

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**

**ESCUELA DE POSGRADO**

UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“MODELADO MATEMÁTICO DE LA HOMOGENEIZACIÓN EN  
LÍNEA POR GRAVEDAD PARA OBTENCIÓN DE GASOHOLES”**

TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN  
INGENIERÍA QUÍMICA

**AUTOR**

EDUARDO ANTONIO BURGOS RUIDÍAS

**ASESOR**

Mg. LEONARDO FÉLIX MACHACA GONZALES

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA: 35.

Callao, 2023

PERÚ



## INFORMACIÓN BÁSICA

FACULTAD	:	Facultad de Ingeniería Química.
UNIDAD DE POSGRADO	:	Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química.
TÍTULO	:	Modelado Matemático de la Homogeneización en Línea por Gravedad para obtención de Gasoholes.
AUTOR	:	Bach. Burgos Ruidías, Eduardo Antonio.
DNI	:	43897337
ASESOR	:	Mg. Machaca Gonzales, Leonardo Félix.
CÓDIGO ORCID	:	0000-0002-3023-1470
DNI	:	07275983
LUGAR DE EJECUCIÓN	:	Gabinetes de la Universidad Nacional del Callao.
UNIDAD DE ANÁLISIS	:	Modelado matemático en la homogeneización de líquidos.
TIPO	:	Aplicativo.
ENFOQUE	:	Cuantitativo.
DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	:	No experimental.
TEMA OCDE	:	Simulación de procesos.

## HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN

La presente tesis fue sustentada por el señor Bachiller Eduardo Antonio Burgos Ruidías ante el jurado de sustentación de tesis conformado por los siguientes docentes:

Dra. Sanz Falcón, Lida Carmen – Presidente

Dr. Medina Collana, Juan Taumaturgo – Secretario

Mg. Díaz Gutierrez, Albertina – Miembro

Mg. Cabrera Arista, César – Miembro

Mg. Machaca Gonzales, Leonardo Félix – Asesor

Nº de acta : 042 de Sustentación de Tesis del III Ciclo Taller de Tesis para obtener el Grado Académico de Maestro en Ingeniería Química.

Nº de libro : 01

Folio : 44

Fecha de aprobación : 21 de mayo de 2023

## Document Information

Analyzed document	TESIS BURGOS.pdf (D163152697)
Submitted	4/4/2023 4:20:00 PM
Submitted by	
Submitter email	fiq.posgrado@unac.edu.pe
Similarity	2%
Analysis address	fiq.posgrado.unac@analysis.arkund.com

## Sources included in the report

<b>SA</b>	<b>SantiagoHenriquez_V1.pdf</b> Document SantiagoHenriquez_V1.pdf (D77747239)		7
<b>SA</b>	<b>34638-Cárdenas Alvarez, Christian Benito.pdf</b> Document 34638-Cárdenas Alvarez, Christian Benito.pdf (D103349781)		1
<b>SA</b>	<b>MEMORIA_TFG_Changguo Zhou.pdf</b> Document MEMORIA_TFG_Changguo Zhou.pdf (D75521328)		2
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.petroperu.com.pe/productos/combustibles/gasohol-superplus/">https://www.petroperu.com.pe/productos/combustibles/gasohol-superplus/</a> Fetched: 4/4/2023 4:50:00 PM		3
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.petroperu.com.pe/productos/combustibles/gasolina-superplus/">https://www.petroperu.com.pe/productos/combustibles/gasolina-superplus/</a> Fetched: 4/4/2023 4:50:00 PM		1
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.ssecoconsulting.com/blending-en-refinacion-petroleo.html">https://www.ssecoconsulting.com/blending-en-refinacion-petroleo.html</a> Fetched: 4/4/2023 4:50:00 PM		1
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.esss.co/es/blog/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/">https://www.esss.co/es/blog/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/</a> Fetched: 4/4/2023 4:50:00 PM		1
<b>W</b>	URL: <a href="https://jalopnik.com/a-brief-history-of-gasoline-how-gas-got-into-our-lives-1846958607">https://jalopnik.com/a-brief-history-of-gasoline-how-gas-got-into-our-lives-1846958607</a> Fetched: 4/4/2023 4:49:00 PM		2
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.eesi.org/papers/view/fact-sheet-a-brief-history-of-octane">https://www.eesi.org/papers/view/fact-sheet-a-brief-history-of-octane</a> Fetched: 4/4/2023 4:49:00 PM		1
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.emerson.com/en-us/catalog/automation-solutions/measurement-instrumentation/blending...">https://www.emerson.com/en-us/catalog/automation-solutions/measurement-instrumentation/blending...</a> Fetched: 4/4/2023 4:49:00 PM		1
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.mr-cfd.com/introduction-to-ansys-fluent-a-beginners-guide/">https://www.mr-cfd.com/introduction-to-ansys-fluent-a-beginners-guide/</a> Fetched: 4/4/2023 4:49:00 PM		1
<b>W</b>	URL: <a href="https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-37619-2_5">https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-37619-2_5</a> Fetched: 4/4/2023 4:50:00 PM		1
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAH/ESTUDIO%20DE%20CARACTERIZACION/REFINERIA%20...">https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAH/ESTUDIO%20DE%20CARACTERIZACION/REFINERIA%20...</a> Fetched: 4/4/2023 4:50:00 PM		1

## **DEDICATORIA**

A mi familia, por su  
perenne apoyo.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por su infinita  
paciencia.

## ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	3
ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	7
RESUMEN	12
ABSTRACT	13
INTRODUCCIÓN	14
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.1 Descripción de la realidad problemática	15
1.2 Formulación del problema	17
1.2.1 Problema general	17
1.2.2 Problemas específicos	17
1.3 Objetivos	17
1.3.1 Objetivo general	17
1.3.2 Objetivos específicos	17
1.4 Justificación	17
1.5 Delimitantes de la investigación	18
1.5.1 Teórica	18
1.5.2 Temporal	18
1.5.3 Espacial	18
II. MARCO TEÓRICO	19
2.1 Antecedentes: Internacional y nacional	19
2.1.1 Antecedentes internacionales	19
2.1.2 Antecedentes nacionales	23
2.2 Bases teóricas	24
2.2.1 Modelado de procesos y grados de libertad	24
2.2.2 Turbulencia	24
2.2.3 Modelos de turbulencia	28
2.2.4 Dominios de flujo y volúmenes de control	31
2.2.5 Pérdidas de carga y fricción	33
2.2.6 Modelado multifásico	36



2.2.7	Discretización y solución	39
2.3	Marco conceptual	41
2.4	Definición de términos básicos	42
III.	HIPÓTESIS Y VARIABLES	45
3.1	Hipótesis	45
3.1.1	Operacionalización de variables	45
IV.	METODOLOGÍA DEL PROYECTO	47
4.1	Diseño metodológico	47
4.2	Método de investigación	47
4.3	Población y muestra	104
4.4	Lugar de estudio	104
4.5	Técnicas e instrumentos para la recolección de la información	104
4.6	Análisis y procesamiento de datos	105
4.7	Aspectos éticos en Investigación	105
V.	RESULTADOS	106
5.1	Resultados descriptivos	106
5.1.1	Modelo matemático	106
5.1.2	Solución y simulación del modelo	109
5.2	Resultados inferenciales	109
5.3	Otro tipo de resultados estadísticos	109
VI.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	111
6.1	Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados	111
6.2	Contrastación de los resultados con otros estudios similares	113
6.3	Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes	114
VII.	CONCLUSIONES	115
VIII.	RECOMENDACIONES	116
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117
	ANEXOS	126

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Definición operacional de las variables.	46
Tabla 2 Flujos de gasohol, etanol y gasolina a considerarse en el modelo.	52
Tabla 3 Propiedades del etanol y la gasolina a considerarse en el modelo.	53
Tabla 4 Diámetros de tuberías y velocidades de flujo para los fluidos que se emplearán en el modelo.	54
Tabla 5 Dimensiones del tanque de gasolina empleadas para la solución del modelo.	55
Tabla 6 Dimensiones del tanque de etanol empleadas para la solución del modelo.	56
Tabla 7 Especificación del sistema de gasolina para el Volumen de Control N° 1.	57
Tabla 8 Especificación del sistema de etanol para el Volumen de Control N° 2.	59
Tabla 9 Valores de las constantes asumidos durante la solución del modelo.	60
Tabla 10 Variación en el tiempo de la presión de la corriente de gasolina antes de su ingreso al dominio de flujo para la primera corrida.	73
Tabla 11 Variación en el tiempo de la presión de la corriente de etanol antes de su ingreso al dominio de flujo para la primera corrida.	74
Tabla 12 Condiciones de frontera empleadas en el dominio de flujo para la primera corrida.	75
Tabla 13 Condiciones de frontera empleadas en el dominio de flujo para la segunda corrida.	77
Tabla 14 Condiciones de frontera empleadas en el dominio de flujo para la primera prueba de la tercera corrida.	79
Tabla 15 Condiciones de frontera empleadas en el dominio de flujo para la tercera corrida.	80
Tabla 16 Condiciones de frontera empleadas en el dominio de flujo para la cuarta corrida.	82

Tabla 17 Variación en el tiempo de la presión de la corriente de gasolina antes de su ingreso al dominio de flujo para la quinta corrida.	85
Tabla 18 Variación en el tiempo de la presión de la corriente de etanol antes de su ingreso al dominio de flujo para la quinta corrida.	86
Tabla 19 Condiciones de frontera empleadas en el dominio de flujo para la primera prueba de la quinta corrida.	87
Tabla 20 Condiciones de frontera empleadas en el dominio de flujo para la quinta corrida.	88
Tabla 21 Condiciones de frontera empleadas en el dominio de flujo para la sexta corrida.	90
Tabla 22 Variación en el tiempo de la presión de la corriente de gasolina antes de su ingreso al dominio de flujo para la séptima corrida.	93
Tabla 23 Variación en el tiempo de la presión de la corriente de etanol antes de su ingreso al dominio de flujo para la séptima corrida.	94
Tabla 24 Condiciones de frontera empleadas en el dominio de flujo para la primera prueba de la séptima corrida.	95
Tabla 25 Condiciones de frontera empleadas en el dominio de flujo para la séptima corrida.	95
Tabla 26 Condiciones de frontera empleadas en el dominio de flujo para la octava corrida.	98
Tabla 27 Variación en el tiempo de la presión de la corriente de gasolina antes de su ingreso al dominio de flujo para la novena corrida.	100
Tabla 28 Variación en el tiempo de la presión de la corriente de etanol antes de su ingreso al dominio de flujo para la novena corrida.	101
Tabla 29 Condiciones de frontera empleadas en el dominio de flujo para la primera prueba de la novena corrida.	102
Tabla 30 Condiciones de frontera empleadas en el dominio de flujo para la décima corrida.	104
Tabla 31 Modelo matemático para los volúmenes de control.	106
Tabla 32 Modelo matemático para el dominio de flujo.	107
Tabla 33 Resumen de resultados obtenidos en las diez corridas.	110

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Selección de los volúmenes de control y dominio de flujo a ser estudiados para el modelado.	48
Figura 2 Esquema de la especificación de los volúmenes de control.	58
Figura 3 Malla empleada para la solución del dominio de flujo.	72
Figura 4 Perfil de concentraciones de etanol en la primera corrida.	75
Figura 5 Ampliación del punto de inyección de etanol en la primera corrida.	76
Figura 6 Concentración de etanol a lo largo de la tubería en la primera corrida.	76
Figura 7 Perfil de concentraciones de etanol en la segunda corrida.	78
Figura 8 Ampliación del punto de inyección de etanol en la segunda corrida.	78
Figura 9 Concentración de etanol a lo largo de la tubería en la segunda corrida.	78
Figura 10 Fluctuaciones de presión de la primera prueba de la tercera corrida.	80
Figura 11 Perfil de concentraciones de etanol en la tercera corrida.	81
Figura 12 Presiones de las corrientes en la tercera corrida.	81
Figura 13 Concentración de etanol a lo largo de la tubería en la tercera corrida.	82
Figura 14 Perfil de concentraciones de etanol en la cuarta corrida.	83
Figura 15 Presiones de las corrientes en la cuarta corrida.	83
Figura 16 Concentración de etanol a lo largo de la tubería en la cuarta corrida.	84
Figura 17 Fluctuaciones de presión de la primera prueba de la quinta corrida.	87
Figura 18 Concentración de etanol a lo largo de la tubería en la prueba de la quinta corrida.	88
Figura 19 Perfil de concentraciones de etanol en la quinta corrida.	89
Figura 20 Presiones de las corrientes obtenidas en la quinta corrida.	89

Figura 21 Concentración de etanol a lo largo de la tubería en la quinta corrida.	90
Figura 22 Perfil de concentraciones de etanol en la sexta corrida.	91
Figura 23 Presiones de las corrientes obtenidas en la sexta corrida.	91
Figura 24 Concentración de etanol a lo largo de la tubería en la sexta corrida.	92
Figura 25 Fluctuaciones de presión de la primera prueba de la séptima corrida.	95
Figura 26 Concentración de etanol a lo largo de la tubería en la prueba de la séptima corrida.	96
Figura 27 Perfil de concentraciones de etanol en la séptima corrida.	96
Figura 28 Presiones de las corrientes obtenidas en la séptima corrida.	97
Figura 29 Concentración de etanol a lo largo de la tubería en la séptima corrida.	97
Figura 30 Perfil de concentraciones de etanol en la octava corrida.	99
Figura 31 Concentración de etanol a lo largo de la tubería en la octava corrida.	99
Figura 32 Fluctuaciones de presión de la primera prueba de la novena corrida.	102
Figura 33 Perfil de concentraciones de etanol en la novena corrida.	103
Figura 34 Concentración de etanol a lo largo de la tubería en la novena corrida.	103

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

$CFD$	Computational Fluid Dynamics (Dinámica de Fluidos Computacional).
$C_2, C_{1\varepsilon}$	Constantes del modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ realizable.
$c_E$	Fracción en masa de la fase secundaria (etanol).
$C_\mu$	Constante de proporcionalidad para la viscosidad turbulenta, que la relaciona con $k$ y $\varepsilon$ en el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ . Adimensional.
$d_d$	Diámetro de partícula de la fase dispersa, en $m$ en el SI.
$D$	Diámetro, en $m$ en el SI.
$f$	Factor de fricción de Darcy-Weisbach. Adimensional.
$f_{drag}$	Función de arrastre. Adimensional.
$\vec{F}$	Fuerza de cuerpo.
$G_b$	Generación de energía cinética turbulenta debido a la flotabilidad, en $kg/(m.s^3)$ en el SI.
$G_k$	Generación de energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidad medios, en $kg/(m.s^3)$ en el SI.
$h_{bomba}$	Cabeza de presión agregada al fluido mediante uso de una bomba, en $m$ en el SI.
$h_{turbina}$	Cabeza de presión sustraída del fluido mediante uso de una turbina, en $m$ en el SI.
$h_L$	Pérdida de carga del fluido entre dos puntos debido a todos los componentes del sistema de tubería, diferentes a la bomba y a la turbina, en $m$ en el SI.

$h_a$	Pérdida de carga debida a un accesorio, en $m$ en el SI.
$K_a$	Coefficiente de pérdida o de resistencia del accesorio en el cual se evalúa la pérdida secundaria. Adimensional.
$k$	Energía cinética turbulenta, en $m^2/s^2$ en el SI.
$L$	Longitud de tubería, en $m$ en el SI.
<b>MSDS</b>	Material Safety Data Sheet (Hoja de Datos de Seguridad).
$\dot{m}_{GE}$	Velocidad de flujo de masa desde la fase gasolina hacia la fase etanol, en $kg/(m^2.s)$ en el SI.
$\dot{m}_{EG}$	Velocidad de flujo de masa desde la fase etanol hacia la fase gasolina, en $kg/(m^2.s)$ en el SI.
$L_s$	Longitud característica del sistema, en $m$ en el SI.
$\vec{g}$	Vector aceleración de la gravedad, en $m/s^2$ en el SI.
$P$	Presión, en $Pa$ en el SI.
$\bar{P}$	Presión media en el tiempo del fluido, en $Pa$ en el SI.
<b>RSM</b>	Modelo de estrés de Reynolds.
<b>SI</b>	Sistema Internacional de Unidades.
$S$	Módulo del tensor velocidad deformación medio, en $s^{-1}$ en el SI.
$S_{ij}$	Componentes del tensor velocidad de deformación media, es decir, la velocidad a la cual el fluido se deforma por expansión, compresión o esfuerzo de corte. En el SI, sus unidades son $s^{-1}$ .
$t$	Tiempo, en $s$ en el SI.

$u$	Componente de la velocidad de flujo perpendicular al vector gravitacional, en $m/s$ en el SI.
$v$	Componente de la velocidad de flujo paralela al vector gravitacional, en $m/s$ en el SI.
$\nu$	Viscosidad dinámica del fluido, en $m^2/s$ en el SI.
$\vec{V}$	Vector velocidad del fluido, en $m/s$ en el SI.
$\vec{V}_{a,E}$	Vector de velocidad de deriva de la fase secundaria (etanol), en $m/s$ en el SI.
$\vec{V}_m$	Vector velocidad de la mezcla, en $m/s$ en el SI.
$\vec{V}_{EG}$	Vector de velocidad relativa de la fase secundaria (etanol) respecto a la primaria (gasolina), en $m/s$ en el SI.
$V_{prom}$	Velocidad promedio del fluido en la tubería, en $m/s$ en el SI.
$V_s$	Velocidad característica del sistema, en $m/s$ en el SI.
$V_x$	Componente $x$ del vector velocidad del fluido ( $\vec{V}$ ), en $m/s$ en el SI.
$\bar{V}_x$	Valor medio en el tiempo de la componente $x$ del vector velocidad del fluido ( $\vec{V}$ ), en $m/s$ en el SI.
$V'_x$	Valor fluctuante en el tiempo de la componente $x$ del vector velocidad del fluido ( $\vec{V}$ ), en $m/s$ en el SI.
$\bar{\vec{V}}$	Vector velocidad media en el tiempo del fluido, en $m/s$ en el SI.
$\bar{V}_i, \bar{V}_j$	Componentes del vector velocidad media en el tiempo del fluido, expresadas en $m/s$ en el SI.
$\vec{V}'$	Vector velocidad fluctuante en el tiempo del fluido, en $m/s$ en el SI.
$\bar{V}'_i, \bar{V}'_j$	Componentes del Vector velocidad fluctuante en el tiempo del fluido, en $m/s$ en el SI.



