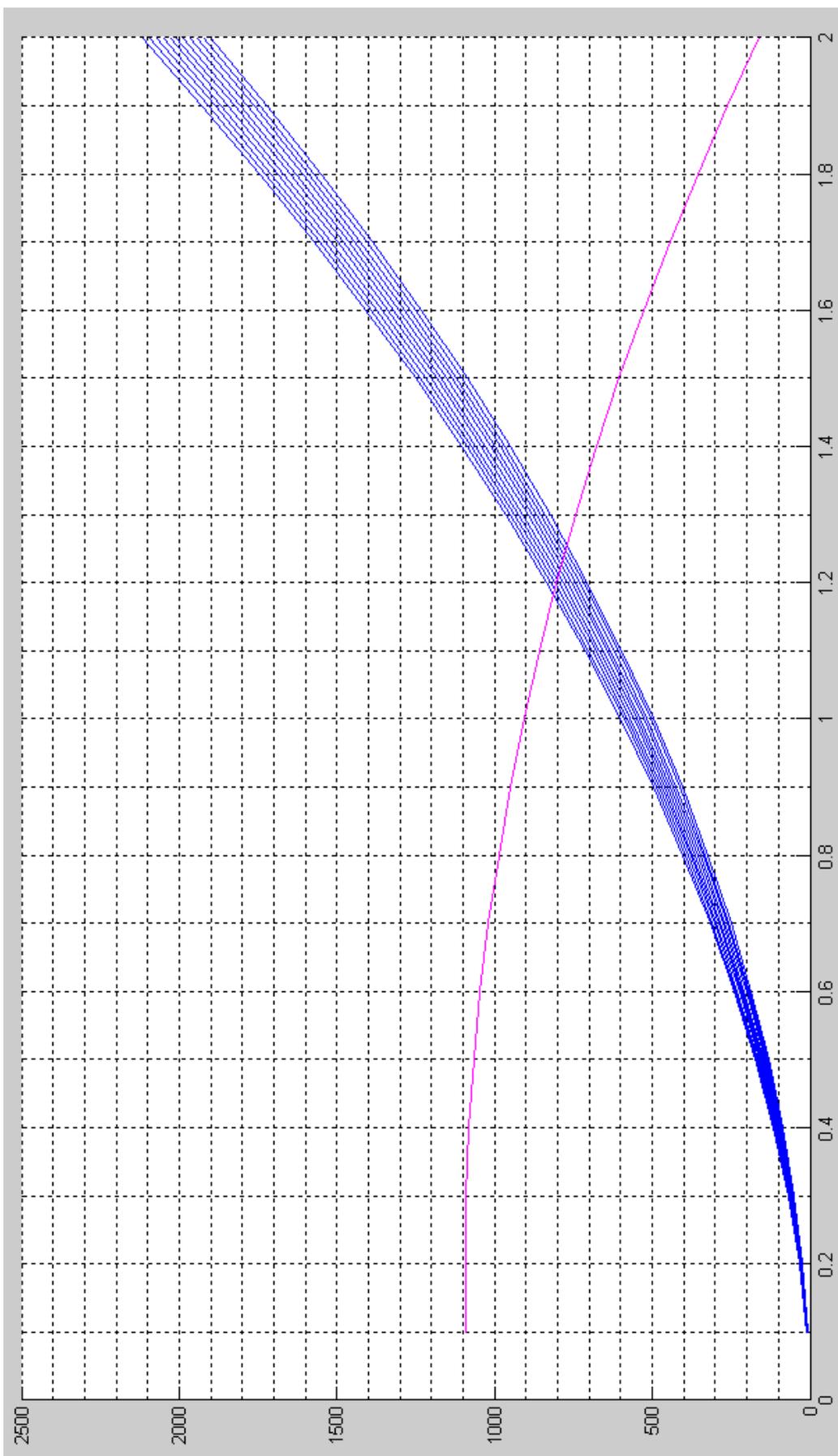
Posición	Tiempo s	Caudal m ³ /s	Piezométrica m	FLM	Volumen Mezcla m ³	Longitud Mezcla m	Eficiencia O/O
0	0.000	0.0377	4003.168	0.06132	14.7800	470.463	99.52954
1	2.303	0.0379	3999.184	0.06165	14.7777	470.389	99.52961
2	4.579	0.0381	3995.146	0.06199	14.7754	470.314	99.52969
3	6.829	0.0383	3991.054	0.06232	14.7730	470.241	99.52976
4	9.053	0.0386	3986.907	0.06266	14.7707	470.167	99.52983
5	11.251	0.0388	3982.705	0.06301	14.7684	470.094	99.52991
6	13.424	0.0390	3978.446	0.06335	14.7661	470.021	99.52998
7	15.571	0.0392	3974.131	0.06370	14.7639	469.949	99.53005
8	17.693	0.0395	3969.758	0.06405	14.7616	469.876	99.53012
9	19.790	0.0397	3965.328	0.06440	14.7593	469.804	99.53020
10	21.862	0.0399	3960.840	0.06475	14.7571	469.732	99.53027

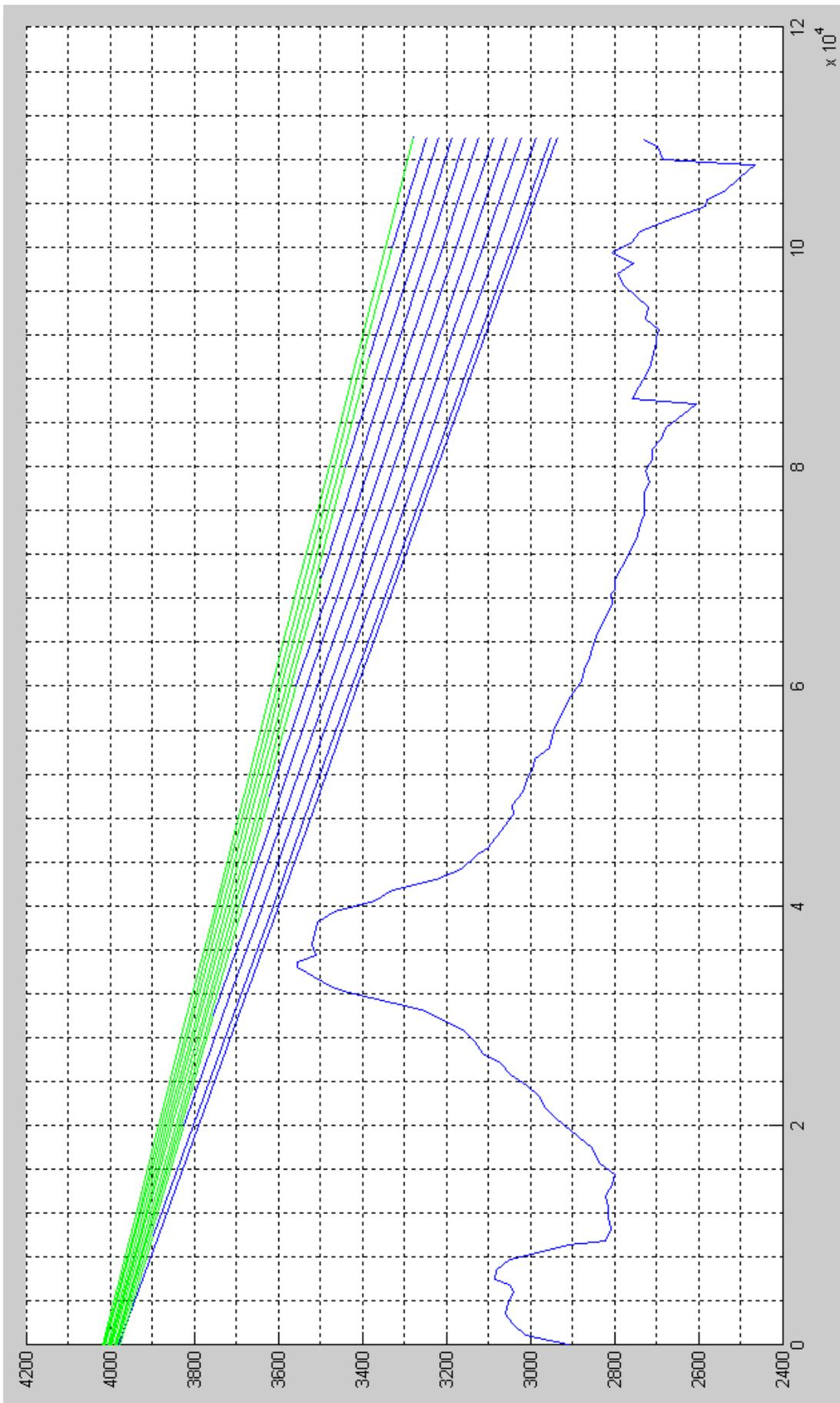




Jet Fuel – Diesel 2

Posición	Tiempo s	Caudal m ³ /s	Piezométrica m	FLM	Volumen Mezcla m ³	Longitud Mezcla m	Eficiencia 0/0
0	0.000	0.0395	3969.892	0.06411	14.7701	470.148	99.52985
1	2.225	0.0392	3974.394	0.06375	14.7725	470.223	99.52978
2	4.477	0.0390	3978.835	0.06339	14.7748	470.298	99.52970
3	6.755	0.0388	3983.215	0.06304	14.7772	470.373	99.52963
4	9.061	0.0385	3987.535	0.06268	14.7796	470.449	99.52955
5	11.393	0.0383	3991.795	0.06233	14.7820	470.525	99.52947
6	13.753	0.0381	3995.997	0.06199	14.7844	470.602	99.52940
7	16.141	0.0378	4000.140	0.06164	14.7868	470.679	99.52932
8	18.556	0.0376	4004.226	0.06130	14.7892	470.756	99.52924
9	20.999	0.0374	4008.255	0.06096	14.7917	470.834	99.52917
10	23.470	0.0372	4012.227	0.06062	14.7941	470.912	99.52909