$t_s$	Tiempo de respuesta del sistema, en s en el SI.
$\bar{\tau}^{(v)}$	Tensor de segundo orden de los estreses viscosos medios en el tiempo, en $kg/(m.s^2)$ en el SI.
$\bar{\tau}^{(v)}_{ij}$	Componente media en el tiempo del tensor de estreses viscosos.
$\bar{\tau}^{(t)}$	Tensor de segundo orden de los estreses de Reynolds medios en el tiempo, en $kg/(m.s^2)$ en el SI.
$\bar{\tau}^{(t)}_{ij}$	Componente media en el tiempo del tensor de estreses de Reynolds.
$\tau_d$	Tiempo de respuesta de la partícula, en s en el SI.
$Re$	Número de Reynolds. Para la función de arrastre $f_{drag}$ es el número de Reynolds relativo. Adimensional.
$St$	Número de Stokes. Adimensional.
$Y_M$	Contribución de la dilatación fluctuante en la turbulencia compresible a la velocidad de disipación global, en $kg/(m.s^3)$ en el SI.
$z$	Altura respecto a un nivel de referencia, en $m$ en el SI.
$\vec{a}$	Vector aceleración, en $m/s^2$ en el SI.
$\alpha$	Factor de corrección de la energía cinética. También fracción volumétrica según la ecuación. Adimensional.
$\beta$	Parámetro de carga de partículas. Adimensional.
$\vec{\delta}_i, \vec{\delta}_i$	Vectores unitarios en las direcciones de los ejes coordenados, conocidos también como $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ .
$\varepsilon$	Tasa de disipación de turbulencia, en $m^2/s^3$ en el SI.
$\epsilon$	Rugosidad absoluta de la tubería, en $m$ en el SI.

$\eta_t$	Difusividad turbulenta, en $m^2/s$ en el SI.
$\gamma_\gamma$	Relación temporal entre la escala de tiempo de los remolinos de turbulencia energética afectados por el efecto de trayectorias cruzadas, y el tiempo de respuesta (relajación) de la partícula. Adimensional.
$\rho$	Densidad, en $kg/m^3$ en el SI.
$\rho_m$	Densidad de la mezcla, en $kg/m^3$ en el SI.
$\rho_d$	Densidad de la fase dispersa, en $kg/m^3$ en el SI.
$\mu$	Viscosidad absoluta, en $Pa.s$ en el SI.
$\mu_m$	Viscosidad absoluta de la mezcla, en $Pa.s$ en el SI.
$\mu_q$	Viscosidad absoluta de la fase continua, en $Pa.s$ en el SI.
$\mu_t$	Viscosidad turbulenta o de remolino, en $Pa.s$ en el SI.
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	Números de turbulencia de Prandtl para $k$ y $\varepsilon$ del modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ realizable.
$\sigma_t$	Relación de los números de Prandtl/Schmidt. Adimensional.
$\Omega_{ij}$	Componentes del tensor velocidad de rotación media. En el SI, sus unidades son $s^{-1}$ .

## RESUMEN

Se ha investigado el modelamiento matemático de homogeneización en línea por gravedad para la obtención de gasoholes, para lo cual se ha realizado en varias etapas, dividiendo el sistema global en dos volúmenes de control y en un dominio de flujo, cuyos dimensionamientos y condiciones de operación tomaron como referencia escenarios nacionales. Luego de determinar las propiedades de los fluidos a mezclar y considerar flujos fijos, se resolvieron los volúmenes de control de gasolina y etanol haciendo uso de un estado cuasi-estacionario con ayuda de Microsoft Excel 2019, donde se obtenían valores de presión que disminuían con el paso del tiempo haciendo uso de la ecuación de la energía. Estos valores se tomaron como condiciones de frontera para el dominio de flujo, en el que se resolvió la mezcla aplicando las ecuaciones de continuidad, de conservación de momento, modelo de turbulencia  $k-\epsilon$  realizable y modelo de mezcla bifásica simplificada con ayuda del software Ansys FLUENT 19.2. Se obtuvo un modelo de cuarenta y tres ecuaciones cuya solución numérica permitió ver que, para dos flujos fijos de gasolina y etanol a mezclarse, el paso del tiempo y la disminución de presión progresiva no afectaban la longitud de mezcla por gravedad, que resultó ser menor para tuberías de mezcla de menor diámetro. Los resultados se compararon con resultados de otras investigaciones, encontrando concordancias.

**PALABRAS CLAVE:** Homogeneización en línea, gasohol, modelo matemático, gravedad.

## ABSTRACT

The mathematical modeling for pipeline mixing by gravity has been investigated in order to obtain gasohol. The project was divided in several stages, taking the global system as two control volumes and one single flow domain. Local scenarios were considered as reference for dimensioning and operating conditions, and after setting physical properties and flows of fluids control volumes of gasoline and ethanol were solved by using a quasi-steady state with Microsoft Excel 2019. Pressure values that decreased with time were obtained, and these values were used as boundary conditions for the flow domain, in which the mixing process was solved by applying the equations of continuity, momentum, realizable  $k-\varepsilon$  turbulence model and a simplified biphasic mixing model. The flow domain was solved with Ansys FLUENT 19.2, and a model of forty-three equations was obtained. Numerical solution showed that for fixed flows of gasoline and ethanol to be mixed, time has no influence and neither has pressure over the mixing length by gravity. It was found that mixing length was shorter for smaller diameter mixing pipes. Final results were compared with results from other investigations, and concordances were found.

**KEY WORDS:** Pipeline mixing, gasohol, mathematical model, gravity.

## INTRODUCCIÓN

Las operaciones de mezclado en la industria son una práctica común para la obtención de productos terminados. Esta operación puede realizarse en un contenedor o también en una línea de proceso, con el usual empleo de bombas como medios impulsores u otros medios mecánicos de agitación. Sin embargo, si se dispone de gradientes de altura entre tanques de productos intermedios la diferencia de carga estática puede emplearse para el mezclado y homogeneización en línea por gravedad.

En la actualidad, de acuerdo al D.S. N° 021-2007-EM, el empleo de gasohol a nivel nacional es obligatorio. Los gasoholes son mezclas de los diversos tipos de gasolina con alcohol carburante con la finalidad de oxigenar los combustibles y disminuir las emisiones nocivas mediante combustiones más completas. La gasolina y el alcohol carburante, en su calidad de líquidos, son susceptibles de estudiarse bajo los lineamientos de los procesos de mezcla de fluidos para la obtención de un producto terminado. Por tanto, puede realizarse la evaluación de mezcla por gravedad tomando ventaja de la carga estática existente entre tanques de gasolina y alcohol carburante en un nivel elevado, respecto a un tanque de gasohol ubicado por debajo.

Es conveniente iniciar el estudio de este proceso mediante el modelado matemático del mismo. El modelamiento matemático y por tanto el análisis dinámico del proceso permitirán ver el grado de viabilidad de emplear este método de mezcla en casos reales de ingeniería y, a futuro, servir también de base para el estudio del sistema de control más conveniente.

## I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1 Descripción de la realidad problemática.

Es un hecho comprobado el empleo de combustibles fósiles en la vida diaria del ser humano, lo cual ha significado grandes mejoras en diversos aspectos de su vida diaria y, aunque parezca contradictorio, ha opacado los riesgos y efectos laterales debidos a su empleo [1]. Este empleo de los combustibles fósiles en la industria moderna se remonta alrededor de 1850, siendo el kerosene uno de los primeros productos refinados a partir del petróleo [2]. La gasolina aparecería después como un subproducto, pero se volvió rápidamente el combustible preferido para automóviles debido a su alta energía de combustión y a su capacidad de mezclarse fácilmente con aire en un carburador [3].

A pesar de que el reemplazo de los combustibles fósiles como fuente energética se viene realizando lentamente, no es posible predecir con certeza cuándo dejaría de emplearse pues, aunque algunas fuentes de cálculo bordean los cien años en las estimaciones de reservas, el avance tecnológico y la eficiencia en su empleo son factores que afectan drásticamente estos cálculos [4]. Esto permite entrever que el empleo de los derivados del petróleo, como la gasolina, es todavía una necesidad tangible a mediano plazo. De la gasolina, su propiedad más importante es su poder antidetonante, que se expresa en función de *números de octano* definidos empíricamente [5]. Las gasolinas con bajos números de octano pueden producir combustión espontánea en los cilindros del motor antes de que estos lleguen al volumen de compresión deseado y sean encendidos por chispa, produciendo golpeteo en el motor [6]. Así, mientras más alto sea el número de octano, mejor será la combustión, por lo que a la gasolina en un principio se le agregaron aditivos como el plomo tetraetilo para el incremento del octanaje, hasta que se descubrió que se venían depositando en la atmósfera cantidades crecientes de  $PbO_2$  provenientes de la combustión [7]. Al plomo tetraetilo le siguieron aditivos como el éter metil terbutílico (MTBE) y mezclas de aromáticos como benceno, tolueno, xileno y etilbenceno (complejo

BTEX). Sin embargo, luego de inquietudes sobre salud y medio ambiente correspondientes al uso de estos compuestos, se llegó a la adición de etanol a la gasolina terminada, incrementando el número de octano de la gasolina y disminuyendo la toxicidad de las fuentes proveedoras de octanaje [8].

A nivel nacional, la adición de etanol a la gasolina para formar la mezcla denominada *gasohol* es obligatoria. Esta mezcla está constituida por gasolina y 7.8%v de alcohol carburante, siendo este último el etanol anhidro mezclado con una sustancia desnaturalizante [9]. La mezcla puede llevarse a cabo en tanque, aunque en muchos casos la tubería puede ser el mejor lugar para ello, además de ser más económico [10].

Las tecnologías de mezcla en línea (es decir, en tubería) de alcohol carburante y gasolina incluyen sistemas o kits (*skids*) de mezcla que hacen empleo de energía de bombeo para ambos [11, 12, 13]. Sin embargo, la lógica sugiere que de existir una diferencia de altura entre los tanques de almacenamiento de materia prima y otro tanque en un nivel inferior sería posible emplear ese gradiente para la formulación del gasohol, con el consecuente ahorro de energía. Esto implicaría, en primer término, desarrollar las ecuaciones que rigen los procesos de flujo y mezcla por gravedad de ambos líquidos en una línea de flujo, a fin de obtener el modelo que describa la dinámica del proceso.

Por lo descrito, esta investigación busca contribuir al conocimiento respecto a la formulación de los gasoholes, toda vez que la obtención de un modelo matemático juega un rol central en la comprensión del proceso, así como en el desarrollo futuro de estrategias de control y condiciones óptimas de operación [14].

## **1.2 Formulación del problema.**

### **1.2.1 Problema general.**

¿Cómo se puede modelar matemáticamente la homogeneización en línea por gravedad para la obtención de gasoholes?

### **1.2.2 Problemas específicos.**

¿Cómo influye el tiempo en el modelo de homogeneización?

¿Cómo influyen las presiones del dominio de flujo en el modelo de homogeneización?

## **1.3 Objetivos.**

### **1.3.1 Objetivo general.**

Modelar matemáticamente la homogeneización en línea por gravedad para la obtención de gasoholes.

### **1.3.2 Objetivos específicos.**

Determinar la influencia del tiempo en el modelo de homogeneización.

Determinar la influencia de las presiones del dominio de flujo en el modelo de homogeneización.

## **1.4 Justificación.**

La preparación de gasoholes en tanques a partir de la adición de productos intermedios en ellos requiere una inversión de tiempo y energía de bombeo en la circulación de la cual podría ser posible prescindir. En su forma convencional, la formulación por circulación en tanque implica adicionar las proporciones de productos intermedios en el tanque, para luego accionar un circuito de bombeo cerrado donde se succiona la mezcla desde tanque por una línea y se regresa por otra línea al mismo tanque durante un determinado número de horas hasta que exista homogeneidad. Existen alternativas de formulación en línea en el



mercado que emplean *skids* ensamblados de bombeo y *blending*, que pueden ser empleados para la formulación de gasoholes. No obstante, la presente investigación pretende tomar ventaja de algunas cotas existentes entre los tanques, puede ser posible modelar el proceso de formulación en línea de estos productos por acción de la gravedad, con la finalidad de mitigar tiempos de espera e impactos ambientales por un consumo innecesario de energía.

El desarrollo del presente trabajo se justifica también por la contribución a ahorros futuros de tiempo y energía en la formulación de gasoholes por mezclado, ya sea mediante circulación en tanque o el bombeo en sistemas o kits prefabricados.

## **1.5 Delimitantes de la investigación.**

### **1.5.1 Teórica**

La presente investigación estuvo delimitada en el ámbito del modelamiento y simulación de procesos de mezcla y homogeneización isotérmicos de líquidos newtonianos con densidad y viscosidad constantes, que abarcan fundamentos como la conservación de la masa y la conservación de la cantidad de movimiento.

### **1.5.2 Temporal**

El tiempo estimado para el desarrollo del trabajo fue de cuatro meses a partir de noviembre de 2022.

### **1.5.3 Espacial**

La investigación se realizó en los gabinetes de la Universidad Nacional del Callao.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes: Internacional y nacional.

#### 2.1.1 Antecedentes internacionales.

Zughbi, *et.al.* (2003) en su trabajo se propusieron como objetivo modelar el proceso de mezcla en tuberías empleando tes laterales para la inyección del segundo líquido a mezclar en la tubería por la que fluía el primero. Para ello, emplearon tanto métodos numéricos como experimentales, haciendo fluir mediante bombas agua fría por la tubería principal de 1", e inyectando agua caliente mediante una te lateral cuyo diámetro fue de ¼" y también de 1/8". Los cambios de temperatura fueron medidos de manera experimental para cuantificar así el grado de mezcla. Por otro lado, para el modelado y solución de las ecuaciones del modelo emplearon un sistema de mallas con elementos de 2 mm, no pudiendo emplear elementos más pequeños debido a limitaciones con sus recursos computacionales disponibles. Efectuaron la solución mediante el empleo del software FLUENT 6.0, usando el modelo de turbulencia  $k-\epsilon$  y el modelo de estrés de Reynolds (RSM). Como resultado, encontraron buena concordancia entre los resultados numéricos y experimentales, hallando que la longitud de tubería necesaria para el 95% de mezcla era una función de la relación entre la velocidad del líquido inyectado y la velocidad del líquido en la tubería principal, así como de la relación de diámetros de ambas tuberías. Entre sus recomendaciones destacan el hecho de no sugerir el empleo en la industria de tes de 90° dada la pobre calidad de mezclado para ciertas relaciones de velocidades [15].

Yu y Morales (2004), en su trabajo, se propusieron por objetivo aproximar propiedades de mezcla mediante el empleo de redes neurales estáticas y dinámicas. Como método, propusieron modelos matemáticos detallados para las propiedades estáticas y dinámicas de sistemas de mezclas de gasolinas. Como resultado, encontraron que estos sistemas de mezcla presentaban tanto propiedades estáticas como dinámicas. Los procedimientos estáticos fueron

modelados con redes neuronales estáticas y los procedimientos dinámicos fueron aproximados con redes neuronales dinámicas. Concluyeron que el método propuesto era más efectivo que usar solo redes neuronales estáticas o dinámicas para modelar la mezcla. Proporcionaron también simulaciones numéricas para ilustrar los enfoques del modelado neurológico [16].

Etchells y Meyer (2004), como coautores de un manual de mezcla industrial, plantearon por objetivo proporcionar una descripción general de la tecnología de mezcla de tuberías, así como la capacidad de seleccionar y dimensionar equipos para una variedad de aplicaciones. Para ello, efectuaron una investigación documental desarrollando el estado del arte existente hasta esa fecha, describiendo las opciones y correlaciones existentes para el mezclado en línea dependiendo del régimen de flujo (laminar o turbulento), y definiendo el resultado del proceso en función del Coeficiente de Variación (CoV). Para esto, brindaron distintas correlaciones tomando como referencia las investigaciones de otros autores, las que dependían tanto del tipo de elemento a emplear para el mezclado en línea (sea mezclador estático o mezclador por inyección lateral tipo "T"), así como del régimen de flujo gobernante. Producto de sus investigaciones, afirmaron que en muchos casos la tubería era el mejor lugar para la mezcla de fluidos, además de ser más económica. Sin embargo, señalaron que la base de conocimientos disponibles se expandiría conforme la física y química fundamental de los procesos de mezcla se volviera mejor entendida [10].

Xiaoou y Wen (2008), en su trabajo de investigación, se propusieron por objetivo obtener un modelo para un sistema de mezcla, reconociendo que un buen modelo es beneficioso para los fines de supervisión y predicción. Para ello, propusieron una red neural estática para aproximar las propiedades de mezcla, usando un mezclador e implementando un algoritmo de tiempos discretos mediante el enfoque de zona muerta. Efectuaron un análisis teórico de estabilidad y convergencia de las redes neuronales, obteniendo como resultado que el método empleado tenía un gran beneficio para la realización de modelos basados en control óptimo. Además, proporcionaron una aplicación real para

mezcla de petróleo crudo [17].

Aliyu, *et.al.* (2018) en su trabajo se propusieron por objetivo efectuar estudios de mezcla mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) sobre la mezcla de surfactante y salmuera en una tubería horizontal, para la instalación de superficie de recuperación de aceites en el campo petrolífero de Tanjung, Indonesia. Realizaron simulaciones numéricas para estudiar los campos de flujo y las características de mezcla de los flujos de líquido que convergen en forma de T, con condiciones de frontera basadas en la tasa de flujo de campo de 650 Bbl/día de inundación de surfactante, a una presión de 400 psi y una temperatura de 63 °F. Los diámetros de las tuberías de entrada y salida y 100 m de longitud fueron diseñados para el flujo líquido-líquido, empleando para la solución una malla tetraédrica no estructurada del volumen de fluido utilizando los programas *Grid Fluent Inc., Lebanon y NH*; así como el programa Ansys FLUENT para la solución. La malla utilizada para todos los cálculos posteriores del análisis contuvo 685,432 nodos y 3,530,488 elementos tetraédricos de primer orden, emplearon el modelo de turbulencia  $k-\epsilon$ , la ecuación de continuidad y las ecuaciones de Navier-Stokes. El resultado que obtuvieron fue sometido a un riguroso análisis de sensibilidad para asegurar la integridad del resultado. El resultado coincidió bien con el resultado de la literatura. Los tiempos de mezcla y las viscosidades dinámicas dependientes del tiempo de la mezcla líquida con diferentes viscosidades y diferentes densidades fueron predichos mediante simulación CFD. Se encontró que la mezcla líquida de alta viscosidad también tenía un gran efecto en un campo de flujo observado que se predijo mediante simulación CFD. El tiempo para lograr una mezcla homogénea de surfactante-salmuera para una concentración de surfactante del 2 % en la geometría diseñada según las propiedades fue de 1,210 segundos, lo que se traduce en 20 minutos de tiempo de mezclado. La longitud de mezcla para las propiedades de geometría bajo diseño para mezclar surfactante con una concentración del 2% fue de 72 m. Experimentando con diferentes concentraciones de surfactante, determinaron que una mayor concentración necesitaba un mayor tiempo y longitud de mezcla [18].

Sun, *et.al.* (2020) en su trabajo se propusieron por objetivo analizar la uniformidad y ley de mezcla de agua/cloro o agua/fertilizante en una tubería en flujo turbulento. Para ello, emplearon un jet vertical de solución salina inyectado en una tubería horizontal. Emplearon software de dinámica de fluidos computacional (CFD) para estudiar campos de flujo en conducciones de agua salina, usando también equipo experimental para su inyección mediante sistemas de bombeo. Consideraron cuatro variables para investigar los efectos de múltiples variaciones en uniformidad de mezcla: proporción de mezcla  $\delta$ , diámetro de la tubería  $D$ , caudal volumétrico en la tubería principal  $Q$ , y densidad salina  $s$ . Se seleccionó el coeficiente de variación ( $CoV$ ) como índice de evaluación de la mezcla uniformidad. La longitud de mezcla efectiva ( $L_{EML}$ , la distancia desde la entrada de solución salina hasta la posición de mezcla completa) fue elegida para analizar cuantitativamente la posición completamente mezclada de agua y solución salina en las tuberías. Emplearon en modelo de turbulencia  $k-\varepsilon$  y el modelo de mezcla, encontrando que los resultados de su modelo numérico concordaban bien con las mediciones experimentales y mostraron que su modelo podía predecir de manera efectiva el campo de concentración de agua y solución salina en la tubería. Basados en los resultados experimentales y simulados, hallaron que para una relación de mezcla, densidad salina y caudal volumétrico fijos, los valores de  $L_{EML}$  aumentaron significativamente con el aumento de los diámetros de las tuberías. Concluyeron que para una relación de mezcla fija y densidad salina constante la longitud de mezcla disminuía al disminuir los diámetros de las tuberías o los volúmenes de flujo. Por otro lado, cuando los diámetros de tubería y los volúmenes de flujo eran fijos, para obtener una menor longitud de mezcla era necesario incrementar la relación de mezcla. Además, adoptaron el análisis dimensional (D-A) para examinar las influencias de las cuatro variables en la  $L_{EML}$ , y su coeficiente de correlación de la ecuación de ajuste de curvas fue calculado en 0.996 [19].

### **2.1.2 Antecedentes nacionales.**

Gutiérrez (2006), en su tesis de pregrado, propuso como objetivo incrementar el beneficio económico de la Refinería Talara por disminución de los costos operativos de preparación, almacenamiento y despacho de gasolinas, mediante la implementación de un sistema de mezcla en línea, anticipándose a los requerimientos del mercado y a las nuevas especificaciones de calidad para las gasolinas. Para ello, efectuó una evaluación técnico-económica en la que el sistema se implementaría aprovechando los sistemas de tuberías existentes en la refinería (los cuales contaban con sus respectivos equipos de bombeo), implementando medidores y controladores que permitieran una automatización del proceso mediante lazos de control y analizadores en línea. En sus conclusiones señaló que con el nuevo sistema de mezcla en línea se disminuiría el exceso de calidad en las gasolinas despachadas en 0.2 octanos, lo cual generaría un beneficio de 147.5 MUS\$ para la empresa, permitiendo también reducir los costos operativos en la preparación de gasolinas, tales como: consumo de energía eléctrica, tiempo de preparación del producto, sobre tiempo del personal y costo por análisis de laboratorio, lo cual generaría un beneficio de 44.8 MUS\$. Además, disminuiría también el costo de fletamento de cada buque atendido y generaría un beneficio de 628.0 MUS\$ [20].

Quinde (2012), en su tesis de pregrado, planteó como objetivo la instalación de un sistema de mezcla en línea para la formulación de gasolinas y petróleos industriales en la Refinería Talara de PETROPERÚ, para lo cual desarrolló una evaluación técnico-económica para su implementación. Los sistemas implementados hacían también empleo de equipos de bombeo, así como la instalación de sistemas de control para los procesos de mezcla. Durante la solicitud de cotizaciones a empresas especializadas refiere la existencia de proyectos similares realizados anteriormente. Sin embargo, al momento del desarrollo del presente informe, se tuvo acceso limitado a esta tesis por encontrarse en físico fuera del área delimitada de la investigación, y no se pudo obtener mayor información [21].

## 2.2 Bases Teóricas.

### 2.2.1. Modelado de procesos y grados de libertad.

Debe saberse que el modelo de un proceso no es más que una abstracción matemática de un proceso real. Las ecuaciones de un modelo son una aproximación a la realidad, por lo tanto, un modelo no puede incorporar todas las características, macroscópicas y microscópicas, de un proceso real. Si el proceso experimenta comportamiento transitorio deberá usarse un modelo dinámico.

Los modelos no estacionarios o modelos dinámicos de procesos son relaciones matemáticas derivadas de los principios físicos y químicos que establecen las relaciones entre las variables del sistema, así como su variación en el tiempo. Estos modelos juegan un rol central en la comprensión de los procesos, así como en el desarrollo de estrategias de control y condiciones óptimas de operación.

Para que un modelo tenga solución, el número de variables desconocidas debe ser igual al número de ecuaciones independientes del modelo. La diferencia entre el número de las variables de proceso y el número de ecuaciones independientes se conoce como el número de *grados de libertad*. Por tanto, para que un modelo matemático tenga solución su número de grados de libertad debe ser igual a cero [14].

### 2.2.2. Turbulencia.

**Ecuación de continuidad y ecuación de movimiento [22].-** La ecuación de continuidad también es conocida como la ecuación de balance de masa, desarrollada por lo general haciendo un balance de masa sobre un pequeño elemento de volumen a través del cual fluye un fluido. Luego el tamaño de este elemento se permite llegar a cero (tratándose así el fluido como un continuo), y se genera así una ecuación diferencial parcial. Para un fluido con densidad constante esta ecuación es, en coordenadas cartesianas:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

Donde:

$\vec{V}$ : Vector velocidad del fluido, expresado en  $m/s$  en el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Por otro lado, la ecuación de movimiento se escribe para el balance de momento, desarrollada al hacer un balance de cantidad de movimiento sobre un pequeño elemento de volumen y dejando que el elemento de volumen se vuelva infinitesimalmente pequeño. Para un fluido Newtoniano con densidad y viscosidad constantes se genera la ecuación de Navier-Stokes, una ecuación diferencial parcial no estacionaria, no lineal, diferencial parcial de segundo orden, la cual no tiene solución exacta a la fecha para todas las geometrías existentes. En coordenadas cartesianas esta ecuación es:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla P + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2)$$

Donde:

$\rho$ : Densidad del fluido, expresada en  $kg/m^3$  en el SI.

$\vec{V}$ : Vector velocidad del fluido, expresado en  $m/s$  en el SI.

$t$ : Tiempo, expresado en  $s$  en el SI.

$P$ : Presión del fluido, expresada en  $Pa$  en el SI.

$\vec{g}$ : Vector aceleración de la gravedad, expresado en  $m/s^2$  en el SI.

$\mu$ : Viscosidad absoluta del fluido, expresada en  $Pa.s$  en el SI.

Esta ecuación de movimiento puede ser utilizada junto a la ecuación de continuidad. Se puede generar así un sistema de ecuaciones diferenciales parciales que es necesario resolver para obtener la solución del sistema en el cual se aplican. La solución es, en no pocos casos, numérica.



**Turbulencia y el “problema de cierre”.**- La turbulencia es un fenómeno caótico. Sin embargo, el hecho de que el tamaño de los remolinos producidos por este fenómeno sea mayor en varios órdenes de magnitud que la trayectoria libre media de las moléculas del fluido hace posible aplicar las ecuaciones de cambio, como lo son la ecuación de continuidad y la ecuación de Navier-Stokes [23].

La ecuación de Navier-Stokes no es una ecuación exacta, sino más bien un modelo que abarca ciertas aproximaciones. Sin embargo, sirve como un modelo excelente que puede considerarse como la base de la mecánica de fluidos moderna [23]. Para el flujo turbulento, dado que es caótico, se aplica la *descomposición de Reynolds*, considerando las fluctuaciones propias de la turbulencia como la suma de un valor medio en el tiempo (marcado con una barra en la parte superior) y una fluctuación (marcada por lo general con un apóstrofe). Por ejemplo, para el componente “x” de la velocidad en el sistema de coordenadas cartesianas se tiene:

$$V_x = \bar{V}_x + V'_x \quad (3)$$

Donde:

$V_x$ : Componente x del vector velocidad del fluido ( $\vec{V}$ ), expresado en m/s en el SI.

$\bar{V}_x$ : Valor medio en el tiempo de la componente x del vector velocidad del fluido ( $\vec{V}$ ), expresado en m/s en el SI.

$V'_x$ : Valor fluctuante en el tiempo de la componente x del vector velocidad del fluido ( $\vec{V}$ ), expresado en m/s en el SI.

Esto permite escribir las ecuaciones de continuidad y movimiento de la siguiente manera:

$$\nabla \cdot \bar{\vec{V}} = 0 \quad \text{y} \quad \nabla \cdot \bar{\vec{V}}' = 0 \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{\vec{v}}}{\partial t} = -\nabla \bar{P} + \rho \vec{g} - \nabla \cdot \rho \bar{\vec{V}} \bar{\vec{V}} - \nabla \cdot (\bar{\vec{\tau}}^{(v)} + \bar{\vec{\tau}}^{(t)}) \quad (5)$$

Teniendo en cuenta que:

$$\bar{\tau}_{ii}^{(v)} = -2\mu \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_i} \quad (6)$$

$$\bar{\tau}_{ij}^{(v)} = -\mu \left( \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} \right) \quad (7)$$

Y:

$$\bar{\tau}_{ij}^{(t)} = \rho \overline{\bar{v}'_i \bar{v}'_j} \quad (8)$$

Donde, en las ecuaciones (4) a (8):

$\bar{\vec{V}}$ : Vector velocidad media en el tiempo del fluido, expresado en  $m/s$  en el SI, donde  $\bar{v}_i$  y  $\bar{v}_j$  son notaciones para sus componentes.

$\bar{\vec{V}}'$ : Vector velocidad fluctuante en el tiempo del fluido, expresado en  $m/s$  en el SI, donde  $\bar{v}'_i$  y  $\bar{v}'_j$  son notaciones para sus componentes.

$\rho$ : Densidad del fluido, expresada en  $kg/m^3$  en el SI.

$\bar{P}$ : Presión media en el tiempo del fluido, expresada en  $Pa$  en el SI.

$\vec{g}$ : Vector aceleración de la gravedad, expresado en  $m/s^2$  en el SI.

$\bar{\vec{\tau}}^{(v)}$ : Tensor de segundo orden de los estreses viscosos medios en el tiempo, con nueve componentes:  $\bar{\vec{\tau}}^{(v)} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \delta_i \delta_j \bar{\tau}_{ij}$ , en los que  $\delta_{i/j}$  denota a los vectores unitarios en las direcciones de los ejes coordenados, conocidos también como  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$ ,  $\vec{k}$ . Es un tensor de flujo de momento por unidad de área (*flux*). Sus unidades son  $kg/(m.s^2)$  en el SI (es decir,  $(kg.m/s)/(s.m^2)$ ).

$\bar{\tau}_{ij}^{(v)}$ : Componente media en el tiempo del tensor de estreses viscosos.

$\bar{\vec{\tau}}^{(t)}$ : Tensor de segundo orden de los estreses de Reynolds medios en el tiempo, también con nueve componentes. Es un tensor de flujo de momento por unidad de área (*flux*). Sus unidades son  $kg/(m.s^2)$  en el SI (es decir,  $(kg.m/s)/(s.m^2)$ ).

$\bar{\tau}^{(t)}_{ij}$ : Componente media en el tiempo del tensor de estreses de Reynolds.  
 $\mu$ : Viscosidad absoluta del fluido, expresada en Pa.s en el SI.

Sin embargo, los estreses de Reynolds  $\bar{\tau}^{(t)}$  no están relacionados de manera sencilla con los gradientes de velocidad, como sí lo están los estreses viscosos de valor medio en el tiempo  $\bar{\tau}^{(v)}$ , según puede apreciarse. Por el contrario, los estreses de Reynolds son funciones complejas de la posición e intensidad de la turbulencia y, además, son simétricos ( $\tau_{ij} = \tau_{ji}$ ), por lo que se han producido seis nuevas cantidades desconocidas (incógnitas) al aplicar la descomposición de Reynolds. Esto da origen al “problema de cierre” [24]:

Para flujos tridimensionales, se tienen cuatro propiedades de valor medio en el tiempo, esto es, presión y tres componentes de velocidad, junto con seis componentes de los estreses de Reynolds, haciendo un total de diez incógnitas. Sin embargo, las ecuaciones de continuidad y las tres ecuaciones (una por cada componente) de la ecuación de movimiento hacen un total de cuatro. Por tanto, el sistema aún no está “cerrado”, y se deben encontrar ecuaciones adicionales para resolver y despejar todas las variables desconocidas.

### **2.2.3. Modelos de turbulencia.**

Para determinar las variables desconocidas del flujo en función de cantidades conocidas, es necesario emplear los modelos de turbulencia [25].

En principio, es posible conocer que las ecuaciones de continuidad y de Navier-Stokes contienen toda la física implicada de un determinado flujo turbulento [24]. Sin embargo, dada la sofisticación que implica, la solución se simplifica reemplazando la totalidad de vórtices de un flujo turbulento con algún tipo de modelo matemático de turbulencia. Los existen muchos hoy en día, como lo son los modelos  $k-\varepsilon$ ,  $k-\omega$  y  $q-\omega$ . Estos modelos añaden ecuaciones que deben ser

resueltas junto a las ecuaciones de conservación de masa y momento lineal, especificando las condiciones de frontera del modelo. Debe tenerse en cuenta que los modelos de turbulencia son aproximaciones y no son universales, por lo que las soluciones están condicionadas a su precisión física del flujo [23].

Los modelos arriba mencionados son modelos de dos ecuaciones. Estos modelos son llamados *completos* debido a que en su formulación proporcionan ya una escala de longitud de turbulencia o su equivalente [24]. De estos modelos, el modelo  $k-\varepsilon$  se ha convertido en el “caballo de batalla” desde que fue propuesto por Launder y Spalding. Es un modelo semiempírico y su derivación tiene base tanto a partir de consideraciones fenomenológicas empíricas. Sus fortalezas y debilidades han sido bien conocidas, y por ello han aparecido variantes mejoradas, como el modelo  $k-\varepsilon$  RNG y el modelo  $k-\varepsilon$  realizable.

De estos modelos, a diferencia del modelo  $k-\varepsilon$  estándar, el modelo  $k-\varepsilon$  *realizable* satisface ciertas restricciones matemáticas de los esfuerzos de Reynolds consistentes con la física de los flujos turbulentos. Las ecuaciones del modelo  $k-\varepsilon$  *realizable* son las siguientes [25]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k V_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon V_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_b \cdot \tanh \left| \frac{v}{u} \right| \quad (10)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \mu_t &= \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} & C_\mu &= \frac{1}{A_0 + A_s \frac{k U^*}{\varepsilon}} \\ U^* &= \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \Omega_{ij} \Omega_{ij}} & A_0 &= 4.04 \\ A_s &= \sqrt{6} \cos \phi & \phi &= \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6} W) \end{aligned}$$

$$W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3} \quad \tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_j}{\partial x_i} + \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \right) \quad C_1 = \text{máx.} \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$$

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_i}{\partial x_j} - \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right)$$

En las ecuaciones anteriores:

$k$ : Es la energía cinética turbulenta, o la energía cinética por unidad de masa para un flujo turbulento. Sus unidades son  $m^2/s^2$  en el SI, es decir,  $J/kg$ .