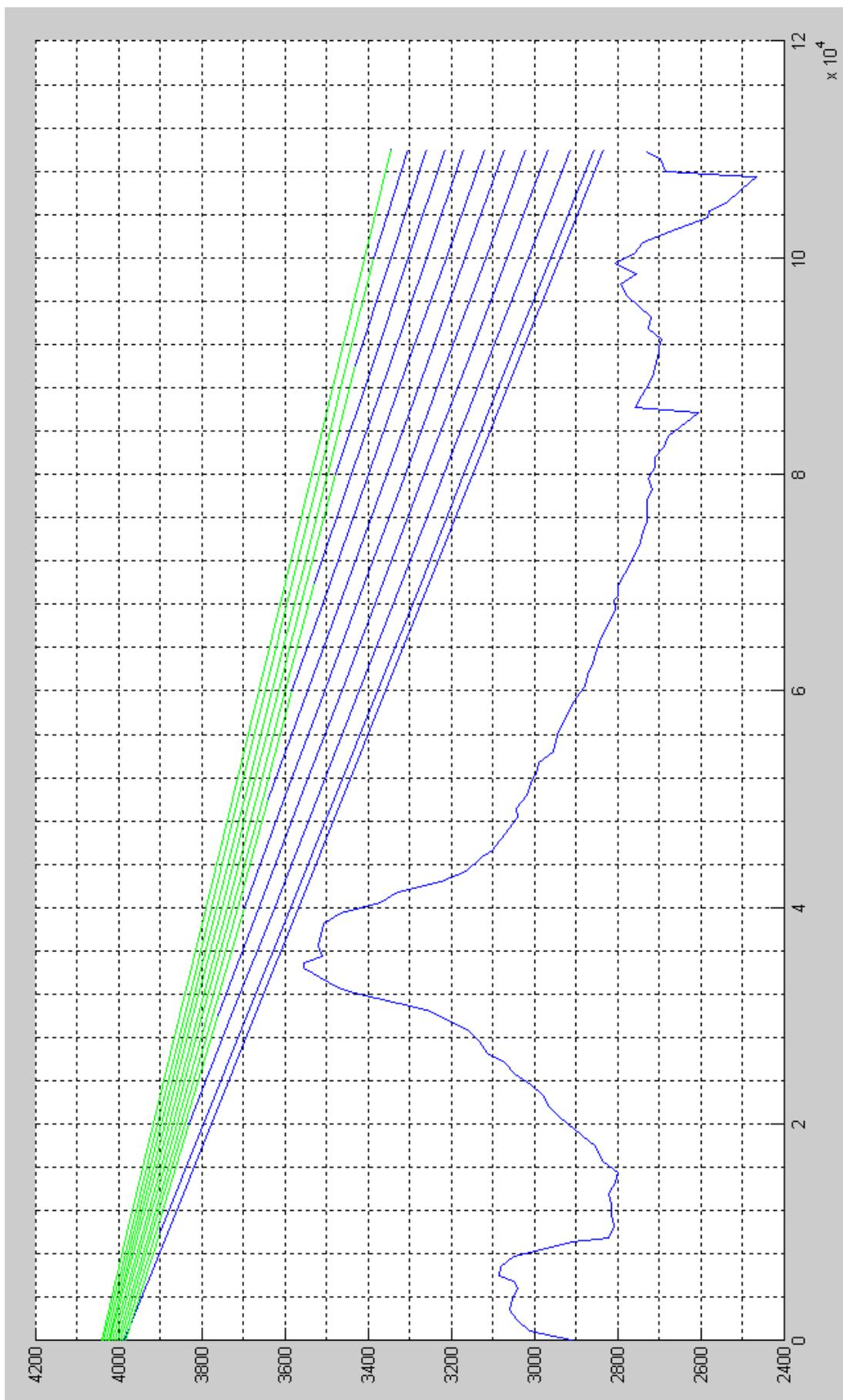




Jet Fuel – Diesel Premium

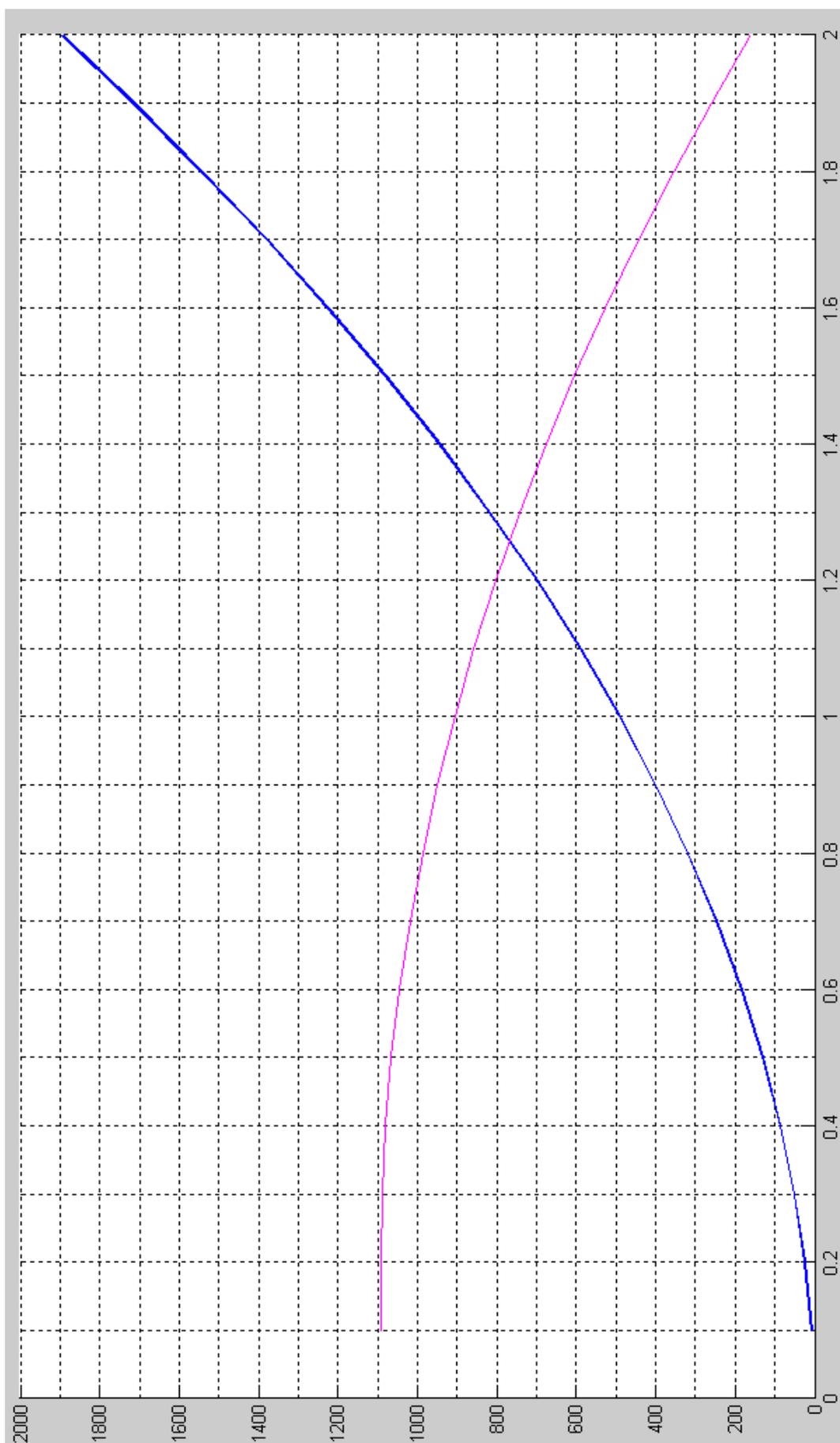
Posición	Tiempo s	Caudal m ³ /s	Piezométrica m	FLM	Volumen Mezcla m ³	Longitud Mezcla m	Eficiencia 0/0
0	0.000	0.0393	3972.236	0.06518	14.9157	474.783	99.52522
1	2.239	0.0390	3978.982	0.06463	14.9196	474.906	99.52509
2	4.518	0.0386	3985.570	0.06408	14.9235	475.028	99.52497
3	6.838	0.0383	3992.004	0.06355	14.9273	475.152	99.52485
4	9.199	0.0379	3998.287	0.06302	14.9312	475.276	99.52472
5	11.601	0.0376	4004.422	0.06250	14.9352	475.401	99.52460
6	14.044	0.0373	4010.414	0.06198	14.9391	475.526	99.52447
7	16.529	0.0370	4016.266	0.06147	14.9431	475.653	99.52435
8	19.056	0.0366	4021.980	0.06097	14.9471	475.780	99.52422
9	21.625	0.0363	4027.561	0.06047	14.9511	475.909	99.52409
10	24.237	0.0360	4033.011	0.05999	14.9552	476.038	99.52396