$\varepsilon$ : Es la tasa de disipación de turbulencia, o la tasa a la cual la energía cinética turbulenta se convierte en energía térmica. Sus unidades son  $m^2/s^3$  en el SI, es decir,  $J/(kg.s)$ .

$G_k$ : Representa la generación de energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidad medios. Sus unidades son  $kg/(m.s^3)$  en el SI, es decir,  $J/(m^3.s)$ .

$G_b$ : Es la generación de energía cinética turbulenta debido a la flotabilidad, con las mismas unidades que  $G_k$ .

$Y_M$ : Representa la contribución de la dilatación fluctuante en la turbulencia compresible a la velocidad de disipación global, con las mismas unidades que  $G_k$ .

$\mu$ : Viscosidad absoluta del fluido, expresada en  $Pa.s$  en el SI.

$\nu$ : Viscosidad dinámica del fluido, expresada en  $m^2/s$ .

$\mu_t$ : Viscosidad turbulenta o de remolino, expresada en  $Pa.s$  en el SI.

$S_{ij}$ : Componentes del tensor velocidad de deformación media, es decir, la velocidad a la cual el fluido se deforma por expansión, compresión o esfuerzo de corte. En el SI, sus unidades son  $s^{-1}$ .

$S$ : Módulo del tensor velocidad de deformación medio, expresado en  $s^{-1}$  en el SI.

$\Omega_{ij}$ : Componentes del tensor velocidad de rotación media. En el SI, sus unidades son  $s^{-1}$ .

$U^*$ : Valor obtenido a partir de  $S_{ij}$  y  $\bar{\Omega}_{ij}$ , expresado en  $s^{-1}$  en el SI.

$\tilde{S}$ : Valor obtenido a partir de  $S_{ij}$ , expresado en  $s^{-1}$  en el SI.

$C_\mu, A_0, A_S, \phi, W, C_1, \eta$ : Valores obtenidos a partir de las relaciones establecidas, adimensionales.

$v$ : Componente de la velocidad de flujo paralela al vector gravitacional, expresada en  $m/s$  en el SI.

$u$ : Componente de la velocidad de flujo perpendicular al vector gravitacional, expresada en  $m/s$  en el SI.

$C_2$  y  $C_{1\varepsilon}$  son constantes del modelo, con valores de 1.9 y 1.44, respectivamente. Adimensionales.

$\sigma_k$  y  $\sigma_\varepsilon$  son los números de turbulencia de Prandtl para  $k$  y  $\varepsilon$ , con valores de 1.0 y 1.2, respectivamente. Adimensionales.

#### **2.2.4. Dominios de flujo y volúmenes de control.**

En mecánica de fluidos es común trabajar con sistemas abiertos por los cuales fluyen materia y energía entre su interior y los alrededores. Sin embargo, el análisis que se efectúe sobre estos sistemas dependerá de las propiedades y características del flujo sobre las que se tenga interés.

Las ecuaciones de continuidad, balance de momento y modelos de turbulencia mostradas hasta el momento se aplican a *cualquier y cada* punto del sistema abierto bajo estudio, al cual se le conoce como **dominio de flujo**. Lo que se busca es conocer las propiedades que el fluido tiene en esos puntos a su paso por ellas. El interés radica en el estudio del fluido y sus propiedades *en el interior* del sistema.

Por otro lado, si el interés radica en las características globales de flujo, como la razón de flujo de masa y la presión de los fluidos a la entrada o salida, sin ser de particular interés las propiedades de los mismos al interior del sistema, se podrá tratar al sistema abierto como un **volumen de control**. El interior de un volumen de control se trata como una “caja negra”: *no se puede* obtener conocimiento detallado acerca de las propiedades de flujo como velocidad o presión en puntos *adentro* del volumen de control [23].

El tratamiento de un volumen de control es un tema conocido desde los estudios de pregrado. Obedece los enfoques de balance de materia, energía y cantidad de movimiento desde un punto de vista macroscópico. En efecto, al integrar las ecuaciones diferenciales de continuidad, energía y cantidad de movimiento se obtienen los conocidos balances globales de masa, energía y cantidad de movimiento [22]. Para un volumen de control con una entrada (denotada por 1) y una salida (denotada por 2), isotérmico (como los delimitados por el presente trabajo), el balance global de masa en estado estacionario es directo:

$$m_1 = m_2 \quad (11)$$

Para este volumen de control, de particular interés es la forma de la ecuación de la energía para flujo estacionario e incompresible:

$$\frac{P'_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_{bomba} = \frac{P'_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{turbina} + h_L \quad (12)$$

Donde:

$P'_1$ : Presión absoluta en la superficie libre del fluido en el tanque, expresada en  $Pa$  en el SI.

$\rho$ : Densidad del fluido, expresada en  $kg/m^3$  en el SI.

$g$ : Módulo de la aceleración de la gravedad, expresada en  $m/s^2$  en el SI.

$\alpha_1$ : Factor de corrección para la energía cinética en la superficie libre del fluido en el tanque, adimensional.

$V_1$ : Velocidad en la superficie libre del fluido en el tanque, expresada en  $m/s$  en el SI.

$z_1$ : Altura en la superficie libre del fluido en el tanque respecto al nivel de referencia, expresada en  $m$  en el SI.

$h_{bomba}$ : Cabeza de presión agregada al fluido mediante uso de una bomba, expresada en  $m$  en el SI.

$P'_2$ : Presión absoluta del fluido antes de su ingreso al dominio de flujo, expresada en  $Pa$  en el SI.

$\alpha_2$ : Factor de corrección para la energía cinética en el tubo antes del ingreso al dominio de flujo, adimensional.

$V_2$ : Velocidad del fluido en la tubería antes de ingresar al dominio de flujo, expresada en  $m/s$  en el SI.

$z_2$ : Altura del fluido en la tubería antes de ingresar al dominio de flujo, expresada en  $m$  en el SI.

$h_{turbina}$ : Cabeza de presión sustraída del fluido mediante uso de una turbina, expresada en  $m$  en el SI.

$h_L$ : Pérdida de carga del fluido entre los puntos 1 y 2 debido a todos los componentes del sistema de tubería, diferentes a la bomba y a la turbina, expresada en  $m$  en el SI.

### **2.2.5. Pérdidas de carga y fricción.**

Las ecuaciones de pérdida de carga y cálculo de factor de fricción son aplicables a diferentes tipos de fluidos, considerando su evaluación con las propiedades correspondientes a cada uno, en este caso específico para la gasolina y el alcohol. Para flujo en una tubería, un elemento de interés es la caída de presión  $\Delta P$ , porque está directamente relacionada con la potencia requerida para poder mantener el flujo del fluido. En la práctica, es conveniente expresar la pérdida de presión para todos los tipos de flujos internos totalmente desarrollados (sean laminares o turbulentos, en tuberías circulares o no circulares, horizontales o inclinadas, con superficies lisas o rugosas) como [23]:

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho V_{prom}^2}{2} \quad (13)$$

Donde:

$L$ : Longitud de tubería por la que fluye el fluido, expresada en  $m$  en el SI.

$D$ : Diámetro de la tubería por la que fluye el fluido, expresado en  $m$  en el SI.

$\rho$ : Densidad del fluido, expresada en  $kg/m^3$  en el SI.



$V_{prom}$ : Velocidad promedio del fluido en la tubería, definida como el valor promediado de la componente normal de la velocidad  $\vec{V}$  al área transversal de la tubería. Se expresa en  $m/s$  en el SI.

$\Delta P$ : Caída de presión en la tubería, expresada en  $Pa$  en el SI.

$f$ : Factor de fricción de Darcy-Weisbach. Adimensional.

Al dividir la ecuación (13) entre el producto de la gravedad por la densidad del líquido, se obtiene la pérdida de presión expresada como columna de fluido equivalente, conocida como pérdida de carga  $h_L$ , expresada en  $m$  en el SI.

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{V_{prom}^2}{2g} \quad (14)$$

La pérdida de carga se produce por la viscosidad y se relaciona directamente con el esfuerzo de corte de la pared del tubo.

La ecuación (14) es conocida como la ecuación Darcy-Weisbach, y su evaluación permite conocer las denominadas **pérdidas primarias**, que tienen lugar en las secciones de diámetro constante [26], también llamadas *pérdidas continuas*, producidas por el rozamiento del fluido con la tubería y entre las mismas capas de fluido [27], según se ha indicado antes.

Por otro lado, las **pérdidas secundarias**, o *pérdidas singulares*, se producen en las transiciones, estrechamientos, codos, válvulas y todos aquellos accesorios existentes en la tubería. Su cálculo es por expresiones del tipo [26]:

$$h_a = K_a \frac{V_{prom}^2}{2g} \quad (15)$$

Donde:

$K_a$ : Coeficiente de pérdida o de resistencia del accesorio en el cual se evalúa la pérdida secundaria. Adimensional.

$h_a$ : Pérdida de carga debida al accesorio, expresada en  $m$  en el SI.

Si la conducción es larga, las pérdidas secundarias tienen poca importancia, pudiendo a veces despreciarse o bien se tienen en cuenta al final, sumando de un 5% a 10% a las pérdidas primarias halladas [27].

El coeficiente de pérdida  $K_a$  es normalmente determinado de manera experimental debido a la naturaleza compleja del flujo en los accesorios. Sin embargo, el factor de fricción de Darcy-Weisbach es función de la rugosidad de la línea y del número de Reynolds, calculado mediante el conocido diagrama de Moody. Sin embargo, combinando los datos experimentales mediante ajuste de curvas, ha sido posible obtener modelos para su cálculo directo, como la ecuación de Colebrook [23]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left( \frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (16)$$

Donde:

$\epsilon$ : Rugosidad absoluta de la tubería, expresada en  $m$  en el SI.

$Re$ : Número de Reynolds. Adimensional.

La ecuación (16) es válida para flujo turbulento, aunque tiene la desventaja de ser implícita en el factor de fricción. En 1997, Churchill generó una ecuación explícita para cualquier  $Re$  y también para cualquier rugosidad:

$$f = 8 \left[ \left( \frac{8}{Re} \right)^{12} + (A + B)^{-1.5} \right]^{\frac{1}{12}} \quad (17)$$

Donde:

$$A = \left\{ -2.457 \ln \left[ \left( \frac{7}{Re} \right)^{0.9} + 0.27 \frac{\epsilon}{D} \right] \right\}^{16}$$

$$B = \left( \frac{37,530}{Re} \right)^{16}$$

La ecuación (17) es la más recomendable para el cálculo del factor de fricción.

### **2.2.6. Modelado multifásico.**

Diferentes flujos encontrados en la naturaleza, así como en la tecnología, son una mezcla de fases. Con la finalidad de efectuar el cálculo numérico de estas mezclas (compuestas por una fase fluida y una fase dispersa), por lo general se dispone de dos enfoques: el enfoque euleriano-lagrangiano y el enfoque euleriano-euleriano [28].

El enfoque euleriano-lagrangiano considera a la fase fluida como un continuo (enfoque euleriano) en el cual se resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes. La fase dispersa, por otro lado, es considerada como un gran número de partículas, gotas, burbujas, etc. La fase dispersa puede intercambiar masa, momento y energía con la fase continua.

Mientras tanto, en el enfoque euleriano-euleriano, ambas fases son consideradas como continuos que interactúan uno con otro. Dado que el volumen de una fase no puede ser ocupado por las otras fases, el concepto que se introduce es el de fracción de volumen fásico. Se supone que estas fracciones de volumen son funciones continuas de espacio y tiempo y su suma es igual a uno. Se obtienen las ecuaciones de conservación para cada fase para obtener un conjunto de ecuaciones que tienen una estructura similar para todas las fases. Estas ecuaciones son cerradas (completadas) proporcionando relaciones constitutivas que se obtienen de la información empírica, o, en el caso de flujos granulares, por aplicación de la teoría cinética.

Un concepto que aparece para el enfoque euleriano es el de *acoplamiento* de ambas fases. Es decir, si el flujo de una fase afecta al otro mientras que no hay efecto inverso, se dice que el flujo es unidireccional. Si hay un efecto mutuo entre

los flujos de ambas fases, entonces el flujo es bidireccional y se dice que entre ambas fases *existe acoplamiento*.

El modelo Euleriano resuelve un conjunto de ecuaciones de cantidad de movimiento y continuidad para *cada* fase. El acoplamiento se logra a través de los coeficientes de intercambio de presión e interfase. La manera en que se maneja este acoplamiento depende del tipo de fases involucradas. Los flujos líquido-sólido se manejan de manera diferente que los flujos no granulares líquido-líquido. Para los primeros, por ejemplo, las propiedades se obtienen de la aplicación de la teoría cinética. El intercambio de momento entre ambas fases también depende del tipo de mezcla que se está modelando.

Sin embargo, dependiendo del grado de acoplamiento de ambas fases, será posible resolver un modelo euleriano simplificado (llamado también “modelo de mezcla”), en el que se consideren la resolución de la ecuación de la cantidad de movimiento de la *mezcla*, prescribiendo velocidades *relativas* para describir las fases dispersas. Dos parámetros que permiten ayudar a identificar el modelo euleriano apropiado: el parámetro de carga de partículas y el número de Stokes.

El parámetro de carga de partículas es el de mayor impacto, se define como la relación de densidad de masa de la fase dispersa (denotada con el subíndice “d”) a la fase continua (denotada con el subíndice “q”):

$$\beta = \frac{\alpha_d \rho_d}{\alpha_q \rho_q} \quad (18)$$

Donde:

$\alpha$ : Denota la fracción volumétrica, adimensional.

$\rho$ : Denota la densidad, expresada en  $kg/m^3$  en el SI.

Por otro lado, el número de Stokes se define como la relación entre el tiempo de respuesta de la partícula y el tiempo de respuesta del sistema:

$$St = \frac{\tau_d}{t_s} \quad (19)$$

Donde:

$$\tau_d = \frac{\rho_d d_d^2}{18\mu_q} \quad (20)$$

Y  $t_s$  se basa en la longitud característica ( $L_s$ ) y velocidad característica ( $V_s$ ) del *sistema* bajo investigación:

$$t_s = \frac{L_s}{V_s} \quad (21)$$

En las ecuaciones (19) a (21):

$\tau_d$ : Tiempo de respuesta de la partícula, expresado en s en el SI.

$t_s$ : Tiempo de respuesta del sistema, expresado en s en el SI.

$\rho_d$ : Densidad de la fase dispersa, expresada en  $kg/m^3$  en el SI.

$d_d$ : Diámetro de partícula de la fase dispersa, expresada en  $m$  en el SI.

$\mu_q$ : Viscosidad absoluta de la fase dispersa, expresada en  $Pa.s$  en el SI.

$L_s$ : Longitud característica del sistema, expresada en  $m$  en el SI.

$V_s$ : Velocidad característica del sistema, expresada en  $m/s$  en el SI.

Para cuando  $St \ll 1.0$ , la partícula seguirá de cerca el flujo y cualquiera de los modelos, Euleriano o de mezcla, podrá ser aplicable; por lo tanto, convendrá elegir el que consuma menos recursos (en la mayoría de los casos, el modelo de mezcla), o el más adecuado considerando otros factores. Para cuando  $St > 1.0$ , las partículas se moverán independientemente del flujo será necesario aplicar el modelo Euleriano. Para  $St \approx 1.0$ , de nuevo cualquiera de los dos modelos será aplicable; pudiéndose elegir el que consuma menos recursos o el más apropiado considerando otros factores.

### **2.2.7. Discretización y solución.**

En muchos problemas aplicados y teóricos se requiere hallar la solución de un sistema de ecuaciones diferenciales parciales. Sin embargo, dada la complejidad que pueden tener los sistemas en los que se originan, la solución en forma analítica no se puede considerar como un proceso general de solución. En tal caso, el problema diferencial original se sustituye por un problema discreto, obteniéndose luego un sistema de ecuaciones aritméticas, del cual se establece luego su orden de ejecución [29].

Los algoritmos de solución empleados en la mecánica de fluidos computacional se basan en dividir el dominio de flujo (que pasa a ser ahora un *dominio computacional*) en una serie de *celdas* cuyo conjunto es conocido como *malla*. Estas celdas son pequeños *volúmenes* que pueden considerarse como pequeños volúmenes de control en los cuales las ecuaciones diferenciales de continuidad, transporte de momento, modelos de turbulencia y modelos de mezcla son resueltas usando métodos numéricos. Para la solución debe proporcionarse un conjunto de condiciones de frontera en cada cara del dominio, y además las propiedades del fluido que se encuentra circulando por el dominio de flujo.

En mecánica de fluidos, al igual que distintas ramas de la ciencia, los métodos numéricos se han convertido en herramientas indispensables para obtener soluciones de los modelos matemáticos mediante la simulación, y están bien documentados en la bibliografía [30]. Algunos esquemas de discretización empleados son, por ejemplo: el de mínimos cuadrados basados en celdas (*Least Squares Cell Based – LSCB*), el esquema de escalamiento de presión (*Pressure Staggering Option – PRESTO*), la derivación de primer orden a partir de celdas superiores (*First Order Upwind*), entre otros [25].

En el presente trabajo, los programas empleados para la solución de los modelos fueron el Aspen HYSYS V10 y el Ansys FLUENT 19.2.