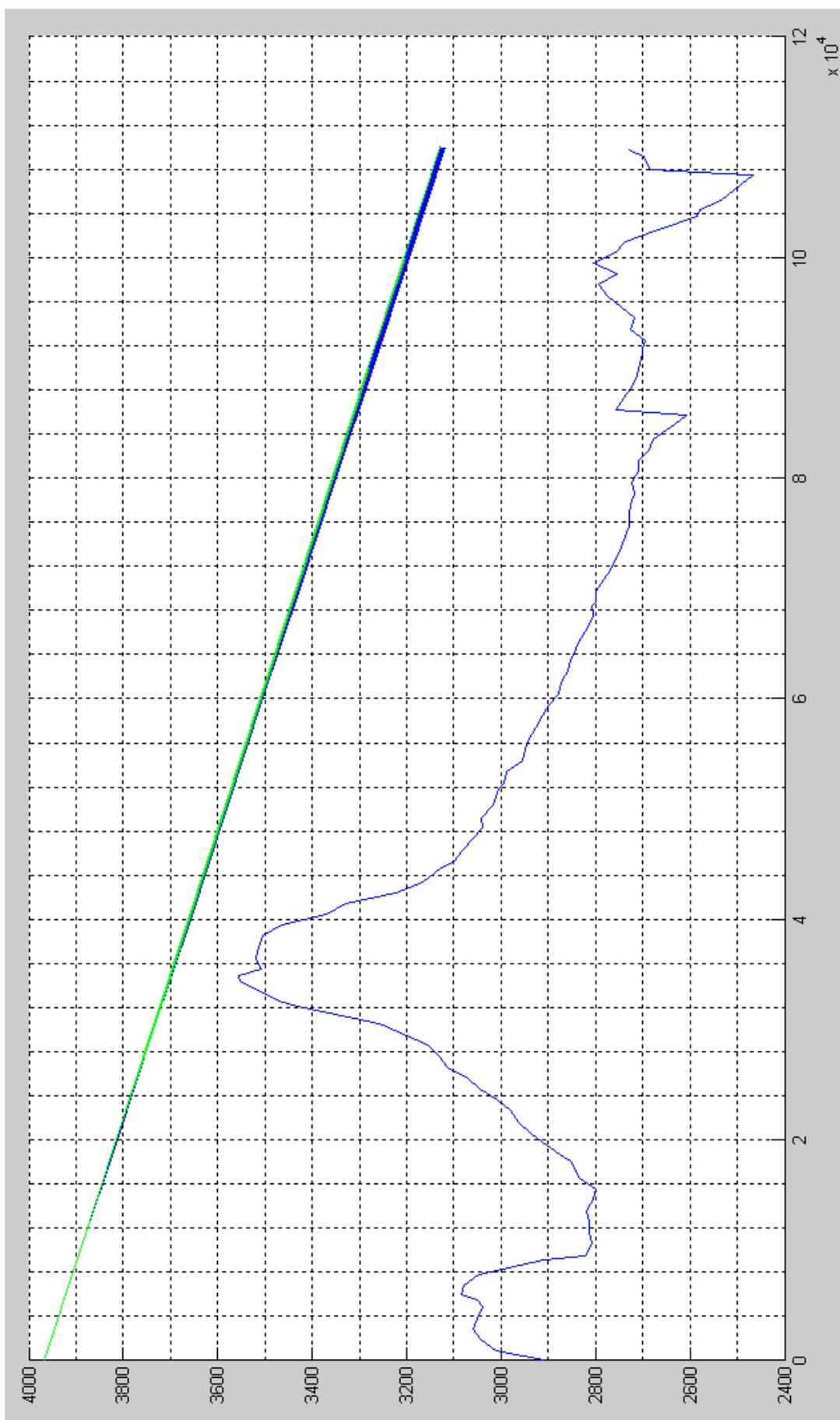




Gasolina 87 – Gasolina 92

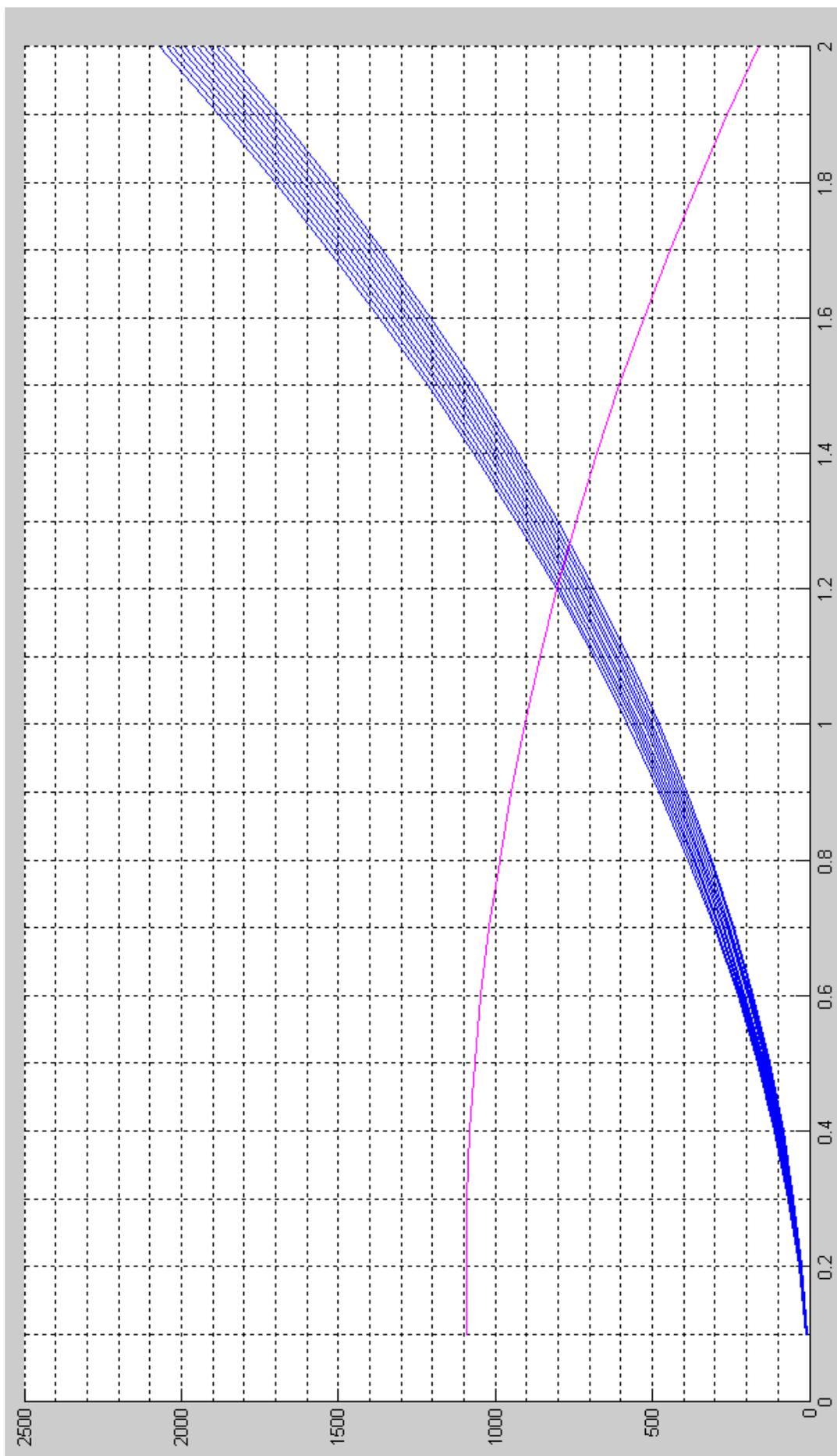
Posición	Tiempo s	Caudal m ³ /s	Piezométrica m	FLM	Volumen Mezcla m ³	Longitud Mezcla m	Eficiencia 0/0
0	0.000	0.0396	3967.016	0.06199	14.4961	461.426	99.53857
1	2.204	0.0396	3967.164	0.06197	14.4962	461.427	99.53857
2	4.409	0.0396	3967.311	0.06196	14.4962	461.428	99.53857
3	6.615	0.0396	3967.458	0.06195	14.4962	461.429	99.53857
4	8.822	0.0396	3967.605	0.06194	14.4963	461.430	99.53857
5	11.029	0.0396	3967.752	0.06193	14.4963	461.432	99.53857
6	13.238	0.0396	3967.899	0.06192	14.4963	461.433	99.53857
7	15.447	0.0395	3968.046	0.06190	14.4964	461.434	99.53857
8	17.657	0.0395	3968.193	0.06189	14.4964	461.435	99.53857
9	19.868	0.0395	3968.339	0.06188	14.4964	461.436	99.53856
10	22.079	0.0395	3968.486	0.06187	14.4965	461.437	99.53856

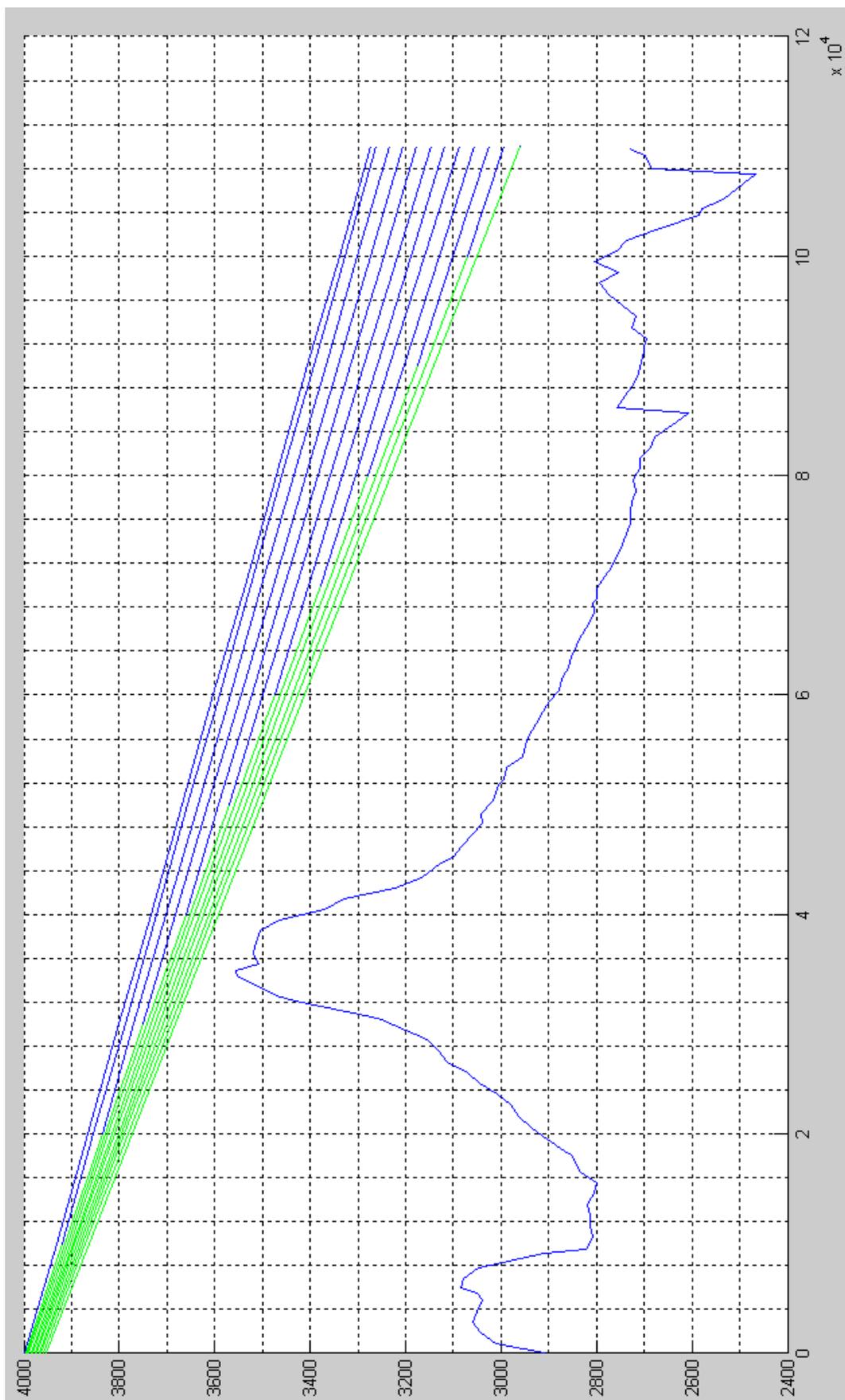




Gasolina 87 – Fuel Oil

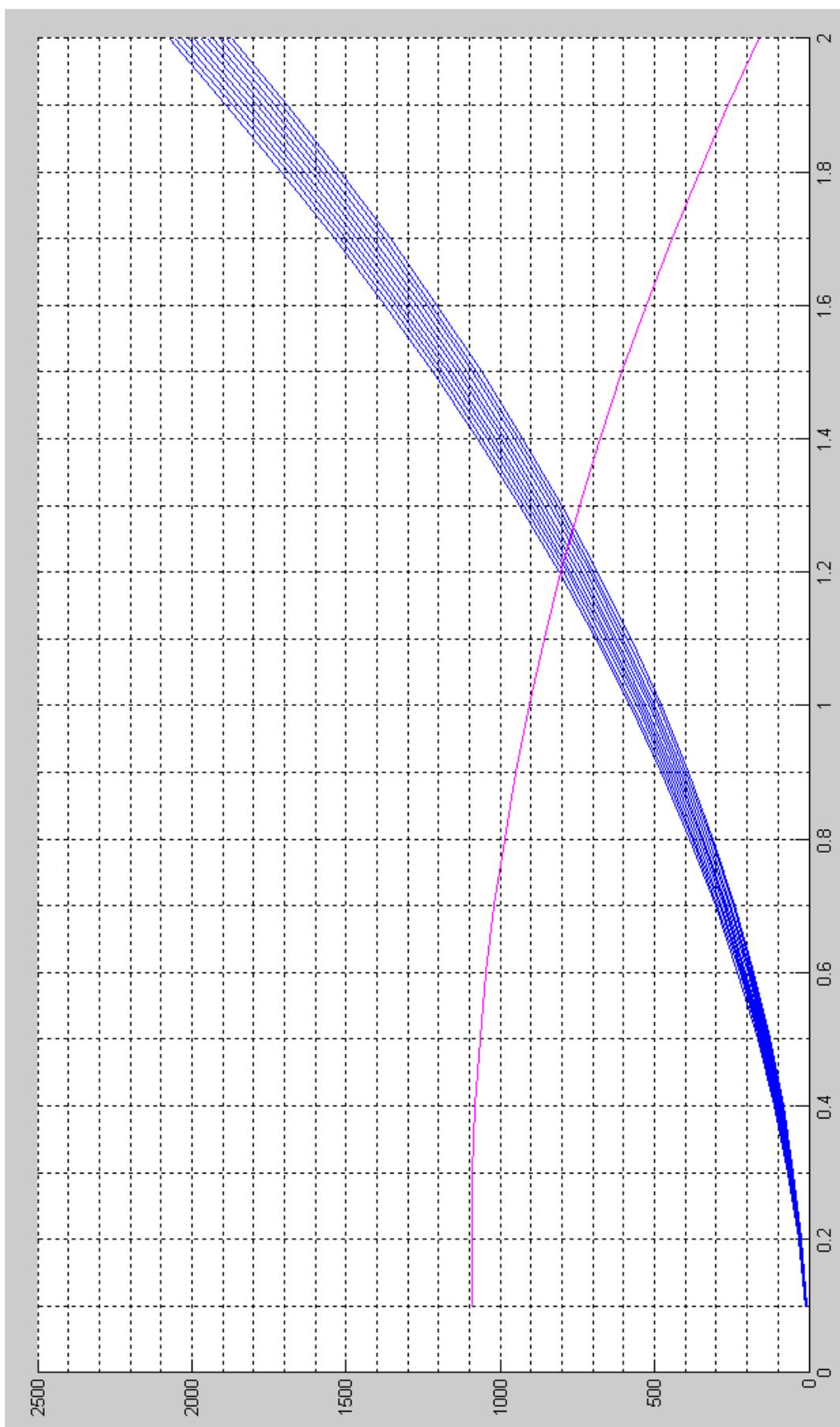
Posición	Tiempo s	Caudal m ³ /s	Piezométrica m	FLM	Volumen Mezcla m ³	Longitud Mezcla m	Eficiencia 0/0
0	0.000	0.0377	4003.303	0.06140	14.7913	470.821	99.52918
1	2.304	0.0379	3999.459	0.06172	14.7889	470.747	99.52925
2	4.582	0.0381	3995.564	0.06204	14.7866	470.673	99.52933
3	6.834	0.0383	3991.620	0.06237	14.7843	470.599	99.52940
4	9.062	0.0385	3987.624	0.06270	14.7820	470.526	99.52947
5	11.265	0.0387	3983.577	0.06303	14.7797	470.454	99.52955
6	13.443	0.0390	3979.479	0.06336	14.7775	470.381	99.52962
7	15.596	0.0392	3975.328	0.06369	14.7752	470.309	99.52969
8	17.725	0.0394	3971.125	0.06403	14.7729	470.237	99.52976
9	19.830	0.0396	3966.869	0.06437	14.7707	470.166	99.52983
10	21.910	0.0398	3962.559	0.06471	14.7685	470.094	99.52991