**Aspen HYSYS.-** Es un software de simulación de procesos de amplio uso en la industria. Dado un diseño de proceso y una selección adecuada de modelos termodinámicos, Aspen HYSYS (o simplemente, HYSYS) utiliza modelos matemáticos para predecir el rendimiento del proceso. El software se puede utilizar normalmente para optimizar el diseño y mejorar los existentes.

La selección del modelo termodinámico a emplear (identificado como “paquete termodinámico” en el programa) es de particular importancia para los cálculos de propiedades termodinámicas y de equilibrios entre fases. Por tanto, el empleo de HYSYS, si bien puede brindar recomendaciones durante el desarrollo del trabajo, requiere de conocimientos técnicos por parte del usuario. Este modelado preciso de las propiedades termodinámicas es particularmente importante en la separación de mezclas no ideales.

Una de las mejores ventajas es que HYSYS ya tiene una base de datos existente de especies y sus parámetros de regresión puros/binarios [31].

**Ansys FLUENT.-** Es un paquete de software de dinámica de fluidos computacional (CFD) que se utiliza para simular el flujo de fluidos, la transferencia de calor y las interacciones entre fluidos y estructuras. Se puede utilizar para analizar una amplia gama de problemas, incluido el flujo de gases, líquidos y fluidos multifásicos, así como sistemas de reacción y análisis estructural. Ansys FLUENT se usa ampliamente en varias industrias, incluidas la aeroespacial, automotriz, química y muchas más.

El programa utiliza el método de volumen finito para resolver las ecuaciones que rigen el flujo de fluidos y la transferencia de calor. Esto implica dividir el dominio de la simulación en una serie de pequeños volúmenes de control o celdas interconectados. Los valores de las variables (como la velocidad y la temperatura) se calculan luego en los centroides de estas celdas.

Ansys FLUENT utiliza algoritmos iterativos para resolver estas ecuaciones y llegar a una solución convergente.

Antes de ingresar los modelos a resolver debe definirse la geometría, la malla y las condiciones de contorno del problema en el dominio de flujo en el que se vaya a trabajar. Deben ingresarse también las propiedades de los fluidos y materiales involucrados en su simulación. El programa luego puede usarse para resolver las ecuaciones y generar resultados [32].

### **2.3 Marco conceptual.**

Lo antes expuesto permite ver que el mezclado de líquidos en línea no es una idea que responda a un desarrollo reciente. Los estudios efectuados emplean modelos matemáticos basados en las ecuaciones de continuidad, movimiento y modelado multifásico. Cuando se estudia el mezclado no isotérmico es necesario adicionar también la ecuación de balance de energía. En todos los casos lo más conveniente es, por lo general, discretizar el sistema de ecuaciones y resolverlo con el apoyo de un software apropiado.

No obstante, los problemas estudiados comprenden el empleo de equipos de bombeo y sistemas de control donde las presiones líneas arriba del punto de inyección pueden mantenerse esencialmente constantes. El enfoque que se plantea ahora es, por lo tanto, tomar ventaja de cabezas de presión hidrostáticas que puedan existir como fuerzas impulsoras para realizar el mezclado de gasolina y alcohol carburante para la formulación de gasoholes, prescindiendo de un consumo por bombeo y optimizando los consumos energéticos. El modelamiento matemático y por tanto el estudio dinámico del proceso permitirá ver el grado de viabilidad de emplear este método de mezcla en casos reales de ingeniería y, a futuro, servir de base para el estudio del sistema de control más conveniente.



El enfoque que se ha seguido entonces es el planteamiento de las ecuaciones de continuidad y de transporte de momento, analizando las cotas que originen la cabeza de presión más apropiada para dar preferencia al flujo turbulento, que es el que permitirá la mezcla en línea. Para la solución se eligieron modelos de turbulencia y de mezcla apropiados para conductos cerrados de sección circular, procediendo luego a la solución por computadora empleando la CFD y ajustando parámetros de solución por malla mediante algoritmos de discretización. Se estudió la influencia del diámetro de la tubería de mezcla, así como las velocidades de flujo en la longitud de mezcla.

#### **2.4 Definición de términos básicos.**

**Alcohol:** Etanol. Es el alcohol etílico de fórmula química  $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$ . Se caracteriza por ser un compuesto líquido, incoloro, volátil, inflamable y soluble en agua [33].

**Gasolina:** Combustible diseñado para el uso en motores de ignición por chispa y de combustión interna en vehículos como automóviles y motocicletas, entre muchos otros. Se obtiene de la nafta de destilación directa, que es la fracción líquida más ligera del petróleo, y su mezcla de hidrocarburos está en el rango aproximado de cinco átomos de carbono (C5) a once átomos de carbono (C11) [34].

**Gasohol:** Mezcla que contiene un 92.2% de volúmenes de gasolina (de 84, 90, 95 o 97 octanos) y un 7.8% de volúmenes de alcohol carburante [33].

**Densidad:** Magnitud que expresa la relación entre la masa y el volumen de un cuerpo. Su unidad en el Sistema Internacional es el kilogramo por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ) [35].

**Viscosidad:** Propiedad de los fluidos que caracteriza su resistencia a fluir, debido al rozamiento entre sus moléculas [36].

**Alcohol carburante:** Etanol anhidro (que no contiene agua) desnaturalizado. Se obtiene de la mezcla del etanol anhidro con la sustancia desnaturalizante en una proporción de entre 2% y 3% del volumen [33].

**Blending:** En refinación, mezcla de los productos refinados con aditivos y componentes para obtener productos finales (combustibles, asfaltos, especialidades, solventes, etc.) [37].

**Computational Fluid Dynamics – CFD:** Dinámica de Fluidos Computacional. Área de conocimiento que trata sobre la simulación numérica de flujos fluidos, transferencia de calor y fenómenos relacionados tales como reacciones químicas, combustión, aeroacústica etc. El CFD tuvo origen a partir de la combinación de dos disciplinas: mecánica de los fluidos y cálculo numérico. Las ecuaciones que rigen el flujo fluido tienen origen en la mecánica de los fluidos y pueden ser resueltas por medio de diferentes métodos numéricos [38].

**Condiciones de frontera (*boundary conditions*):** Condiciones de solución basadas en condiciones de proceso que se establecen a cada lado o cara del dominio de flujo que se viene resolviendo de manera computacional, a fin de que el proceso de solución las tome como referencia para el procedimiento de solución [23].

**Malla:** Conjunto de superficies en el dominio computacional que lo descomponen en subdominios para los cuales se va a determinar la solución numérica [39].

**Modelado dinámico:** Conjunto de ecuaciones de conservación que, a diferencia del estado estacionario, dan cuenta de los cambios que ocurren en el tiempo [14].

**Discretización:** Proceso mediante el cual una ecuación o sistemas de ecuaciones diferenciales parciales se reemplaza por un conjunto de ecuaciones

aritméticas que se resuelve mediante operaciones [29].

**Dominio de flujo:** Región del espacio por la que fluye un fluido, y en la cual se aplican las ecuaciones diferenciales de continuidad, momento, energía, etc. en cada uno de sus puntos para conocer las propiedades que tiene en su paso por ellas [23].

**Ecuación de Continuidad:** Producto de la ley de conservación de la masa que manifiesta que, en un conducto o tubería, sin importar su sección; mientras no existan derivaciones, la cantidad de fluido que entra por uno de sus extremos debe salir por el otro [22].

**Ecuación de Movimiento:** Ecuación que establece que el momento de un sistema aislado es una constante. La suma vectorial de los momentos (el momento es igual a la masa de un objeto multiplicado por su velocidad) de todos los objetos de un sistema no se puede cambiar por las interacciones dentro del sistema. En la mecánica clásica, esta ley está implícita en las leyes de Newton [22].

**Fluido:** Sustancia, como líquido o gas, que es capaz de fluir y que cambia su forma a un ritmo constante cuando actúa sobre ella una fuerza que tiende a cambiar su forma [40].

### III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

#### 3.1 Hipótesis.

##### **3.1.1. Hipótesis general.**

Mediante el planteamiento y desarrollo adecuado de los fundamentos y principios que gobiernan el flujo y la mezcla de fluidos, se podrá desarrollar el modelo matemático para la mezcla en línea por gravedad para la obtención de gasoholes.

##### **3.1.2. Hipótesis específicas.**

El tiempo influye en el modelo de homogeneización.

Las presiones del dominio de flujo influyen en el modelo de homogeneización.

##### **Definiciones conceptuales de las variables:**

Las variables fueron definidas como  $Y=f(X)$

##### **Variable dependiente:**

Y: Modelo de homogeneización.

##### **Variable independiente:**

X1: Dinámica del proceso.

##### **3.1.1 Operacionalización de variables**

Ver Tabla 1.

**Tabla 1***Definición operacional de las variables*

<b>VARIABLE DEPENDIENTE</b>	<b>DEFINICIÓN CONCEPTUAL</b>	<b>DEFINICIÓN OPERACIONAL</b>	<b>DIMENSIONES</b>	<b>INDICADORES</b>	<b>MÉTODO</b>
Y = Modelo de homogeneización.	Los modelos son relaciones matemáticas derivadas de los principios físicos y químicos que establecen las relaciones entre las variables del sistema, así como su variación en el tiempo [14].	Para la obtención del modelo se aplicarán las ecuaciones de balance de materia, momento lineal y de modelos de turbulencia y de mezcla.	Longitud de mezcla.	Convergencia del modelo.  Grado de mezcla.  Resultados con sentido físico.	Analítico
<b>VARIABLE INDEPENDIENTE</b>					
X1 = Dinámica del proceso.	Estudio del comportamiento no estacionario de los procesos que modifican sus condiciones en el tiempo debido a los cambios en los estímulos que los afectan [41].	La dinámica se evaluará manipulando los parámetros del sistema de mezcla.	Tiempo.  Presiones en el dominio de flujo.	Convergencia.  Resultados con sentido físico.	Analítico

## IV. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

### 4.1 Diseño metodológico.

Según la naturaleza de los datos e información manejados, el proyecto empleó el enfoque cuantitativo, debido a que las variables empleadas contenían dimensiones e indicadores medibles, calculados mediante ecuaciones de transporte, de conservación de la energía y de mezcla. Por su nivel, la investigación es aplicada. De acuerdo a los medios empleados para la obtención de datos, el diseño de investigación es documental, los datos se obtuvieron de la revisión bibliográfica y de documentos de primera mano disponibles en el momento en que se desarrolló el trabajo.

### 4.2 Método de investigación.

Se empleó el método no experimental. No se establecieron mecanismos ni sistemas de control en el modelo matemático de homogeneización desarrollado, sino que se observó su comportamiento a fin de determinar la viabilidad de obtener gasoholes a partir de las dimensiones definidas para la variable independiente. La investigación se desarrolló de la siguiente manera:

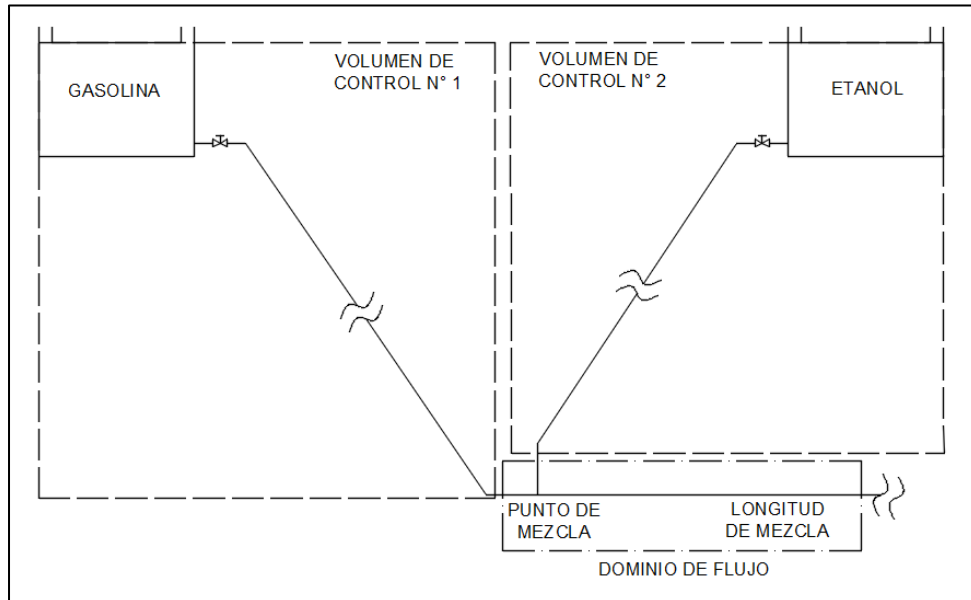
#### **Eta**pa 1 – Selección de los Volúmenes de Control y del Dominio de Flujo.

Para el desarrollo del modelo se tomaron en cuenta tres regiones bien diferenciadas según se observa en la Figura 1: dos volúmenes de control y un dominio de flujo.

Los volúmenes de control N° 1 y N° 2 cortan justo debajo de la superficie de la gasolina y etanol, respectivamente, y a través de su descarga por medio de las tuberías antes de su intersección en el punto de mezcla. En estos volúmenes son de interés las características globales de flujo, como la razón de flujo de masa y la presión de los fluidos a su salida, sin ser de particular interés las propiedades de los mismos al interior de cada uno.

**Figura 1**

*Selección de los volúmenes de control y dominio de flujo a ser estudiados para el modelado.*



Por otro lado, el punto de mezcla y la longitud de mezcla requerida necesitaron de un análisis diferencial mediante el empleo de las ecuaciones diferenciales aplicadas dentro de un dominio de flujo, pues es de interés la información que sucede dentro del dominio y que nos permita obtener detalles acerca de la presión, composición, entre otras propiedades, hasta que se obtuviera una mezcla homogénea.

### **Etapas 2 – Análisis de los volúmenes de control.**

En cada volumen de control se aplicó la ecuación de la energía [23]:

$$\frac{P'_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_{bomba} = \frac{P'_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{turbina} + h_L \quad (12)$$

Donde:

$P'_1$ : Presión absoluta en la superficie libre del fluido en el tanque, expresada en Pa en el SI.

$\rho$ : Densidad del fluido, expresada en  $kg/m^3$  en el SI.

$g$ : Aceleración de la gravedad, expresada en  $m/s^2$  en el SI.

$\alpha_1$ : Factor de corrección para la energía cinética en la superficie libre del fluido en el tanque, adimensional.

$V_1$ : Velocidad en la superficie libre del fluido en el tanque, expresada en  $m/s$  en el SI.

$z_1$ : Altura en la superficie libre del fluido en el tanque respecto al nivel de referencia, expresada en  $m$  en el SI.

$h_{bomba}$ : Cabeza de presión agregada al fluido mediante uso de una bomba, expresada en  $m$  en el SI.

$P'_2$ : Presión absoluta del fluido antes de su ingreso al dominio de flujo, expresada en  $Pa$  en el SI.

$\alpha_2$ : Factor de corrección para la energía cinética en el tubo antes del ingreso al dominio de flujo, adimensional.

$V_2$ : Velocidad del fluido en la tubería antes de ingresar al dominio de flujo, expresada en  $m/s$  en el SI.

$z_2$ : Altura del fluido en la tubería antes de ingresar al dominio de flujo, expresada en  $m$  en el SI.

$h_{turbina}$ : Cabeza de presión sustraída del fluido mediante uso de una turbina, expresada en  $m$  en el SI.

$h_L$ : Pérdida de carga del fluido entre los puntos 1 y 2 debido a todos los componentes del sistema de tubería, diferentes a la bomba y a la turbina, expresada en  $m$  en el SI.

Sea el Volumen de Control N° 1 o N° 2. Considerando que la presión atmosférica ejerce su acción hacia todas direcciones es posible trabajar con presiones manométricas. Sean el punto 1 la superficie del líquido y el punto 2 la descarga en la tubería antes de su ingreso al dominio de flujo, y tomando la altura de la tubería de mezcla como referencia, teniendo en cuenta que no existen bombas ni turbinas en el sistema, la ecuación de la energía se reduce a:

$$\alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_L \quad (22)$$



Donde  $P_2$  denota la presión manométrica del fluido antes de su ingreso al dominio de flujo,  $V$  es la velocidad promedio del fluido,  $\alpha$  es el factor de corrección de la energía cinética y  $h_L$  representa las pérdidas por fricción.

El análisis de la ecuación (22) muestra que, para un fluido determinado, se tiene solo una ecuación con siete incógnitas, a saber:  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$ ,  $V_1$  y  $V_2$ ,  $z_1$ ,  $P_2$  y  $h_L$ . Es necesario tener en cuenta también que las pérdidas por fricción ( $h_L$ ) son función del material, longitud y diámetro de la línea; y que en adición es necesario fijar la temperatura de operación a la cual se evaluará la densidad del líquido. Por tanto, todas estas condiciones —excepto una— deben fijarse para que la ecuación pueda resolverse, y así también se puedan proporcionar las condiciones de frontera (*boundary conditions*) necesarias para la solución de las ecuaciones en cuanto el análisis se extienda al dominio de flujo.

### **Etapa 3 – Determinación de las condiciones de los volúmenes de control que se fijarán para el modelo.**

La determinación de las condiciones que se necesitaban fijar en cada volumen de control a fin de poder resolver la ecuación (22) se hizo en base a consideraciones operacionales. En efecto, aunque el control del proceso de mezcla en línea se encontraba fuera del alcance de la presente investigación, pudo corroborarse que el control de procesos de mezcla en línea similares era llevado mediante el control de los flujos de las corrientes a mezclarse [42], [43]. Así, esto evidencia la necesidad de mantener las corrientes de flujo en valores determinados, por lo que el valor de flujo requerido debe ser una condición dada en el desarrollo del modelo.

Una nueva vista a la ecuación (22) permite ver que, para un sistema determinado con valores de flujo dados, los valores de  $V_2$ ,  $z_1$  y  $h_L$  resultarán conocidos. El valor de  $V_1$  puede despreciarse durante el desarrollo de la ecuación en estado cuasi-estacionario, pues el valor de la velocidad de descenso del fluido,  $V_1$ , era despreciable en comparación de la velocidad del fluido en el interior de la tubería,  $V_2$ . La variable de proceso por resolver será entonces  $P_2$ , y el valor del factor de

corrección de la energía cinética podrá tomarse de la bibliografía, valor que oscila entre 1.04 a 1.11 para flujo turbulento totalmente desarrollado en tubos circulares [23].

#### **Etapa 4 – Determinación de la diferencia de cotas y flujos que se fijarán para el modelo.**

Según se indicó antes, era necesario determinar el valor de las corrientes de flujo, así como el valor de la diferencia de cotas ( $z_1$ ) que se tomarían para el modelo. Considerando que la naturaleza de la investigación es aplicada, estos datos se han considerado tomando como referencia las necesidades y condiciones existentes en la realidad nacional.

Así, se pudo verificar con los Informes Estadísticos del Ministerio de Energía y Minas que la producción de gasoholes se realiza en la costa del país [44], por lo que se consideró este escenario como referencia (y, por lo tanto,  $P = 1 \text{ atm}$ ). Además, fue posible ubicar la existencia de dos refinerías de petróleo costeras que cuentan con diferencia de cotas en superficies sobre las que tienen tanques construidos. Una de ellas es la Refinería Talara de PETROPERÚ, que cuenta con tanques construidos en el tablazo donde se ubica Talara Alta, entre 80 a 90 m.s.n.m [45]; mientras que la otra es la Refinería Conchán, de la ya citada empresa, que cuenta con tanques construidos aproximadamente a 50 metros por encima del área que contiene a las unidades de proceso. Esta última tiene una longitud de descenso hacia la parte inferior de unos 570 m [46]. Las dimensiones dadas en la Refinería Conchán constituyen las menos favorables al tener una menor diferencia de cotas, y serán consideradas para el desarrollo del modelo, a fin de determinar la viabilidad de obtener un mezclado en condiciones reales. Respecto al volumen de producción, se ha considerado una producción de 22.8 MBPD de gasohol (22,800 barriles por día). Esta referencia se obtuvo en base a las capacidades de producción proyectadas para la Nueva Refinería Talara, la cual es de 22.8 MBPD de gasolinas [47]. Esta capacidad de producción, a su vez, fue estimada considerando el incremento en los requerimientos del mercado peruano y sudamericano, al considerar que la demanda de gasolina seguiría

creciendo a largo plazo [48]. Por lo tanto, el valor considerado es razonable.

Esto da un flujo de producto terminado (gasohol) de 151.04 m<sup>3</sup>/h. Considerando las proporciones en volumen del gasohol, se obtienen los flujos de las materias primas que se resumen en la Tabla 2.

**Tabla 2**

*Flujos de gasohol, etanol y gasolina a considerarse en el modelo.*

FLUIDO	FLUJO	
	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /s
Gasohol	151.04	4.20E-02
Etanol	11.78	3.27E-03
Gasolina	139.26	3.87E-02

### **Etapas 5 – Determinación de propiedades de los fluidos a mezclar.**

Las propiedades de los fluidos a mezclar son función directa de la temperatura considerada en el modelo. La temperatura elegida fue de 25 °C (298.15 K), valor que es usualmente elegido como referencia en ingeniería química [49], y que puede verificarse no se aleja de la temperatura promedio de la costa peruana [50]. A esta temperatura, se empleó el software Aspen HYSYS V10 con el paquete termodinámico PRSV (a fin de extender el paquete *Peng-Robinson* para que considere las ligeras desviaciones de la idealidad que podrían deberse al grupo hidroxilo del etanol), para la estimación de las propiedades del etanol. Para la gasolina, por otro lado, al tratarse de una mezcla compleja en lugar de una sustancia pura, tuvo que recurrirse a estándares locales e internacionales para las verificaciones el caso.

Al respecto, a nivel nacional se pudo encontrar que ni la densidad ni la viscosidad de la gasolina son propiedades que se reporten en las fichas técnicas locales, aunque sí se encontró que el valor de la gravedad específica (a 15.6/15.6 °C) oscilaba entre 0.73 a 0.76 en las Hojas de Datos de Seguridad MSDS [34]. Los valores tampoco se encontraron normados en el estándar ASTM de combustibles

para motores con ignición por chispa que se tenía disponible al momento de la investigación [51]. Por tanto, se recurrió a soporte bibliográfico para obtener valores de referencia, obteniendo un valor de viscosidad estimada para una gravedad específica de 0.748 [52], valor que se encuentra dentro del rango local. Los valores estimados para la gasolina junto a los obtenidos para el etanol se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3**

*Propiedades del etanol y la gasolina a considerarse en el modelo.*

FLUIDO	TEMPERATURA		
	DE	DENSIDAD	VISCOSIDAD
	REFERENCIA °C	kg/m <sup>3</sup>	kg/(m.s)
Etanol	25	788	0.001
Gasolina	25	748	0.0006

### **Etapa 6 – Especificación de los Sistemas de Flujo de los Volúmenes de Control.**

Determinados los flujos y las propiedades de los fluidos se procedió a especificar los diámetros apropiados de las tuberías a emplear para la evaluación del modelo. La experiencia, así como la bibliografía, recomiendan valores de velocidad en el rango de 3 a 9 ft/s para fluidos en el interior de tuberías [53], [54]. Así, para los flujos mostrados en la Tabla 2, se evaluaron los diámetros de tuberías comerciales para la gasolina, etanol y gasohol, obteniendo las velocidades de flujo detalladas en la Tabla 4.

El estudio de la Tabla 4 permite ver que la tubería de gasolina en la que se inyectará el etanol, para el flujo dado, puede ser de 8 o de 6 pulgadas sin que la velocidad del gasohol formulado se eleve por encima de los valores recomendados. Por otro lado, para el etanol podrán usarse tuberías de 2 o 2.5 pulgadas para su inyección en la tubería principal.

**Tabla 4**

*Diámetros de tuberías y velocidades de flujo para los fluidos que se emplearán en el modelo*

FLUIDO	FLUJO		DIÁMETRO DE TUBERÍA in	VELOCIDAD ft/s
	m <sup>3</sup> /s	ft <sup>3</sup> /s		
Gasolina	3.87E-02	1.37	10	2.50
			8	3.91
			6	6.96
			4	1.32
Etanol	3.27E-03	0.12	2.5	3.39
			2	5.30
			10	2.72
Gasohol	4.20E-02	1.49	8	4.24
			6	7.55

Respecto a los tanques de almacenamiento de gasolina y etanol, es necesario un dimensionamiento referencial con la finalidad de calcular las caídas de presión debidas a la pérdida de carga estática conforme los niveles de líquido descienden mientras los fluidos se mezclan. Debe mencionarse que los estándares del Instituto Americano del Petróleo disponibles al momento de la investigación no presentaban ni estaban destinados a establecer una serie fija de tamaños de tanques admisibles, sino más bien estarían orientados a permitir al comprador la selección de cualquier medida de tanque que pueda ser requerido para la mejor satisfacción de sus necesidades [55], [56]. Por tanto, la selección del tamaño del tanque de gasolina se efectuó en base a la experiencia, siendo que el autor disponía de información de un tanque similar, obtenida durante el transcurso de su carrera profesional, y que se muestra en la Tabla 5.

**Tabla 5***Dimensiones del tanque de gasolina empleadas para la solución del modelo*

DIÁMETRO ft	ALTURA DE REFERENCIA ft	NIVEL MUY ALTO ft	NIVEL MUY BAJO ft	VOLUMEN MÁXIMO Bbl	VOLUMEN MÍNIMO Bbl	VOLUMEN ÚTIL Bbl
70	43.0417	40	6	27,417.6	4,112.64	23,304.96

El dimensionamiento del tanque de etanol se hizo cuidando de que la carga estática proporcionada sea la suficiente para que la presión en el punto de inyección sea, por lo menos, igual a la de la gasolina, pues no se puede esperar una presión excesivamente más alta debido a que no se está empleando dispositivo alguno que agregue energía a los volúmenes de control, mientras que una presión más baja podría impedir que el etanol ingrese a la línea de gasolina y que se realice la mezcla. Por tanto, para que los caudales de gasolina y etanol guarden la relación apropiada durante la mezcla, se obtuvo la siguiente relación:

$$D_E = \sqrt{\frac{\dot{Q}_E}{\dot{Q}_G} \cdot D_G^2} \quad (23)$$

Donde:

$D_E$ : Diámetro del tanque de etanol.

$D_G$ : Diámetro del tanque de gasolina (70 ft).

$\dot{Q}_E$ : Flujo de etanol (0.12 ft<sup>3</sup>/s).

$\dot{Q}_G$ : Flujo de gasolina (1.37 ft<sup>3</sup>/s).

Tomando en cuenta que  $\frac{\dot{Q}_E}{(\dot{Q}_E + \dot{Q}_G)} = 0.078$ . Así, se obtuvo que el diámetro del tanque de etanol sería:

$$D_E = 20.36 \text{ ft}$$

El volumen útil del tanque de etanol se obtuvo a partir de la siguiente relación:

$$V_E = \frac{0.078}{0.922} \cdot V_G \quad (24)$$

Donde:

$V_E$ : Volumen útil del tanque de etanol.

$V_G$ : Volumen útil del tanque de gasolina (23,304.96 Bbl).

Se obtuvo:

$$V_E = 1,971.57 \text{ Bbl}$$

Que, junto a las dimensiones de la base, da una altura útil de fluido de 34 ft. El dimensionamiento del tanque de etanol se muestra en la Tabla 6.

**Tabla 6**

*Dimensiones del tanque de etanol empleadas para la solución del modelo*

DIÁMETRO ft	ALTURA DE REFERENCIA ft	NIVEL MUY ALTO Ft	NIVEL MUY BAJO ft	VOLUMEN MÁXIMO Bbl	VOLUMEN MÍNIMO Bbl	VOLUMEN ÚTIL Bbl
20.36	43.0417	40	6	2,319.47	347.90	1,971.57

Este dimensionamiento permitirá que el descenso de las alturas de gasolina y etanol, conforme se realiza la mezcla, sea idéntico, y que no origine fluctuaciones de presión por diferencias en la carga estática de los fluidos.

La especificación completa de los volúmenes de control se muestra en las Tablas 7 y 8. La Figura 2 muestra un esquema en calidad de referencia.

### **Etapas 7 – Modelamiento de los Volúmenes de Control.**

A partir de la Figura 2, es posible reescribir la ecuación (22) de la siguiente manera:

$$\alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + H + h_m + h = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_L \quad (25)$$

**Tabla 7***Especificación del sistema de gasolina para el Volumen de Control N° 1.*

PROPIEDAD	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Densidad de la gasolina	$\rho_G$	lbm/ft <sup>3</sup>	46.70
		kg/m <sup>3</sup>	748
Viscosidad de la gasolina	$\mu_G$	lbm/(ft.s)	4.03E-04
		kg/(m.s)	0.0006
Diferencia de cotas	$H$	ft	164.04
		m	50
Diámetro del tanque	$D_G$	ft	70
		m	21.34
Altura mínima de gasolina en el tanque	$h_m$	ft	6
		m	1.83
Altura útil de gasolina en el tanque	$h$	ft	34
		m	10.36
Volumen útil de gasolina en el tanque	$V_G$	Bbl	23,304.96
		m <sup>3</sup>	368.5
Longitud tubería de gasolina	$L$	ft	1,870.08
		m	570
Diámetro de la tubería de gasolina	$d_G$	in	6
		cm	15.24
Flujo de gasolina	$\dot{Q}_G$	ft <sup>3</sup> /s	1.37

De primer momento, es posible despreciar las pérdidas menores dado que se espera que, durante la caída del fluido, la cantidad de accesorios sea poca respecto a la longitud de la línea, así:

$$h_{L_{G/E}} = f_{G/E} \cdot \frac{L_{G/E}}{d_{G/E}} \cdot \frac{V_{2_{G/E}}^2}{2g} \quad (26)$$

$$f_{G/E} = 8 \left[ \left( \frac{8}{Re} \right)^{12} + (A + B)^{-1.5} \right]^{\frac{1}{12}} \quad (27)$$

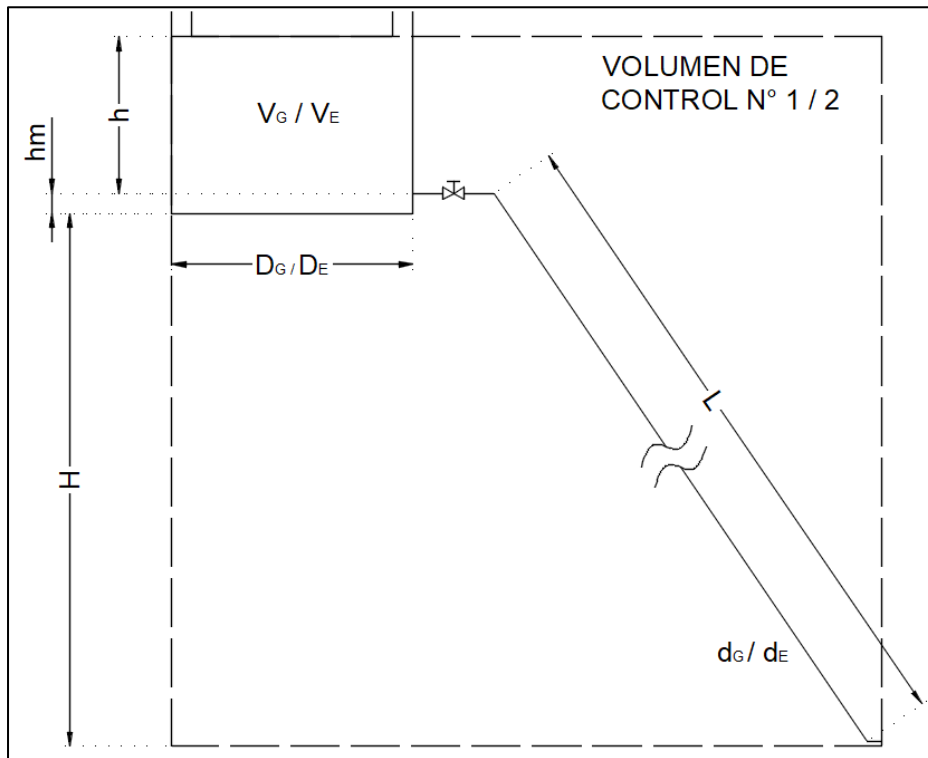
$$A = \left\{ -2.457 \ln \left[ \left( \frac{7}{Re} \right)^{0.9} + 0.27 \frac{\epsilon}{D} \right] \right\}^{16}$$

$$B = \left( \frac{37,530}{Re} \right)^{16}$$



**Figura 2**

*Esquema de la especificación de los volúmenes de control.*



Donde el subíndice  $G/E$  indica que la propiedad puede referirse a la gasolina o al etanol, respectivamente. La ecuación (26) es la ecuación típica de pérdida de carga en tuberías circulares y la ecuación (27) es la ecuación de Churchill, útil para el cálculo del factor de fricción tanto en régimen laminar como turbulento [23]. Como se esperaba, y según puede verse en la ecuación (25), la altura útil de fluido (gasolina o etanol) en el tanque,  $h$ , disminuye con el pasar del tiempo debido a los flujos; esto es,  $h = h(t)$ . Es claro que esto sucede porque los volúmenes útiles de los fluidos en los tanques irán disminuyendo, por tanto:  $V_{G/E} = V_{G/E}(t)$ . Así:

$$h(t) = \frac{V_{G/E}(t)}{\pi \cdot D_{G/E}^2 / 4} \quad (28)$$

**Tabla 8***Especificación del sistema de etanol para el Volumen de Control N° 2.*

PROPIEDAD	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Densidad del etanol	$\rho_E$	lbm/ft <sup>3</sup>	49.19
		kg/m <sup>3</sup>	788
Viscosidad del etanol	$\mu_E$	lbm/(ft.s)	6.72E-04
		kg/(m.s)	0.001
Diferencia de cotas	$H$	ft	164.04
		m	50
Diámetro del tanque	$D_E$	ft	20.36
		m	6
Altura mínima de etanol en el tanque	$h_m$	ft	1.83
		m	34
Altura útil de etanol en el tanque	$h$	ft	10.36
		m	1,971.57
Volumen útil de etanol en el tanque	$V_E$	Bbl	1,870.08
		ft	570
Longitud tubería de etanol	$L$	m	2.5
		in	2
Flujo de etanol	$\dot{Q}_E$	ft <sup>3</sup> /s	0.12

Y a su vez:

$$V_{G/E}(t) = V_{G/E}(0) - (\dot{Q}_{G/E} \times t) \quad (29)$$

Donde  $t$  es el tiempo transcurrido desde el inicio del flujo en  $t = 0$ . La solución de la ecuación (25) se trabajó por estados cuasi-estacionarios, empleando intervalos discretos de una hora de flujo, en los cuales el valor de la velocidad de descenso del fluido,  $V_1$ , era despreciable en comparación de la velocidad del fluido en el interior de la tubería,  $V_2$ . El valor del factor de corrección de la energía cinética se tomó como un valor medio entre 1.04 y 1.11, pues se comprobó que el flujo en ambas líneas era turbulento, y se hizo igual a 1.075. Los tubos se

consideraron de acero comercial con su rugosidad absoluta característica, y la gravedad se tomó como 9.81 m/s<sup>2</sup>. Estos valores se resumen en la Tabla 9.