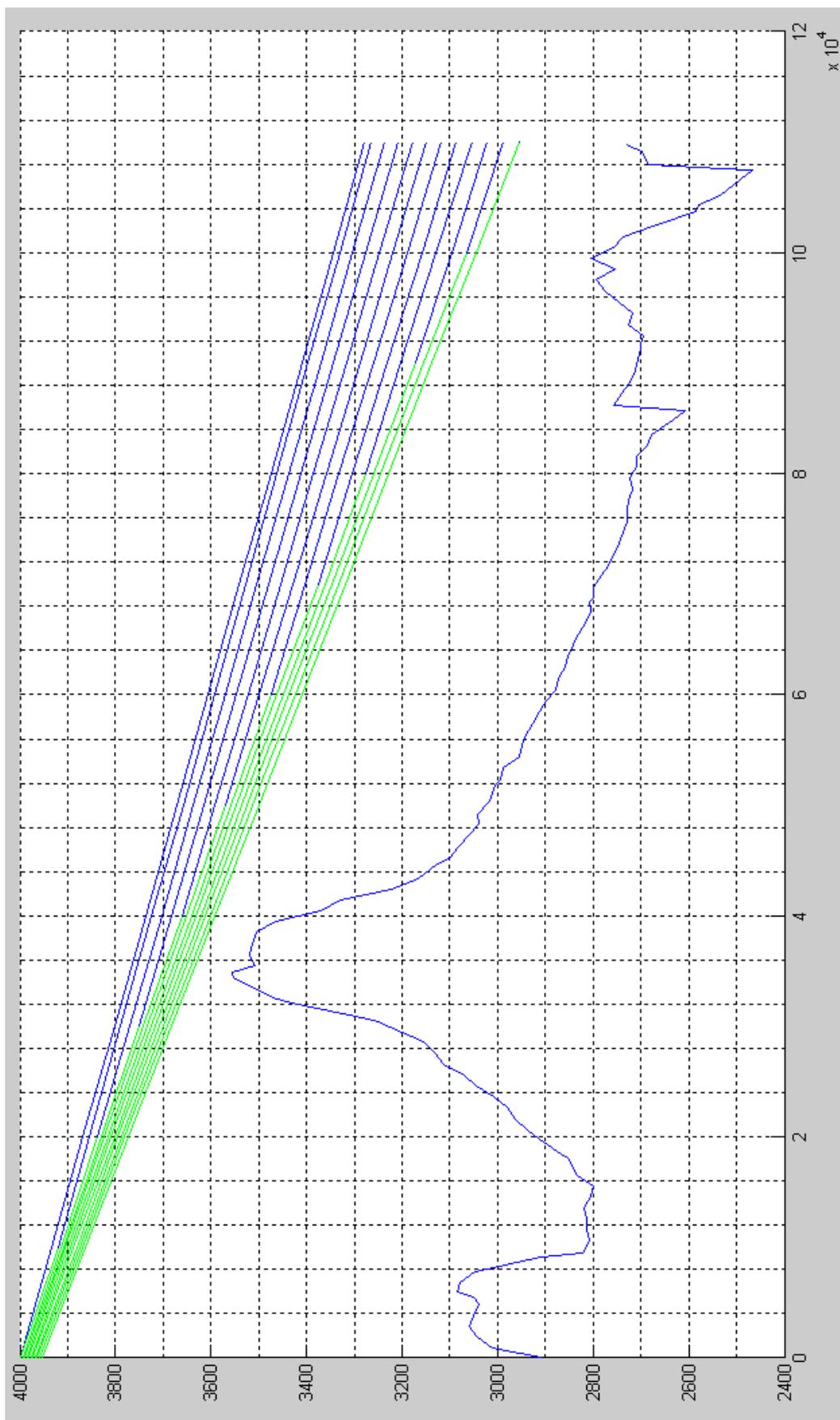




Gasolina 87 - Diesel 2

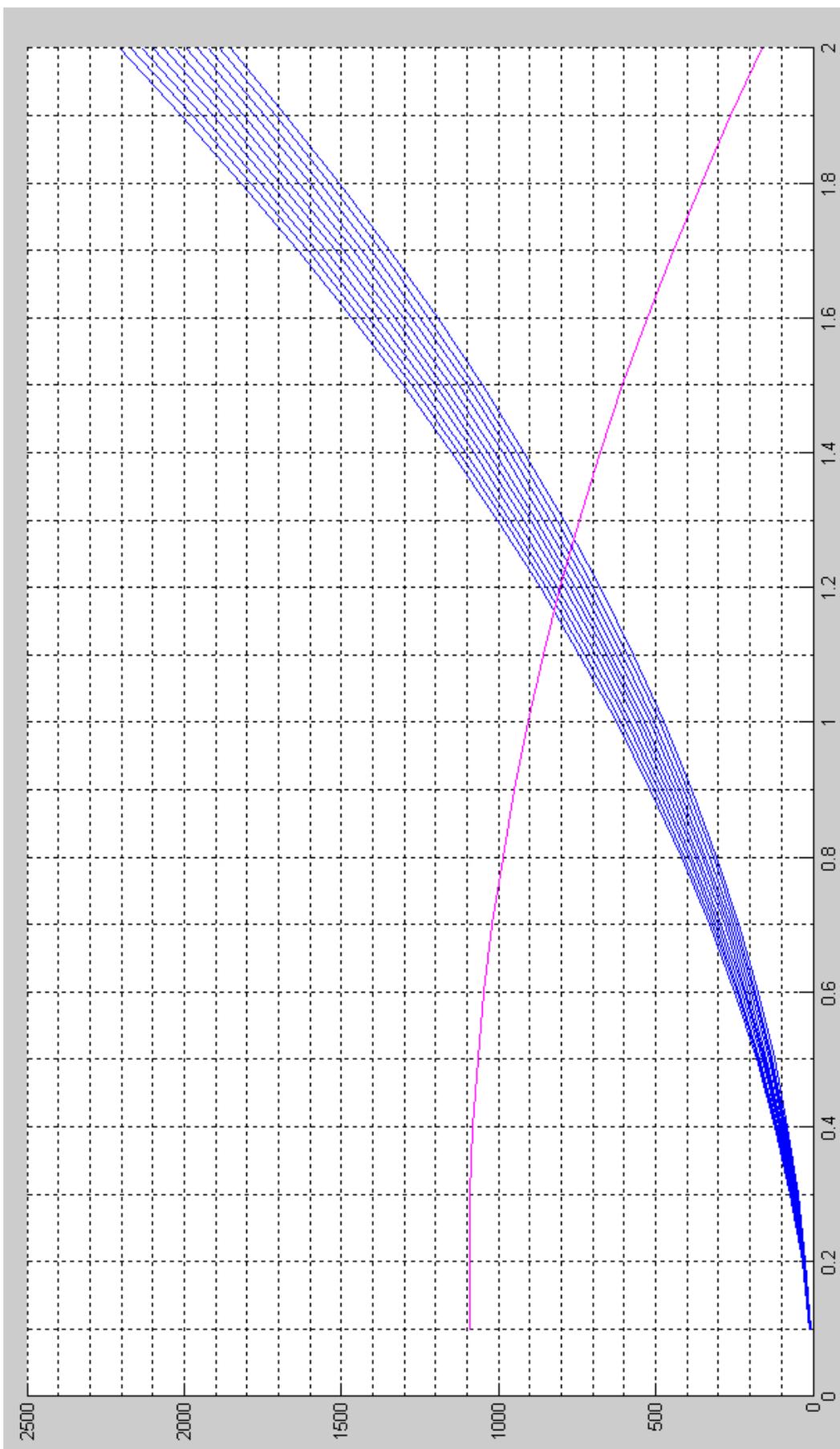
Posición	Tiempo s	Caudal m ³ /s	Piezométrica m	FLM	Volumen Mezcla m ³	Longitud Mezcla m	Eficiencia 0/0
0	0.000	0.0376	4004.361	0.06138	14.8005	471.114	99.52889
1	2.307	0.0378	4000.414	0.06171	14.7981	471.037	99.52896
2	4.587	0.0380	3996.413	0.06204	14.7957	470.960	99.52904
3	6.841	0.0383	3992.359	0.06238	14.7933	470.884	99.52912
4	9.070	0.0385	3988.250	0.06272	14.7909	470.809	99.52919
5	11.272	0.0387	3984.086	0.06306	14.7885	470.733	99.52927
6	13.450	0.0389	3979.866	0.06340	14.7862	470.658	99.52934
7	15.601	0.0392	3975.591	0.06375	14.7838	470.583	99.52942
8	17.728	0.0394	3971.258	0.06409	14.7815	470.509	99.52949
9	19.830	0.0396	3966.869	0.06444	14.7791	470.435	99.52957
10	21.907	0.0398	3962.422	0.06479	14.7768	470.361	99.52964

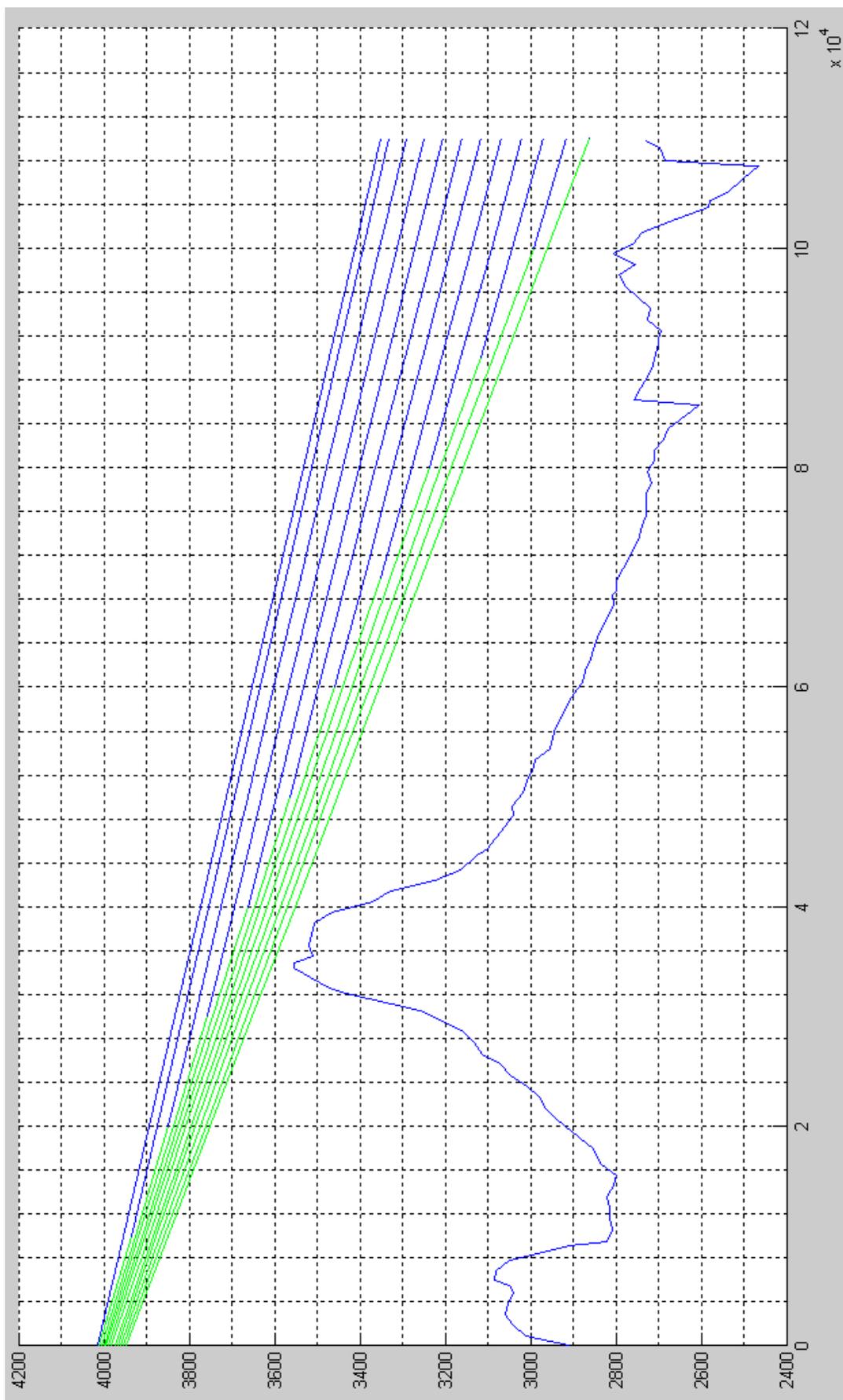




Gasolina 87 - Diesel Premium

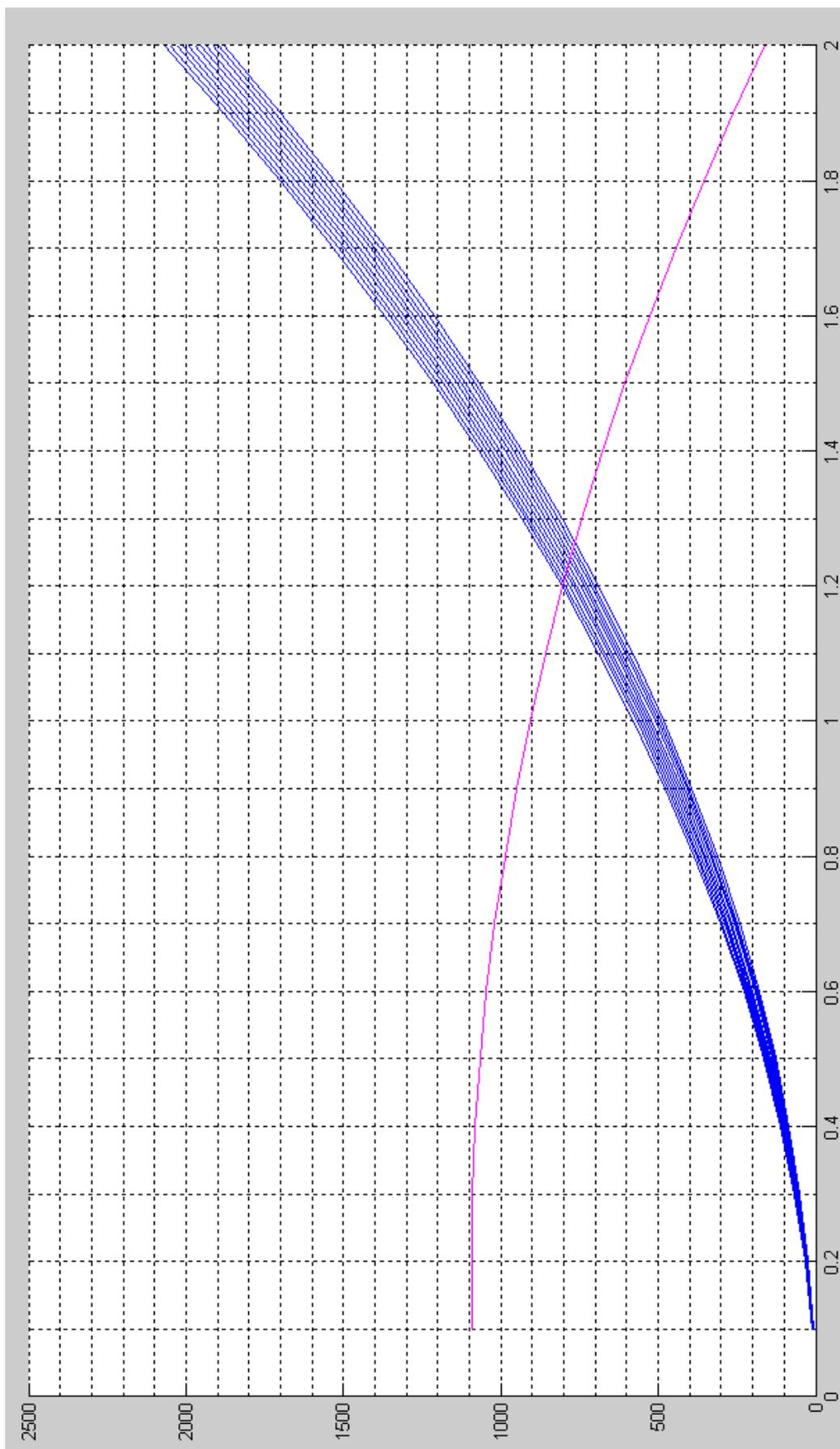
Posición	Tiempo s	Caudal m ³ /s	Piezométrica m	FLM	Volumen Mezcla m ³	Longitud Mezcla m	Eficiencia 0/0
0	0.000	0.0366	4022.104	0.06105	14.9587	476.149	99.52385
1	2.362	0.0369	4016.520	0.06154	14.9546	476.021	99.52398
2	4.684	0.0373	4010.805	0.06204	14.9506	475.894	99.52411
3	6.966	0.0376	4004.956	0.06254	14.9467	475.768	99.52423
4	9.208	0.0379	3998.970	0.06305	14.9427	475.642	99.52436
5	11.410	0.0382	3992.843	0.06357	14.9388	475.517	99.52448
6	13.573	0.0386	3986.573	0.06409	14.9349	475.393	99.52461
7	15.697	0.0389	3980.157	0.06462	14.9310	475.270	99.52473
8	17.783	0.0393	3973.590	0.06516	14.9272	475.147	99.52485
9	19.830	0.0396	3966.869	0.06571	14.9233	475.025	99.52498
10	21.838	0.0400	3959.991	0.06626	14.9195	474.902	99.52510

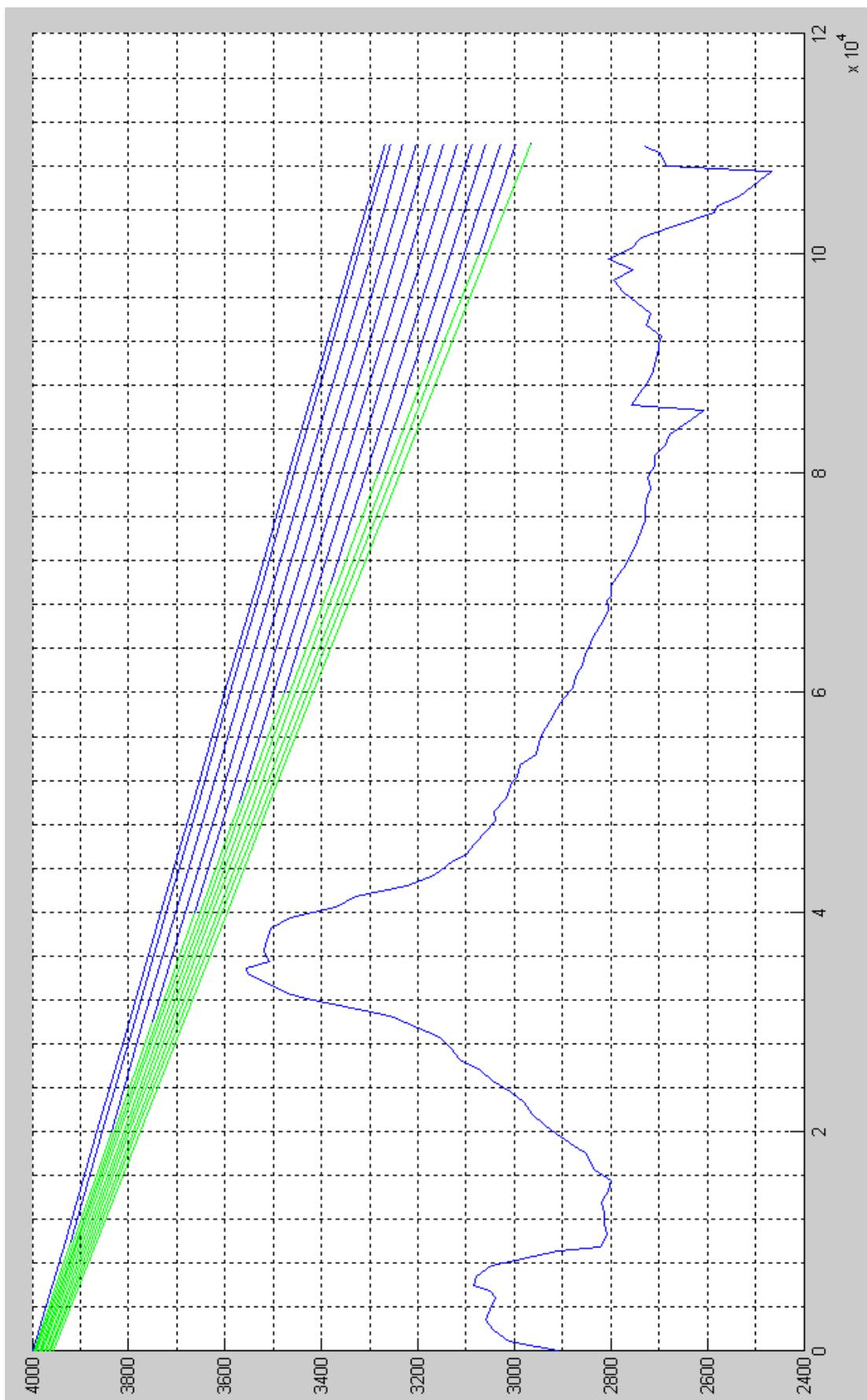




Gasolina 92 - Fuel Oil

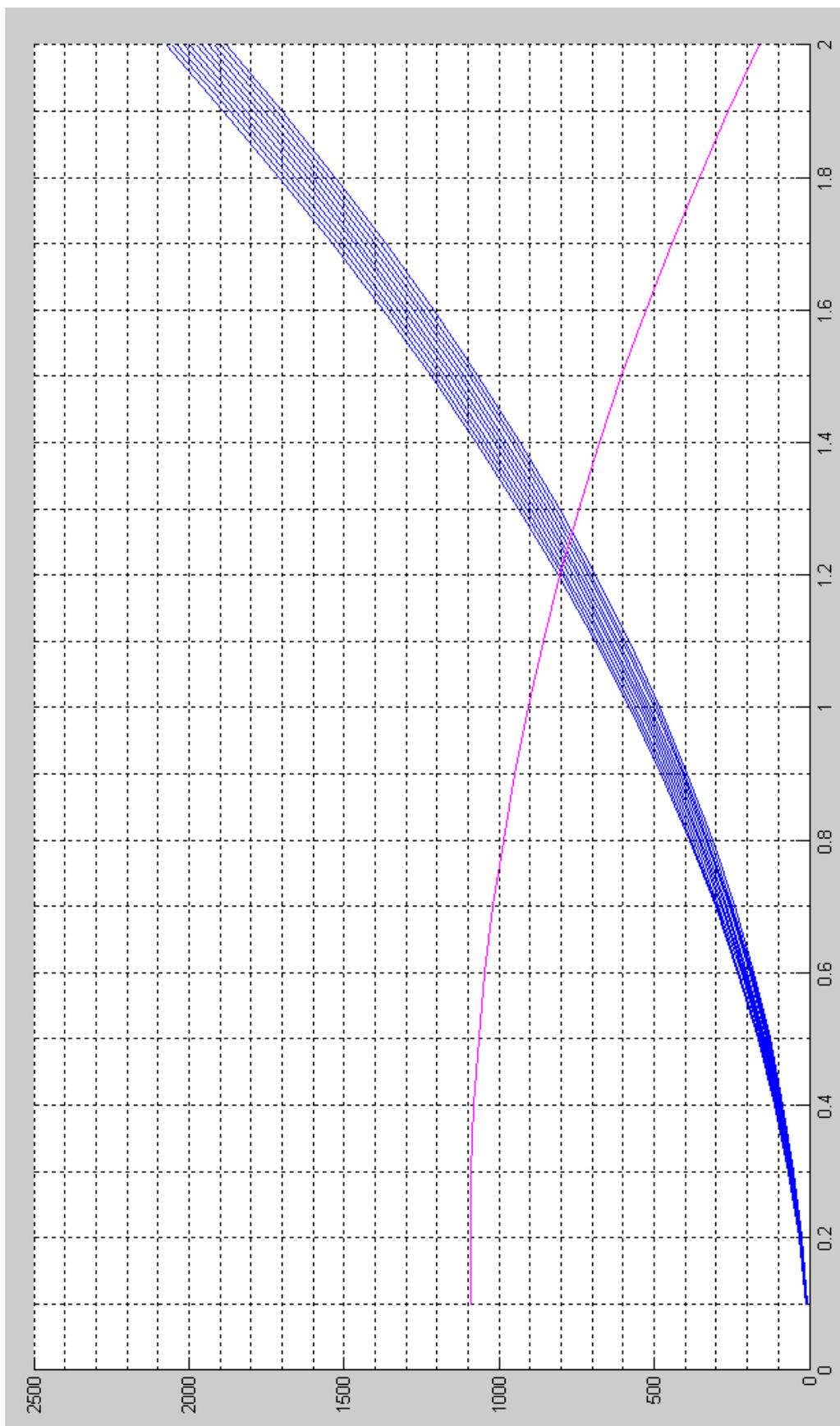
Posición	Tiempo s	Caudal m ³ /s	Piezométrica m	FLM	Volumen Mezcla m ³	Longitud Mezcla m	Eficiencia O/O
0	0.000	0.0377	4003.433	0.06148	14.8022	471.168	99.52883
1	2.304	0.0379	3999.722	0.06179	14.7998	471.094	99.52891
2	4.584	0.0381	3995.964	0.06210	14.7975	471.020	99.52898
3	6.840	0.0383	3992.161	0.06241	14.7952	470.946	99.52905
4	9.071	0.0385	3988.310	0.06273	14.7929	470.873	99.52913
5	11.278	0.0387	3984.412	0.06305	14.7906	470.801	99.52920
6	13.460	0.0389	3980.466	0.06337	14.7884	470.728	99.52927
7	15.620	0.0391	3976.473	0.06369	14.7861	470.656	99.52934
8	17.755	0.0393	3972.430	0.06401	14.7838	470.584	99.52942
9	19.868	0.0395	3968.339	0.06434	14.7816	470.512	99.52949
10	21.957	0.0397	3964.199	0.06467	14.7793	470.441	99.52956