**Tabla 9**

*Valores de las constantes asumidos durante la solución del modelo.*

PROPIEDAD	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Factor de corrección de la energía cinética	$\alpha_2$	---	1.075
Rugosidad absoluta tubería (acero comercial)	$\epsilon$	m	4.57E-05
Gravedad	$g$	m/s <sup>2</sup>	9.81

Simplificando la ecuación (25) de acuerdo a  $V_1 \ll V_2$  se tiene:

$$H + h_m + h(t) = \frac{P_{2G/E}(t)}{\rho_{G/E}g} + \alpha_2 \frac{V_{2G/E}^2}{2g} + h_{L_{G/E}} \quad (30)$$

Donde, por supuesto, tanto para la gasolina como el etanol, la velocidad en el interior de la tubería se calcula como:

$$V_{2G/E} = \frac{\dot{Q}_{G/E}}{\pi \cdot D_{G/E}^2 / 4} \quad (31)$$

Sin olvidar las relaciones obtenidas anteriormente:

$$D_E = \sqrt{\frac{\dot{Q}_E}{\dot{Q}_G} \cdot D_G^2} \quad (23)$$

Y,

$$V_E = \frac{0.078}{0.922} \cdot V_G \quad (24)$$

De esta manera el modelo para los volúmenes de control quedó completado, constituido por las ecuaciones (23), (24), (26), (27), (28), (29), (30) y (31); y trabajado con los valores de las Tablas 7, 8 y 9. La solución se trabajó en Microsoft Excel 2019, considerando intervalos de tiempo de una hora (3,600 segundos) de vaciado de tanques. Ello permitió obtener los valores de  $P_2$  tanto para la gasolina como para el alcohol antes de su ingreso al dominio de flujo. Ambos valores eran necesarios para definir las condiciones de frontera (*boundary conditions*) del dominio, necesarias para la solución numérica del proceso de mezcla.

### **Etapas 8 – Modelamiento de Continuidad y Turbulencia en el Dominio de Flujo.**

Una vez obtenidas las condiciones de frontera para el dominio de flujo, se efectuó el estudio de este empleando las ecuaciones de continuidad, momento, modelo de turbulencia y de mezcla bifásica. El modelo matemático queda establecido por la delimitación de estas ecuaciones. La formulación de la ecuación de continuidad fue directa, y dados los números de Reynolds obtenidos en los Volúmenes de Control se comprobó la existencia de régimen turbulento.

Dado que el estudio estuvo limitado a fluidos con densidad y viscosidad constantes, y se trabajó en un estado cuasi-estacionario, las ecuaciones del dominio se trabajaron en estado estacionario. Así, la ecuación de continuidad tomó la siguiente forma, en coordenadas cartesianas:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (32)$$

Mientras que la ecuación de balance de momento:

$$\rho \nabla \cdot \vec{V} \vec{V} = -\nabla p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (33)$$

El modelo de turbulencia usado fue el modelo  $k-\varepsilon$ . Este modelo se empleó dado que ha sido ya recomendado y empleado previamente por distintos investigadores, probando ser satisfactorio [57], [58], [59]. Dado que de los modelos  $k-\varepsilon$ , el modelo  $k-\varepsilon$  *realizable* satisface además ciertas restricciones matemáticas de los esfuerzos de Reynolds consistentes con la física de los flujos turbulentos, fue este el modelo empleado. Las ecuaciones del modelo  $k-\varepsilon$  *realizable*, en estado isotérmico estacionario y con marco de referencia fijo, son las siguientes [25]:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k V_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (34)$$

Y:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon V_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (35)$$

Donde:

$$C_1 = \text{máx.} \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad (36)$$

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad (37)$$

$$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (38)$$

En estas ecuaciones,  $G_k$  representa la generación de energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidad medios, y  $\sigma_k$  y  $\sigma_\varepsilon$  son los números de turbulencia de Prandtl para  $k$  y  $\varepsilon$ , respectivamente. Las relaciones para la viscosidad turbulenta (o viscosidad de remolino) son las siguientes:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (39)$$

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \Omega_{ij}\Omega_{ij}} \quad (40)$$

Los valores de  $A_s$  y demás variables están dados por:

$$A_s = \sqrt{6} \cos \phi \quad (41) \quad \phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W) \quad (42)$$

$$W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3} \quad (43) \quad \tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}} \quad (44)$$

Teniendo en cuenta que:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_j}{\partial x_i} + \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \right) \quad (45) \quad \Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_i}{\partial x_j} - \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \quad (46)$$

La generación de energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidad medios se modela de la siguiente manera:

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (47)$$

Donde las constantes del modelo son las siguientes:

$$C_2 = 1.9 \quad \sigma_\varepsilon = 1.2 \quad \sigma_k = 1.0 \quad A_0 = 4.04$$

### **Etapas 9 – Modelamiento de la mezcla gasolina/etanol en el Dominio de Flujo.**

Para el modelamiento del proceso de mezcla, el primer paso consistió en determinar el grado de acoplamiento de ambas fases (gasolina y etanol). Para ello, se emplearon dos parámetros que permitieran ayudar a identificar el modelo multifase apropiado: el parámetro de carga de partículas y el número de Stokes [28]. El parámetro de carga de partículas es el de mayor impacto, se define como la relación de densidad de masa de la fase dispersa (etanol – E) a la fase continua (gasolina – G):

$$\beta = \frac{\alpha_E \rho_E}{\alpha_G \rho_G}$$

Donde  $\alpha$  denota la fracción volumétrica y  $\rho$  denota la densidad. Así:

$$\beta = \frac{0.078 \cdot 788 \text{ kg/m}^3}{0.922 \cdot 748 \text{ kg/m}^3} = 0.0891$$

Sea:

$$\gamma = \rho_E / \rho_G = 788 \text{ kg/m}^3 / 748 \text{ kg/m}^3 = 1.0535$$

Y:

$$\kappa = \beta / \gamma = 0.0846$$

Obtenemos parámetros que nos permiten estimar la distancia promedio entre las partículas individuales de la fase dispersa (entendiendo que por “partícula” puede referirse también a una gota, burbuja, partícula, etc.). Un aproximado de esta distancia se obtiene por [60]:

$$\frac{L}{d_E} = \left( \frac{\pi}{6} \cdot \frac{1 + \kappa}{\kappa} \right)^{1/3} = \left( \frac{\pi}{6} \cdot \frac{1 + 0.0846}{0.0846} \right)^{1/3} = 1.9$$

Esto es, la escala de longitud (o longitud característica) es casi el doble del tamaño de las partículas dispersas, las cuales estarían separadas por casi el doble de su diámetro. Estas mezclas son conocidas como diluidas, pudiendo ser, a lo sumo, considerada como ligeramente intermedia, por encontrarse levemente por encima del 6% [61].

Por otro lado, el número de Stokes:

$$St = \frac{\tau_E}{t_s}$$

Donde:

$$\tau_E = \frac{\rho_E d_E^2}{18\mu_G}$$

Y  $t_s$  se basa en la longitud característica ( $L_s$ ) y velocidad característica ( $V_s$ ) del sistema bajo investigación:

$$t_s = \frac{L_s}{V_s}$$

Para el sistema bajo estudio, la longitud característica se tomará como el diámetro de la tubería donde se efectúa el mezclado, y la velocidad característica como la velocidad del flujo de gasohol correspondiente. A partir de la Tabla 4, es posible verificar que la velocidad de la mezcla será función del diámetro de tubería, por lo que el valor de  $t_s$  será de 0.067 s para la tubería de 6", y de 0.16 s para la de 8".

Considerando que el etanol es mezclado con gasolina comúnmente hasta concentraciones del 10% [62] sin exhibir separación por temperaturas encima de los -18 °C incluso en presencia de agua [63], se espera una solución verdadera, es decir, a escala molecular. Siendo que el tamaño de las moléculas de etanol es superior a los 3 Å (0.3 nm) [64], con un estimado de 4.4 Å (0.44 nm) [65], el tiempo de respuesta de las partículas sería:

$$\tau_E = \frac{788 \frac{kg}{m^3} \cdot 4.4 \times 10^{-10} m}{18 \cdot 0.0006 \frac{kg}{m \cdot s}} = 3.21 \times 10^{-5} s$$

Luego, el número de Stokes será este valor dividido entre 0.067 s para la tubería de 6", y 0.16 s para la de 8". Es decir, le corresponderá un valor de  $4.79 \times 10^{-4}$  o  $2.01 \times 10^{-4}$ . En ambos casos, dado que  $St \ll 1.0$ , las partículas de la fase dispersa (etanol) seguirán el flujo de gasolina muy de cerca y no de manera independiente. Entonces, sí existe acoplamiento entre la gasolina y el etanol.

El acoplamiento entre fases hace posible emplear un modelo de mezcla multifásico simplificado [25], asumiendo un equilibrio local en escalas espaciales de longitudes cortas. Este modelo de mezcla modela ambas fases resolviendo



las ecuaciones de momento y continuidad para la mezcla, las ecuaciones de fracción en volumen para la fase secundaria (etanol), y expresiones algebraicas para las velocidades relativas.

Para el estado estacionario de fluidos con densidad y viscosidad constantes, donde los subíndices “m” corresponden a la mezcla, “E” al etanol y “G” a la gasolina; las ecuaciones son las siguientes:

Ecuación de continuidad:

$$\nabla \cdot (\rho_m \vec{V}_m) = 0 \quad (48)$$

Donde  $V_m$  es la velocidad promedio en masa. Siendo “ $\alpha$ ” la fracción volumétrica y  $\rho_m$  la densidad de mezcla:

$$\vec{V}_m = \frac{\alpha_E \rho_E \vec{V}_E + \alpha_G \rho_G \vec{V}_G}{\rho_m} \quad (49)$$

$$\alpha_E + \alpha_G = 1 \quad (50)$$

$$\rho_m = \alpha_E \rho_E + \alpha_G \rho_G \quad (51)$$

Por otro lado, la ecuación de momento para la mezcla:

$$\nabla \cdot (\rho_m \vec{V}_m \vec{V}_m) = -\nabla p + \rho_m \vec{g} + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{V}_m + \nabla \vec{V}_m^T)] + \vec{F} + \nabla \cdot (\alpha_E \rho_E \vec{V}_{a,E} \vec{V}_{a,E})$$

Donde  $\vec{F} = 0$  pues no existe otra fuerza de cuerpo que afecte a todo el sistema fluido aparte de la gravedad, que ya está considerada, y  $\vec{V}_{a,E}$  es la velocidad de deriva de la fase secundaria (etanol). Así:

$$\nabla \cdot (\rho_m \vec{V}_m \vec{V}_m) = -\nabla p + \rho_m \vec{g} + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{V}_m + \nabla \vec{V}_m^T)] + \nabla \cdot (\alpha_E \rho_E \vec{V}_{a,E} \vec{V}_{a,E}) \quad (52)$$

La viscosidad de la mezcla está dada por:

$$\mu_m = \alpha_E \mu_E + \alpha_G \mu_G \quad (53)$$

Mientras que la velocidad de deriva:

$$\vec{V}_{a,E} = \vec{V}_E - \vec{V}_m$$

Definiendo la velocidad relativa como la velocidad de la fase secundaria (etanol – E), respecto a la fase primaria (gasolina – G):

$$\vec{V}_{EG} = \vec{V}_E - \vec{V}_G \quad (54)$$

Y también la fracción masa de la fase secundaria como:

$$c_E = \frac{\alpha_E \rho_E}{\rho_m} \quad (55)$$

Se conecta a la velocidad de deriva con la velocidad relativa a través de la siguiente expresión:

$$\vec{V}_{a,E} = \vec{V}_{EG} - c_E \vec{V}_{EG}$$

$$\vec{V}_{a,E} = (1 - c_E) \vec{V}_{EG} \quad (56)$$

Para asumir que el modelo para la velocidad relativa puede establecerse de manera algebraica, debe asumirse primero un equilibrio local en escalas espaciales de longitudes cortas para ambas fases. Siendo este el caso, según se ha demostrado al principio de esta etapa, la forma de la velocidad relativa es dada por [66]:

$$\vec{V}_{EG} = \frac{\tau_E}{f_{drag}} \frac{(\rho_E - \rho_m)}{\rho_E} \vec{a}$$

Donde  $\tau_E$  es el tiempo de respuesta de la partícula (etanol), definido anteriormente como:

$$\tau_E = \frac{\rho_E d_E^2}{18\mu_G}$$

Donde  $d$  se definió ya antes como el diámetro de las partículas (moléculas) de etanol y  $\vec{a}$  es su aceleración.  $f_{drag}$  es llamada la función de arrastre, que según el modelo de Schiller y Naumann (aceptable para pares de fases fluido-fluido) está definida como [67]:

$$\begin{aligned} f_{drag} &= 1 + 0.15Re^{0.687} \quad \text{para } Re \leq 1,000 \\ f_{drag} &= 0.0183Re \quad \text{para } Re > 1,000 \end{aligned} \quad (57)$$

Donde  $Re$  es el número de Reynolds relativo:

$$Re = \frac{\rho_G |\vec{V}_E - \vec{V}_G| d_E}{\mu_G} \quad (58)$$

Y la aceleración tiene la forma:

$$\vec{a} = \vec{g} - (\vec{V}_m \cdot \nabla) \vec{V}_m \quad (59)$$

Para flujos turbulentos la velocidad relativa deberá contener además un término difusivo, debido a la dispersión que tiene lugar en la ecuación de momento para la fase dispersa. Esta dispersión puede agregarse a la velocidad relativa:

$$\begin{aligned} \vec{V}_{EG} &= \frac{\tau_E (\rho_E - \rho_m)}{f_{drag} \rho_E} \vec{a} - \frac{\eta_t}{\sigma_t} \left( \frac{\nabla \alpha_E}{\alpha_E} - \frac{\nabla \alpha_G}{\alpha_G} \right) \\ \vec{V}_{EG} &= \frac{d_E^2 (\rho_E - \rho_m)}{18\mu_G f_{drag}} \vec{a} - \frac{\eta_t}{\sigma_t} \left( \frac{\nabla \alpha_E}{\alpha_E} - \frac{\nabla \alpha_G}{\alpha_G} \right) \end{aligned} \quad (60)$$

Donde  $\sigma_t$  es la relación de los números de Prandtl/Schmidt, que puede ser tomada como 0.75, y  $\eta_t$  es la difusividad turbulenta, calculada a partir de la correlación de la fluctuación de velocidad continua-dispersa, de la siguiente manera [68]:

$$\eta_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \left( \frac{\gamma_\gamma}{1 + \gamma_\gamma} \right) (1 + C_\beta \xi^2)^{-1/2} \quad (61)$$

Donde:

$$\xi = \frac{|\vec{V}_{EG}|}{\sqrt{\frac{2}{3}}k} \quad (62)$$

Y  $\gamma_\gamma$  es la relación temporal entre la escala de tiempo de los remolinos de turbulencia energética afectados por el efecto de trayectorias cruzadas, y el tiempo de respuesta (relajación) de la partícula:

$$\gamma_\gamma = \left( \frac{3}{2} C_\mu \frac{k}{\varepsilon} \right) / \left( \frac{\rho_E d_E^2}{18 \mu_G} \right) \quad (63)$$

Y:

$$C_\beta = 1.8 - 1.35(\cos \theta)^2 \quad (64)$$

$$\cos \theta = \frac{\vec{V}_{EG} \cdot \vec{V}_E}{|\vec{V}_{EG}| |\vec{V}_E|} \quad (65)$$

Por último, a partir de la ecuación de continuidad para la fase etanol (E), se obtiene la ecuación de fracción de volumen en estado estacionario:

$$\nabla \cdot (\alpha_E \rho_E \vec{V}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_E \rho_E \vec{V}_{\alpha,E}) + \dot{m}_{GE} - \dot{m}_{EG}$$

Donde  $\dot{m}_{GE}$  es la velocidad de flujo de masa desde la fase gasolina hacia la fase etanol, mientras que  $\dot{m}_{EG}$  es la velocidad de flujo de masa desde la fase etanol hacia la fase gasolina. Ambos valores son iguales a cero, pues para considerar la existencia de transferencia de masa ambas fases (gasolina y etanol) deberían tener al menos dos especies, y al menos una de ellas tendría que estar presente en ambas fases, lo que no es el caso. La ecuación luego se simplifica a:

$$\nabla \cdot (\alpha_E \rho_E \vec{V}_E) = 0 \quad (66)$$

De esta manera se contempló también el modelo para el dominio de flujo, constituido por las ecuaciones (y valores de constantes) (32) hasta (66). Con la solución de las mismas junto a las brindadas para los volúmenes de control pudo determinarse la longitud de mezcla, verificando la convergencia de la solución del modelo, el grado de mezcla obtenido y el sentido físico de los resultados.

#### **Etapa 10 – Solución y Simulación del Modelo.**

Se efectuaron diez corridas, considerando todos los diámetros permisibles de tuberías de acuerdo a las velocidades de los fluidos, como se observó en la Tabla 4. Las corridas primera a cuarta consideraron una tubería de gasolina de 6" y una inyección lateral de etanol por una tubería de 2.5". Las corridas quinta y sexta consideraron una tubería de gasolina de 8" y una inyección lateral de etanol por una tubería de 2.5". Las corridas séptima y octava consideraron una tubería de gasolina de 6" y una inyección lateral de etanol por una tubería de 2". Finalmente, las corridas novena y décima consideraron una tubería de gasolina de 8" y una inyección lateral de etanol por una tubería de 2".