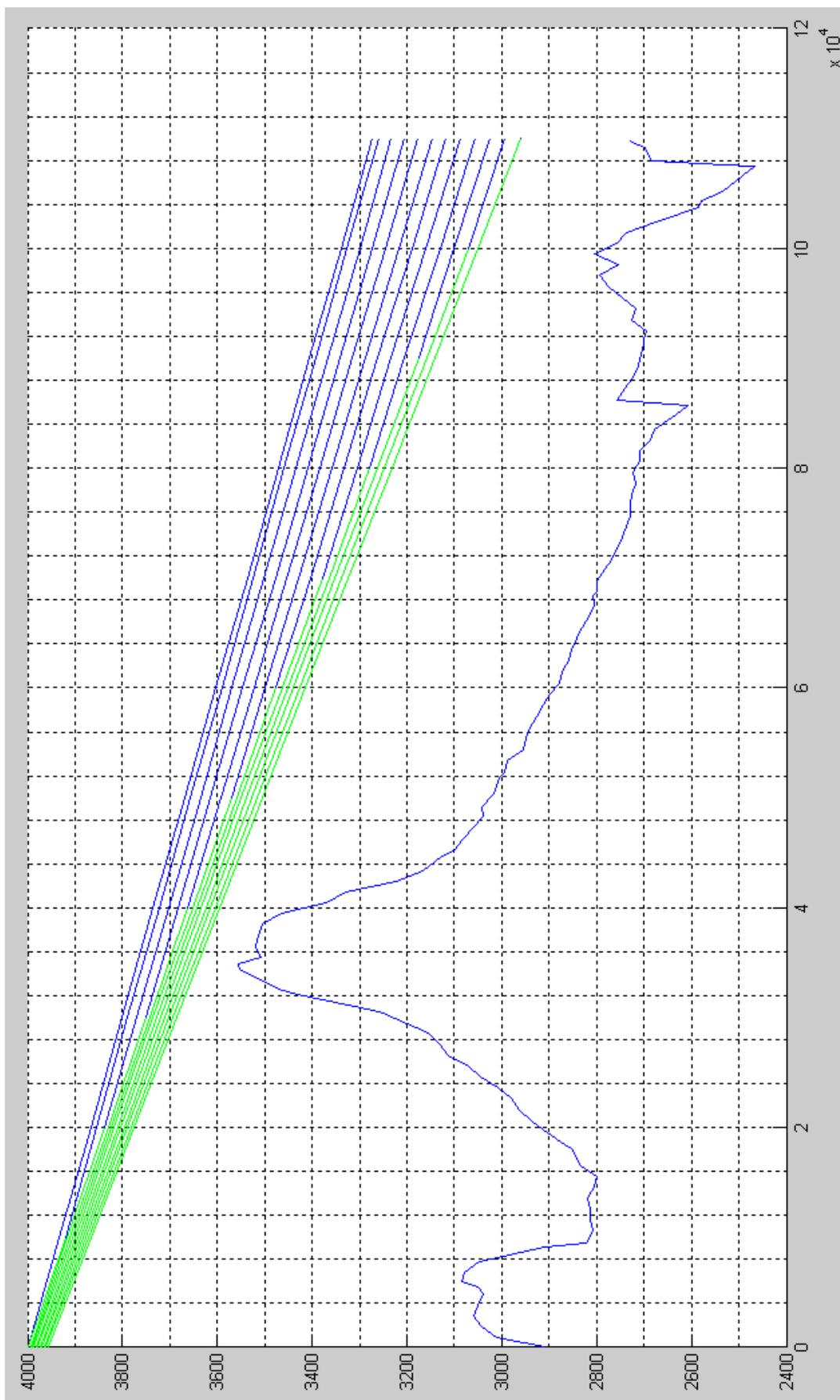




Gasolina 92 - Diesel 2

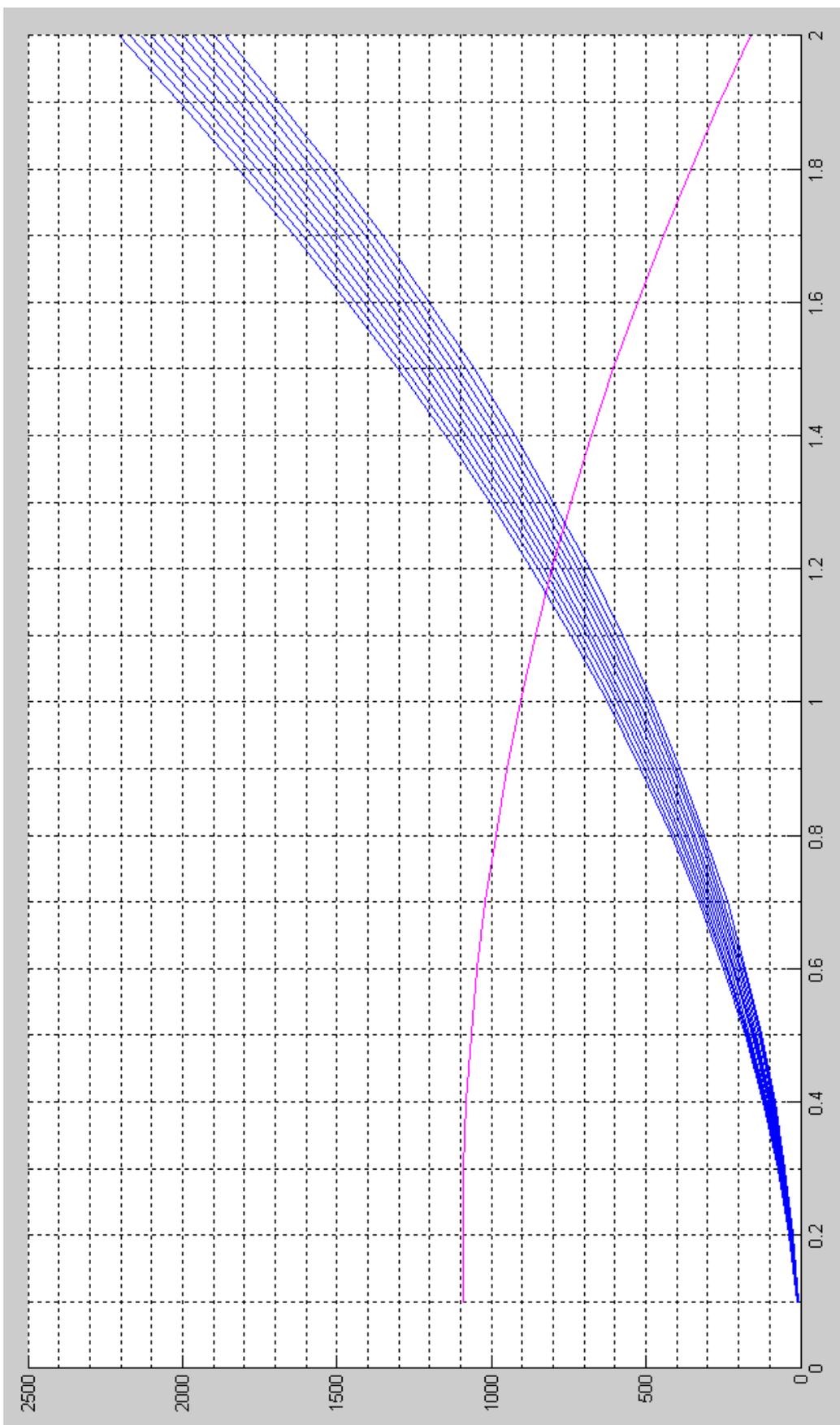
Posición	Tiempo s	Caudal m ³ /s	Piezométrica m	FLM	Volumen Mezcla m ³	Longitud Mezcla m	Eficiencia 0/0
0	0.000	0.0376	4004.490	0.06146	14.8114	471.462	99.52854
1	2.308	0.0378	4000.676	0.06178	14.8090	471.385	99.52862
2	4.590	0.0380	3996.812	0.06210	14.8066	471.308	99.52869
3	6.847	0.0382	3992.898	0.06243	14.8042	471.232	99.52877
4	9.078	0.0385	3988.934	0.06275	14.8018	471.156	99.52884
5	11.285	0.0387	3984.919	0.06308	14.7994	471.080	99.52892
6	13.468	0.0389	3980.852	0.06341	14.7971	471.005	99.52899
7	15.625	0.0391	3976.734	0.06374	14.7947	470.930	99.52907
8	17.759	0.0393	3972.563	0.06408	14.7924	470.856	99.52914
9	19.868	0.0395	3968.339	0.06441	14.7900	470.781	99.52922
10	21.953	0.0398	3964.062	0.06475	14.7877	470.707	99.52929

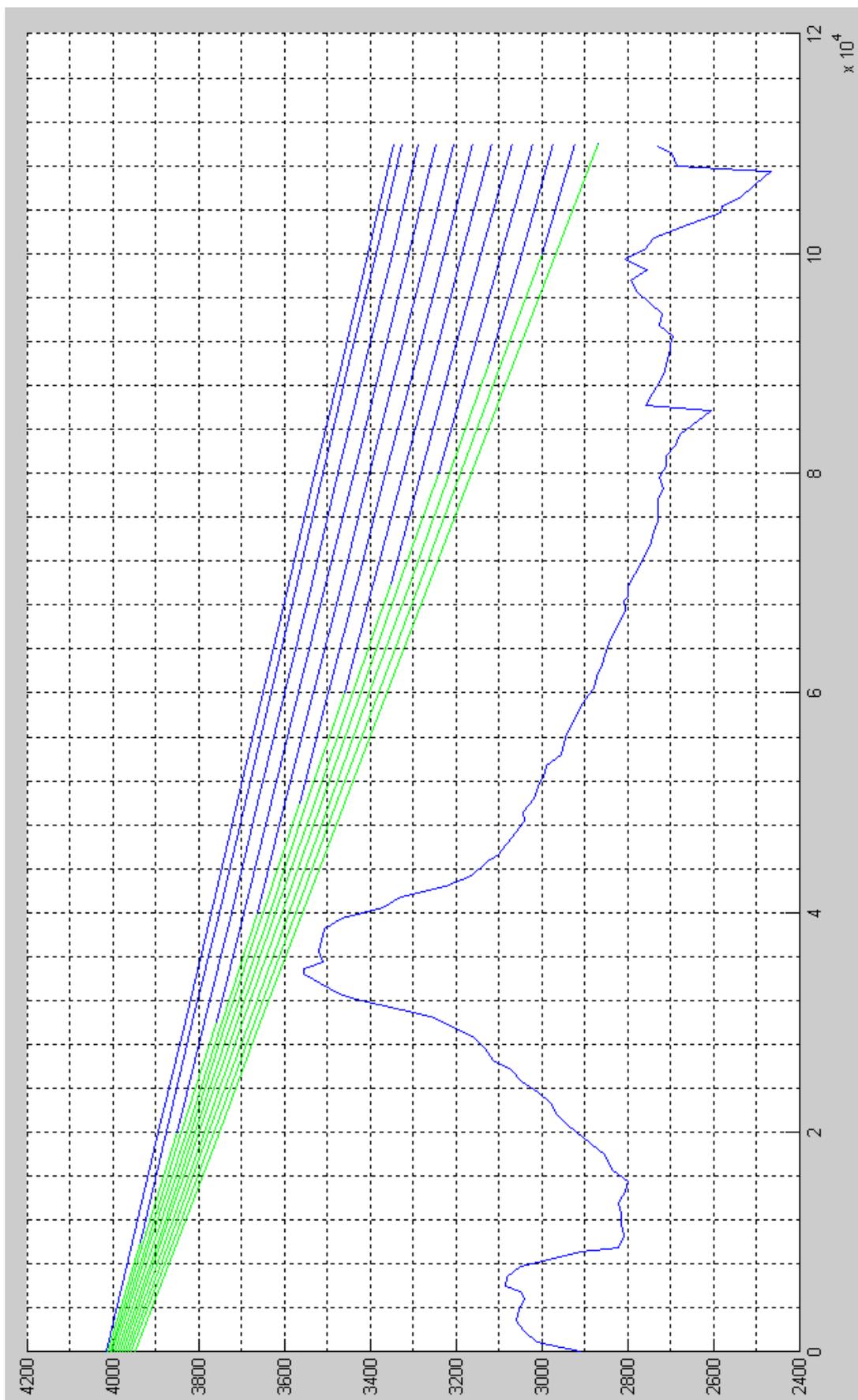




Gasolina 92 - Diesel Premium

Posición	Tiempo s	Caudal m ³ /s	Piezométrica m	FLM	Volumen Mezcla m ³	Longitud Mezcla m	Eficiencia 0/0
0	0.000	0.0366	4022.223	0.06113	14.9700	476.509	99.52349
1	2.363	0.0369	4016.763	0.06161	14.9659	476.380	99.52362
2	4.687	0.0372	4011.179	0.06210	14.9619	476.252	99.52375
3	6.971	0.0376	4005.466	0.06259	14.9579	476.124	99.52388
4	9.216	0.0379	3999.623	0.06309	14.9539	475.998	99.52400
5	11.423	0.0382	3993.646	0.06359	14.9499	475.872	99.52413
6	13.591	0.0385	3987.532	0.06410	14.9460	475.746	99.52425
7	15.721	0.0389	3981.279	0.06462	14.9421	475.621	99.52438
8	17.813	0.0392	3974.882	0.06515	14.9382	475.497	99.52450
9	19.868	0.0395	3968.339	0.06568	14.9343	475.373	99.52463
10	21.885	0.0399	3961.647	0.06621	14.9304	475.249	99.52475

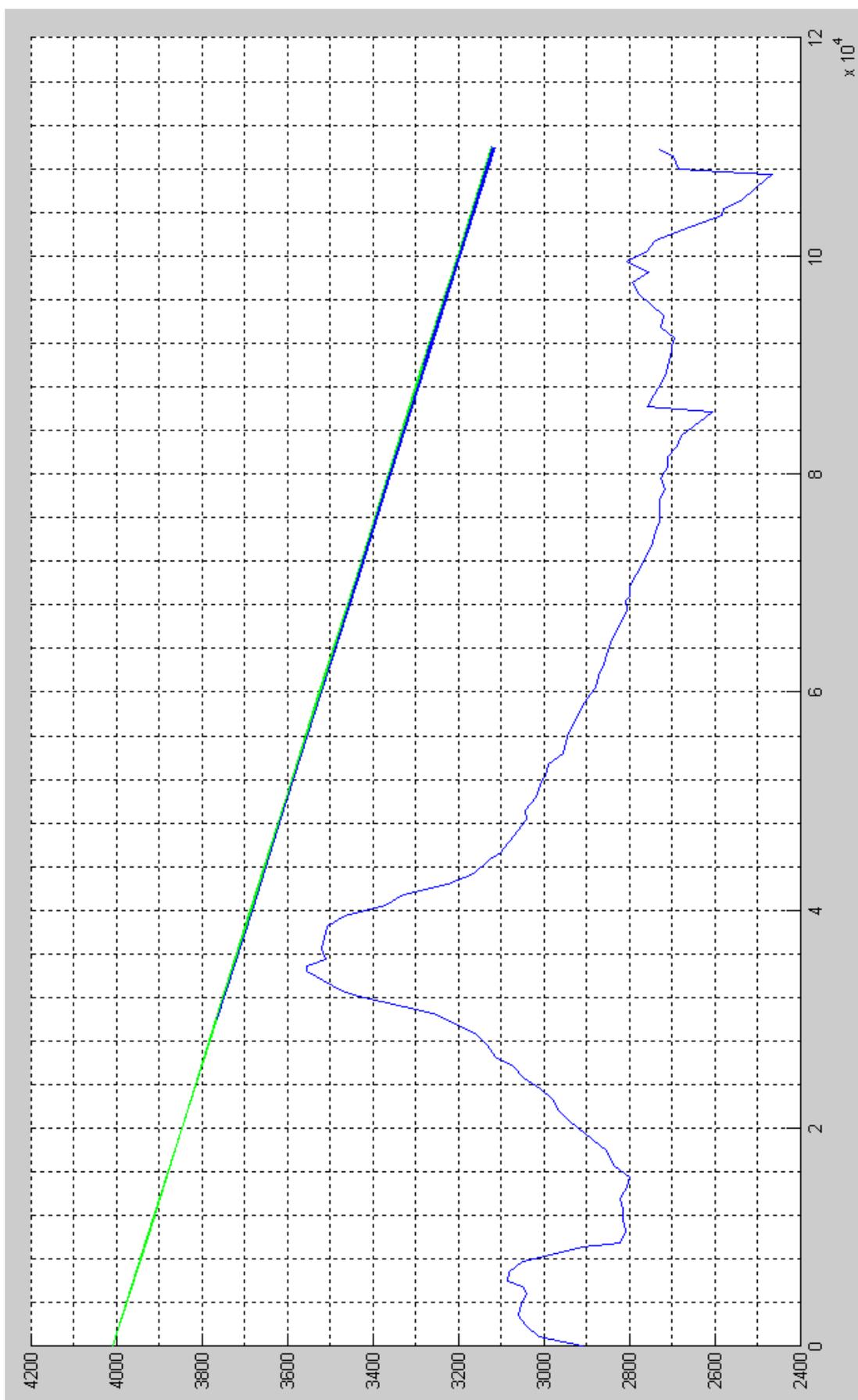




Fuel Oil - Diesel 2

Posición	Tiempo s	Caudal m ³ /s	Piezométrica m	FLM	Volumen Mezcla m ³	Longitud Mezcla m	Eficiencia O/O
0	0.000	0.0375	4007.214	0.06363	15.1004	480.662	99.51934
1	2.330	0.0375	4007.330	0.06362	15.1006	480.666	99.51933
2	4.661	0.0374	4007.446	0.06361	15.1007	480.669	99.51933
3	6.993	0.0374	4007.561	0.06360	15.1008	480.673	99.51933
4	9.325	0.0374	4007.677	0.06359	15.1009	480.677	99.51932
5	11.658	0.0374	4007.793	0.06358	15.1010	480.680	99.51932
6	13.992	0.0374	4007.908	0.06357	15.1011	480.684	99.51932
7	16.327	0.0374	4008.024	0.06356	15.1012	480.687	99.51931
8	18.663	0.0374	4008.139	0.06355	15.1014	480.691	99.51931
9	20.999	0.0374	4008.255	0.06354	15.1015	480.695	99.51931
10	23.336	0.0374	4008.370	0.06353	15.1016	480.698	99.51930

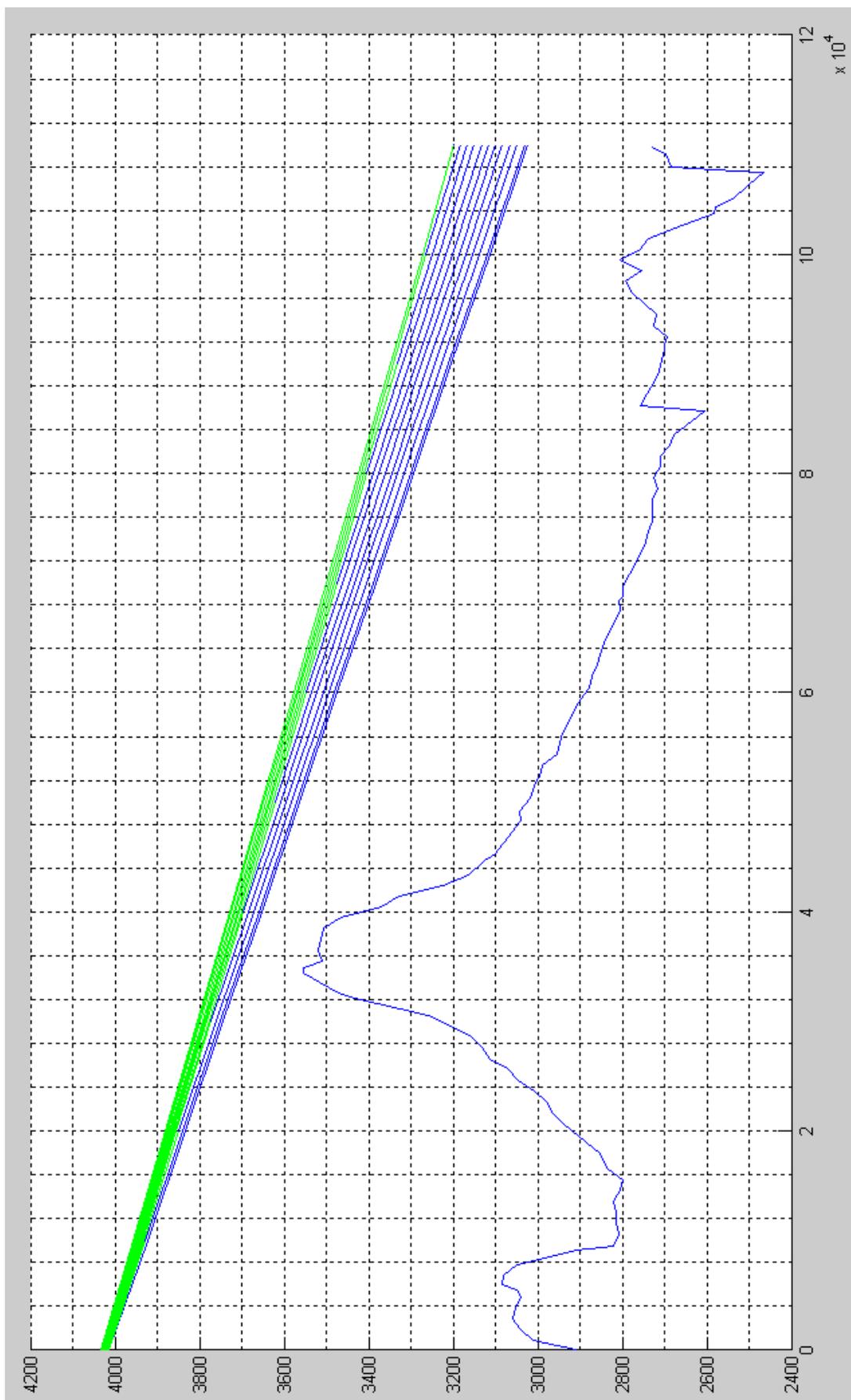




Fuel Oil - Diesel Premium

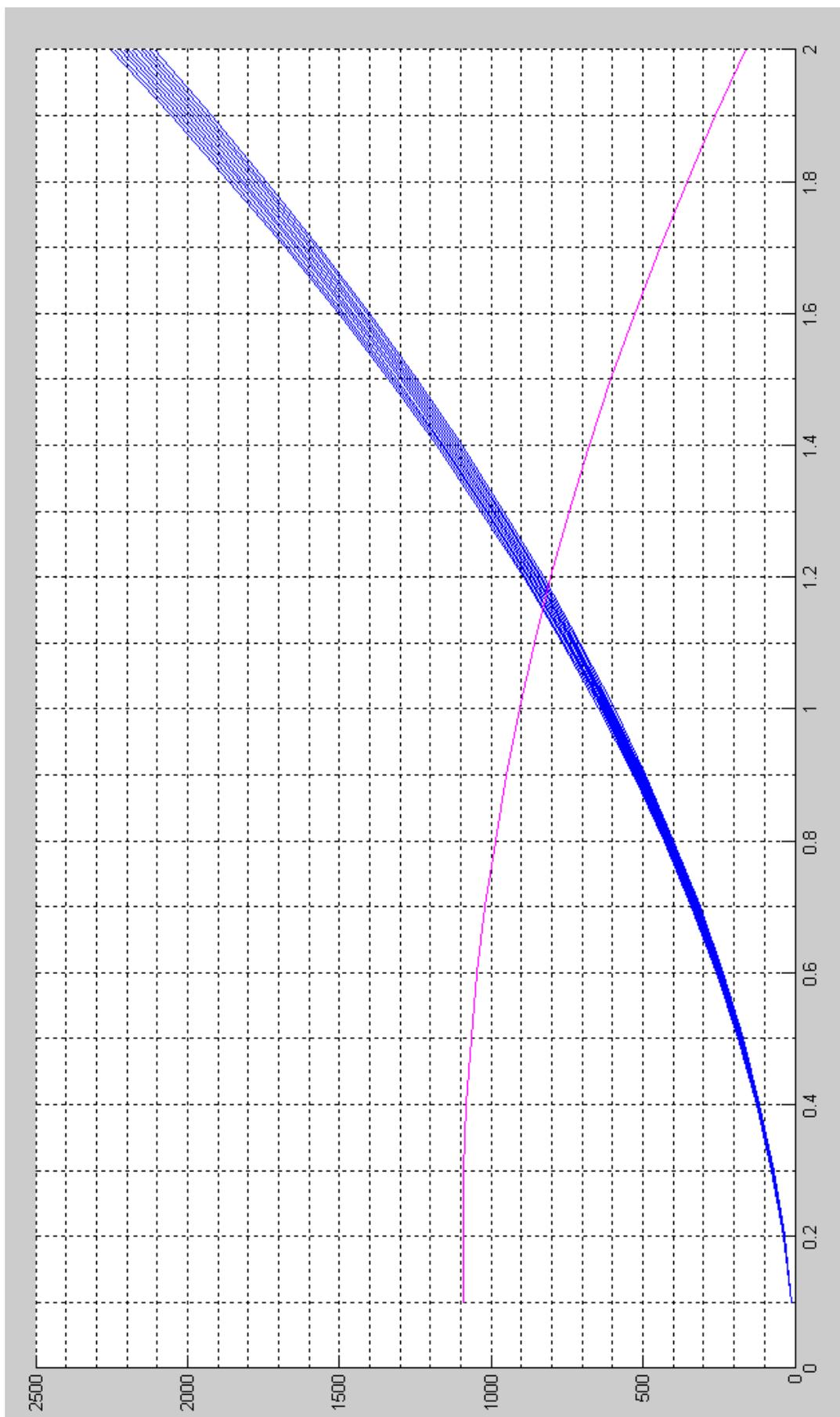
Posición	Tiempo s	Caudal m ³ /s	Piezométrica m	FLM	Volumen Mezcla m ³	Longitud Mezcla m	Eficiencia 0/0
0	0.000	0.0373	4009.241	0.06469	15.2485	485.374	99.51463
1	2.344	0.0372	4011.362	0.06450	15.2507	485.445	99.51456
2	4.703	0.0371	4013.461	0.06432	15.2529	485.516	99.51448
3	7.076	0.0370	4015.538	0.06414	15.2551	485.586	99.51441
4	9.464	0.0369	4017.594	0.06396	15.2573	485.656	99.51434
5	11.867	0.0368	4019.629	0.06378	15.2596	485.727	99.51427
6	14.285	0.0367	4021.643	0.06360	15.2618	485.797	99.51420
7	16.717	0.0365	4023.636	0.06342	15.2640	485.867	99.51413
8	19.164	0.0364	4025.608	0.06324	15.2662	485.937	99.51406
9	21.625	0.0363	4027.561	0.06307	15.2684	486.007	99.51399
10	24.102	0.0362	4029.494	0.06289	15.2706	486.077	99.51392

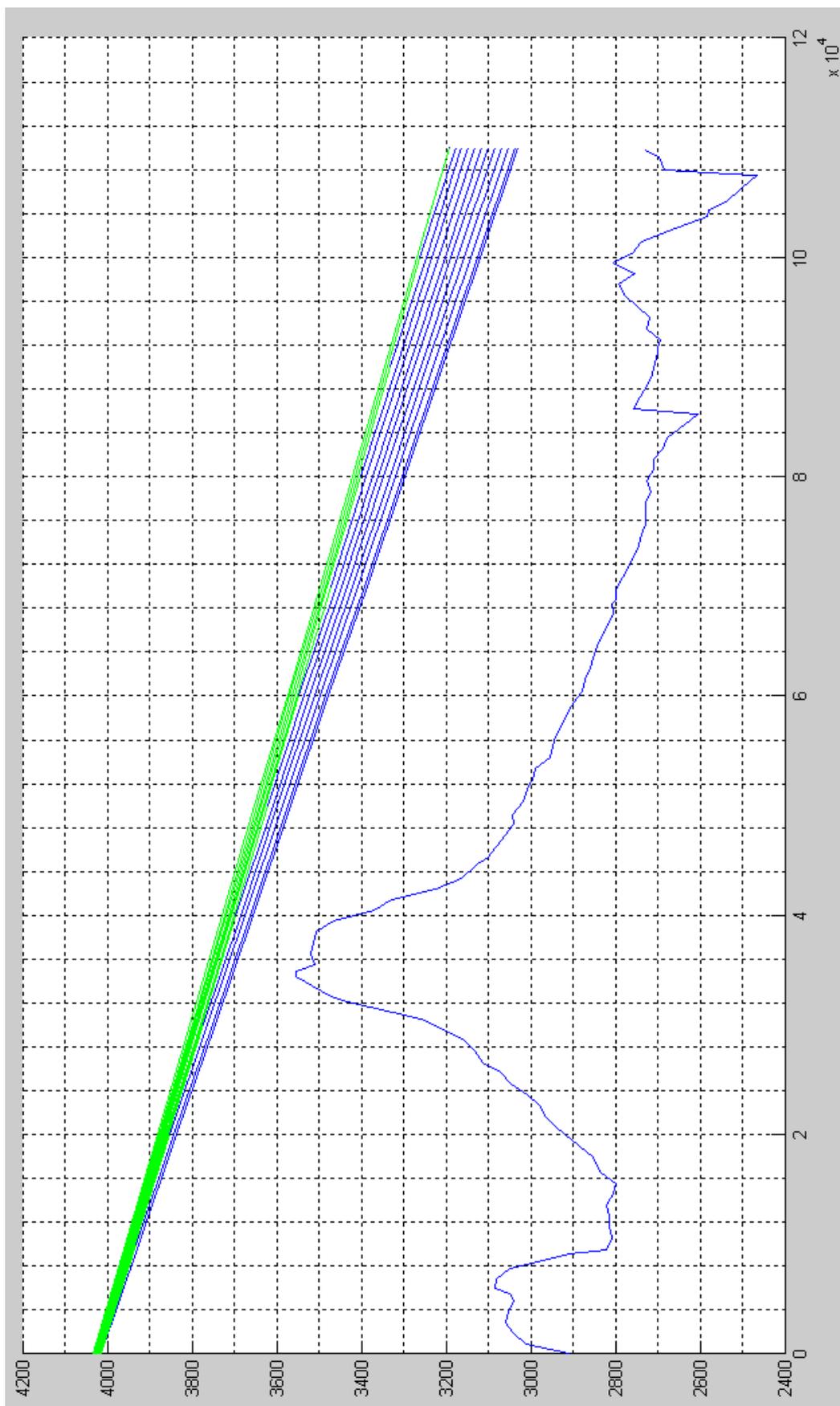




Diesel 2 - Diesel Premium

Posición	Tiempo s	Caudal m ³ /s	Piezométrica m	FLM	Volumen Mezcla m ³	Longitud Mezcla m	Eficiencia 0/0
0	0.000	0.0373	4010.272	0.06467	15.2581	485.682	99.51432
1	2.347	0.0372	4012.269	0.06449	15.2602	485.749	99.51425
2	4.708	0.0371	4014.247	0.06432	15.2623	485.816	99.51418
3	7.083	0.0370	4016.205	0.06415	15.2645	485.883	99.51412
4	9.472	0.0369	4018.144	0.06398	15.2665	485.949	99.51405
5	11.875	0.0367	4020.065	0.06381	15.2686	486.016	99.51398
6	14.292	0.0366	4021.966	0.06364	15.2707	486.083	99.51392
7	16.723	0.0365	4023.849	0.06347	15.2728	486.149	99.51385
8	19.167	0.0364	4025.714	0.06331	15.2749	486.216	99.51378
9	21.625	0.0363	4027.561	0.06314	15.2770	486.282	99.51372
10	24.098	0.0362	4029.390	0.06297	15.2791	486.349	99.51365





ANEXO 7

***INCIDENCIA DE LAS VARIABLES EN LA
FÓRMULA DE LONGITUD DE MEZCLA***

VisCin1	VisCin2	deltaRe1	deltaRe2	df1_dRugrel	df2_dRugrel	df1_dRe	df2_dRe	deltaf1	deltaf2	deltaLM
0.35	0.80	12783.469	15265.938	-8.45	-42.65	-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0097	-0.0510	-112.98
0.35	0.90	12783.469	15172.037	-8.45	-42.34	-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0097	-0.0506	-112.40
0.35	1.00	12783.469	14808.500	-8.45	-42.04	-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0097	-0.0498	-110.91
0.35	3.90	12783.469	5776.716	-8.45	-35.35	-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0097	-0.0285	-74.39
0.35	4.00	12783.469	5648.938	-8.45	-35.16	-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0097	-0.0282	-73.80
0.35	6.00	12783.469	3910.167	-8.45	-31.84	-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0097	-0.0231	-65.09
0.80	0.90	15265.938	15172.037	-6.94	-42.34	-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0101	-0.0506	-113.37
0.80	1.00	15265.938	14808.500	-6.94	-42.04	-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0101	-0.0498	-111.87
0.80	3.90	15265.938	5776.716	-6.94	-35.35	-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0101	-0.0285	-75.36
0.80	4.00	15265.938	5648.938	-6.94	-35.16	-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0101	-0.0282	-74.77
0.80	6.00	15265.938	3910.167	-6.94	-31.84	-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0101	-0.0231	-66.05
0.90	1.00	15172.037	14808.500	-6.63	-42.04	-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0099	-0.0498	-111.37
0.90	3.90	15172.037	5776.716	-6.63	-35.35	-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0099	-0.0285	-74.86
0.90	4.00	15172.037	5648.938	-6.63	-35.16	-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0099	-0.0282	-74.27
0.90	6.00	15172.037	3910.167	-6.63	-31.84	-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0099	-0.0231	-65.56
1.00	3.90	14808.500	5776.716	-6.33	-35.35	-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0096	-0.0285	-74.06
1.00	4.00	14808.500	5648.938	-6.33	-35.16	-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0096	-0.0282	-73.47
1.00	6.00	14808.500	3910.167	-6.33	-31.84	-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0096	-0.0231	-64.76
3.90	4.00	5776.716	5648.938	0.35	-35.16	-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0024	-0.0282	-54.70
3.90	6.00	5776.716	3910.167	0.35	-31.84	-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0024	-0.0231	-45.98
4.00	6.00	5648.938	3910.167	0.54	-31.84	-4.4157e-007	-1.9925e-006	-0.0022	-0.0231	-45.60

ANEXO 8

DIAGRAMA DE PARTIDAS EN POLIDUCTOS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. TEMAS AFINES DESARROLLADOS EN LA INSTITUCIÓN

- **VIVANCO Oswaldo, Modulación del tramo Páramo-Puerto Quito del OCP, EPN Quito, 2011.**

2. OTRAS PUBLICACIONES:

- Lurie, V. M., **Modeling of Oil Product and Gas Pipeline Transportation**, 2008.
- Baptista, R. M., **Mixing Volume Evaluation under Pumping Shut-down Conditions**, Proc. of the ASME International Pipeline Conference, 2000. Vol. 2.
- Yoon, M. **Pipeline system automation and control, Pipeline Engineering Monograph Series**, 2007
- Murray, A. **Pipeline Design & Construction, 2006**. Third Edición
- ASME B31.4, "Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other", Liquids", 2002.
- API 5L, "Specification for Line Pipe", 2004.

3. PÁGINAS WEB

- <http://www.eppetroecuador.ec/GerenciaTransporte/index.htm>
- <http://www.onepetro.org/mslib/servlet/onepetropreview?id=PSIG-0111>
- <http://www.scribd.com/doc/94325099/Densidad-y-Gravedad-Especificas>
- <http://www.powerstroke.org/forum/bio-diesel-alternative-fuels-supplements/56114-methanol-vs-kerosene-2.html>
- <http://www.oil-price.net/?gclid=CKCor5r9n7cCFRJP7AodbCAAew>
- <http://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=jet-fuel>