La solución del modelo para los volúmenes de control, constituido por las ecuaciones (23), (24), (26), (27), (28), (29), (30) y (31), fue realizada en Microsoft Excel 2019, considerando intervalos de tiempo de una hora (3,600 segundos) de vaciado de tanques en estado cuasi-estacionario. Esto originó caídas de presión progresivas hasta la entrada de las corrientes en el dominio de flujo.

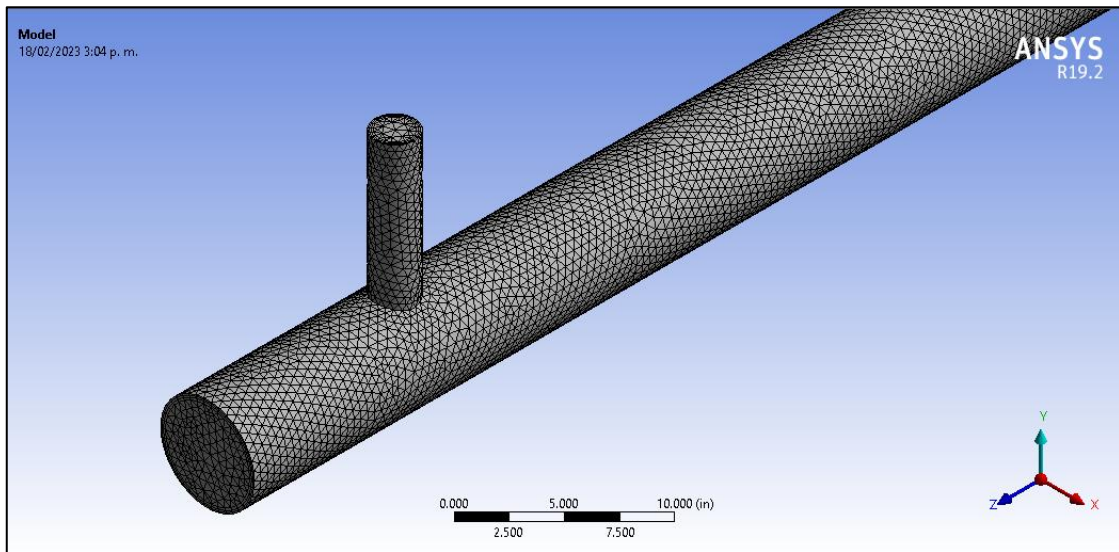
Las ecuaciones (32) a (66) del modelo, empleadas en el dominio de flujo, fueron resueltas mediante el software Ansys FLUENT 19.2, considerando estado estacionario, donde se modeló la geometría de los tubos empleando mallas con elementos tetraédricos de 1 in, disminuyendo finalmente hasta 0.5 in para asegurar la independencia del modelo de la malla empleada, aplicando una capa límite cerca de las regiones de pared, a fin de obtener el comportamiento de la mezcla cerca de las regiones de tubería, como se aprecia en la Figura 3. Para asegurar la independencia de la solución del modelo con la malla empleada se hizo el intento de obtener mallas con elementos más pequeños, pero la exigencia de recursos computacionales era alta y resultó inviable, por lo que el valor límite máximo trabajado para la malla fue de 0.5 in.

Para la solución en el dominio de flujo, las corrientes de al ingreso de gasolina y etanol, aunque se constataron turbulentas, se consideraron estar en flujo totalmente desarrollado y, por lo tanto, normal a las superficies de ingreso en las tuberías. Esta es una condición que se considera cumplirse después de cierto tramo de acaecida alguna perturbación en el fluido, tramo conocido comúnmente como longitud de entrada hidrodinámica. Para flujo turbulento, esta longitud se considera por lo general, en numerosos flujos, como diez veces el diámetro de la tubería por donde fluye el líquido (10D) [23]. Existen, sin embargo, estudios de que la longitud requerida podría ser de 50 diámetros (50D) después de un codo de 90° [69], o incluso podrían requerirse longitudes de hasta 150 diámetros (150D) [70].

El equipo de cómputo empleado para la investigación fue una laptop con un procesador AMD FX-7500 Radeon R7, 10 Compute Cores 4C+6G, 2.10 GHz. Memoria instalada de 16.0 GB y Sistema Operativo Windows 10 Home Single Language de 64 bits versión 22H2, procesador basado en x64.

### Figura 3

Malla empleada para la solución del dominio de flujo.



#### **Primera corrida.**

En una primera corrida se obtuvieron los valores de  $P_2$  estático y total tanto para la gasolina como para el alcohol antes de su ingreso al dominio de flujo. La Tabla 10 y la Tabla 11 muestran la variación de presión obtenida en función del tiempo para la gasolina y el etanol, respectivamente.

Con los resultados obtenidos se efectuó la solución en el dominio de flujo. Se inició con el  $t = 0 h$  para determinar las condiciones de mezcla mediante la resolución de las ecuaciones de transporte y modelo de turbulencia. Como primera prueba se consideró un tubo de 400" de largo, a fin de verificar la convergencia y sentido físico de los resultados, así como el consumo de recursos computacionales. Las condiciones de frontera aplicadas (*boundary conditions*) se muestran en la Tabla 12.

En la presente corrida, sin embargo, se observó un alto consumo de recursos computacionales, además de una tendencia a obtener una mayor longitud de mezcla respecto a otras corridas que se efectuaron después. La Figura 4 muestra el perfil de concentraciones obtenido.

**Tabla 10**

*Variación en el tiempo de la presión de la corriente de gasolina antes de su ingreso al dominio de flujo para la primera corrida.*

<b>TIEMPO (t)</b> <b>h</b>	<b>ALTURA ÚTIL DE GASOLINA EN EL TANQUE (h)</b> <b>m</b>	<b>PRESIÓN MANOMÉTRICA ESTÁTICA DE LA GASOLINA A SU INGRESO AL DOMINIO DE FLUJO (P<sub>2G</sub>)</b> <b>kPa</b>
0	10	349.90
1	9.97	347.05
2	9.58	344.19
3	9.19	341.33
4	8.81	338.47
5	8.42	335.61
6	8.03	332.76
7	7.64	329.90
8	7.25	327.04
9	6.86	324.18
10	6.47	321.32
11	6.08	318.46
12	5.69	315.61
13	5.30	312.75
14	4.91	309.89
15	4.52	307.03
16	4.13	304.17
17	3.74	301.32
18	3.35	298.46
19	2.96	295.60
20	2.57	292.74
21	2.18	289.88
22	1.79	287.03
23	1.40	284.17
24	1.02	281.31
25	0.63	278.45
26	0.24	275.59



**Tabla 11**

*Variación en el tiempo de la presión de la corriente de etanol antes de su ingreso al dominio de flujo para la primera corrida.*

<b>TIEMPO (t)</b> <b>h</b>	<b>ALTURA ÚTIL DE ETANOL EN EL TANQUE (h)</b> <b>m</b>	<b>PRESIÓN MANOMÉTRICA ESTÁTICA DE ETANOL A SU INGRESO AL DOMINIO DE FLUJO (P<sub>2E</sub>)</b> <b>kPa</b>
0	10	392.60
1	9.97	389.59
2	9.58	386.58
3	9.19	383.57
4	8.81	380.56
5	8.42	377.55
6	8.03	374.54
7	7.64	371.53
8	7.25	368.51
9	6.86	365.50
10	6.47	362.49
11	6.08	359.48
12	5.69	356.47
13	5.30	353.46
14	4.91	350.45
15	4.52	347.44
16	4.13	344.43
17	3.74	341.42
18	3.35	338.41
19	2.96	335.39
20	2.57	332.38
21	2.18	329.37
22	1.79	326.36
23	1.40	323.35
24	1.02	320.34
25	0.63	317.33
26	0.24	314.32

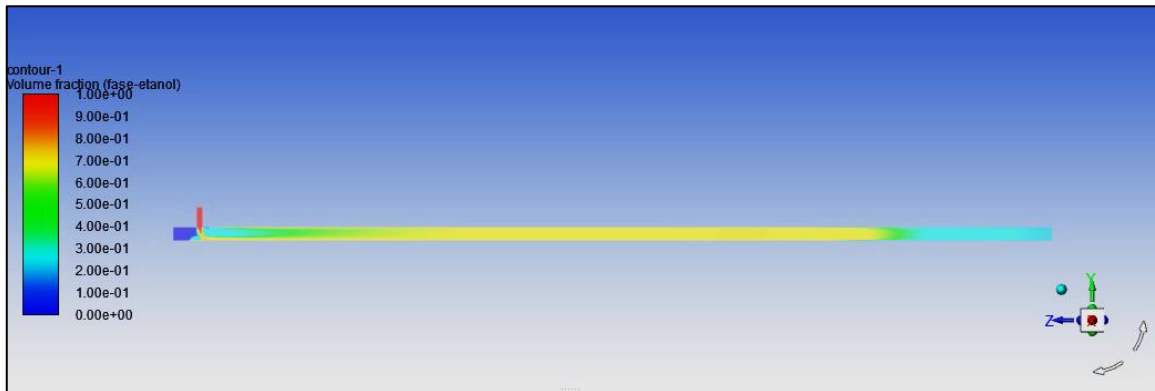
**Tabla 12**

*Condiciones de frontera empleadas en el dominio de flujo para la primera corrida.*

DESCRIPCIÓN	OBSERVACIÓN	UNIDAD	VALOR
	Manométrica	kPa(g)	349.90
Presión de entrada de gasolina	Total	kPa(g)	351.59
	manométrica	kPa(g)	392.60
Presión de entrada de etanol	Total	kPa(g)	393.02
	manométrica	kPa(g)	393.02
Concentración etanol a la salida	Después de las 400 in de longitud.	%vol	7.8
Tubería	Estacionaria	---	No deslizamiento

**Figura 4**

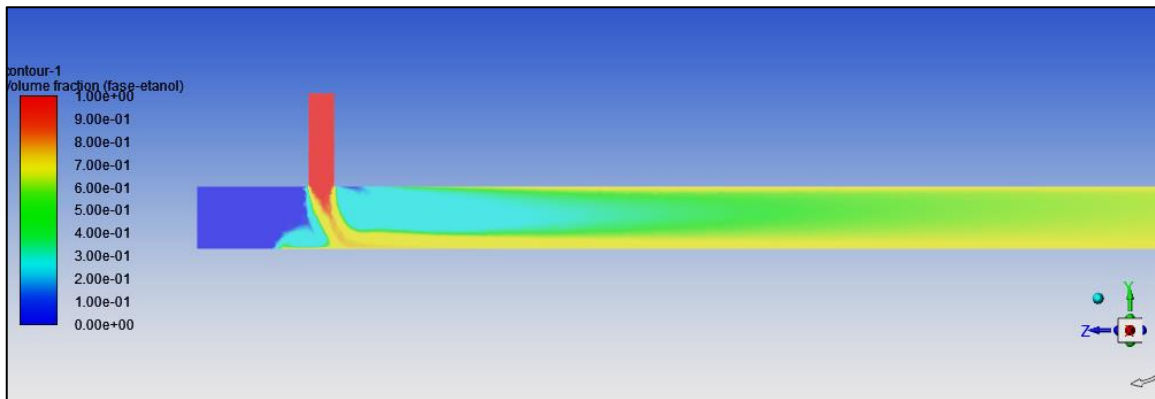
*Perfil de concentraciones de etanol en la primera corrida.*



La Figura 5 muestra una ampliación del punto de inyección de etanol. Como se puede apreciar, la mayor presión de la corriente lateral de etanol permite su fácil ingreso a la línea de gasolina; sin embargo, origina una pequeña región de retroflujo que actuaría como un impedimento al flujo principal, originando una mayor longitud de mezcla. Esta dificultad se amplía con la Figura 6, donde se verifica la dificultad de convergencia hacia la concentración objetivo de etanol de 0.078 fracción volumen a la salida de la tubería.

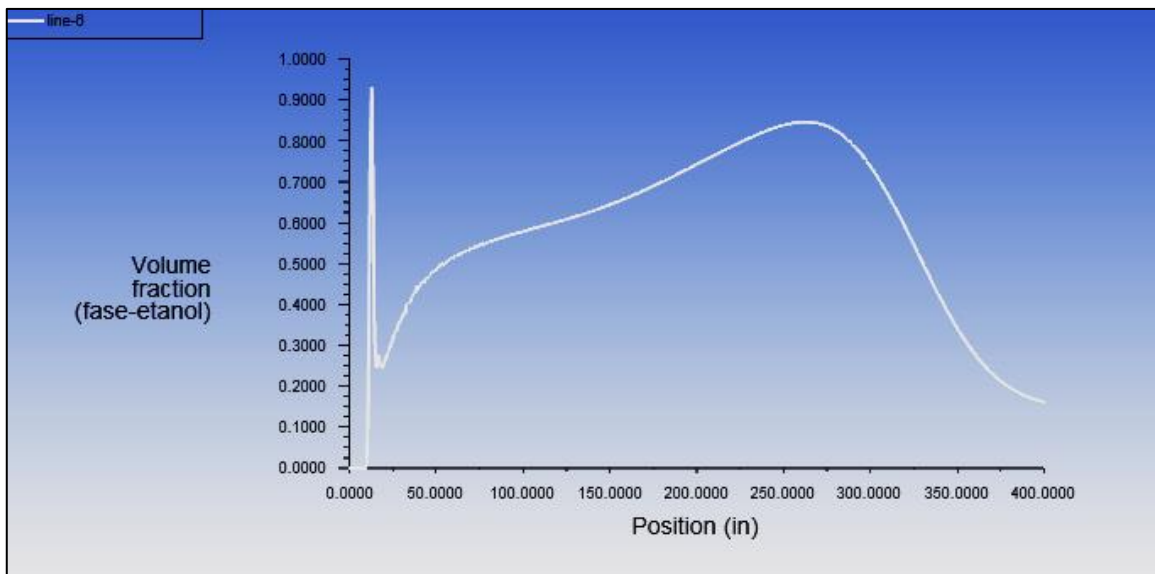
**Figura 5**

*Ampliación del punto de inyección de etanol en la primera corrida.*



**Figura 6**

*Concentración de etanol a lo largo de la tubería en la primera corrida.*



***Segunda corrida.***

El hecho de que se verificara que la presión lateral más alta de la corriente de etanol producía una mayor longitud de mezcla y también una mayor dificultad de convergencia con los recursos computacionales disponibles, hizo evidente la necesidad de disminuir la presión de ingreso de la corriente de etanol. Sin embargo, considerando que una presión más baja de esta corriente no permitiría su ingreso a la corriente principal, se tomó como referencia el escenario límite en el que las presiones en el punto de ingreso son las mismas. Las nuevas

condiciones de frontera se muestran en la Tabla 13.

El perfil de concentraciones obtenido se muestra en la Figura 7. Puede apreciarse que, con presiones iguales en el punto de mezcla, el ingreso de etanol es viable, pues ambos flujos tenderán a ir corriente abajo, donde la presión es menor. La Figura 8 muestra una ampliación del punto de inyección. Como se puede ver, no existen zonas de retroflujo, a diferencia de la primera corrida (Figura 5), hecho que influye en una menor longitud de mezcla. Sin embargo, a pesar de que los recursos consumidos fueron menores y la convergencia fue más rápida, no se llegó al resultado deseado.

**Tabla 13**

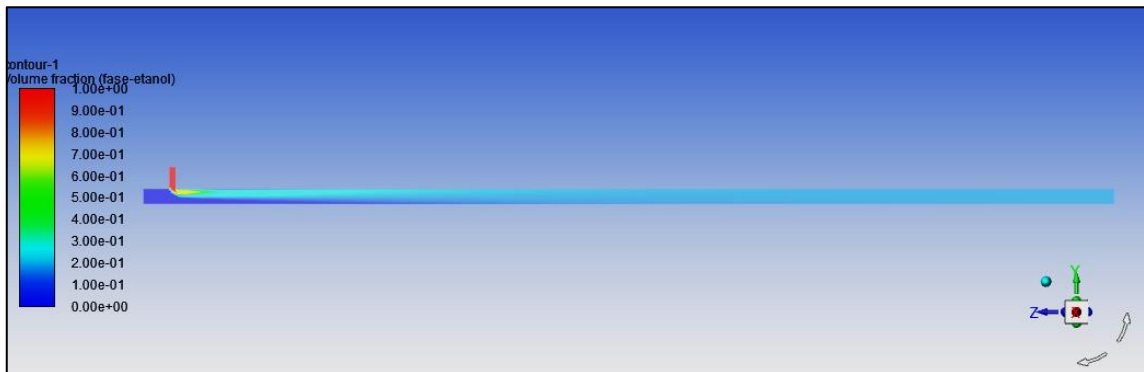
*Condiciones de frontera empleadas en el dominio de flujo para la segunda corrida*

DESCRIPCIÓN	OBSERVACIÓN	UNIDAD	VALOR
	Manométrica	kPa(g)	349.90
Presión de entrada de gasolina	Total	kPa(g)	351.59
	manométrica		
	Manométrica	kPa(g)	349.90
Presión de entrada de etanol	Total	kPa(g)	351.59
	manométrica		
Concentración etanol a la salida	Después de las 400 in de longitud	%vol	7.8
Tubería	Estacionaria	---	No deslizamiento

La concentración de etanol a lo largo de la tubería para la segunda corrida se muestra en la Figura 9. Puede apreciarse que la concentración de etanol a la salida de la mezcla converge hacia el valor de 0.13 fracción volumen, siendo que el objetivo era 0.078, según se detalló en la condición de frontera. Esto permite ver que establecer condiciones de frontera basadas en la presión no sería lo más apropiado, pues, aunque podría esperarse una ligera diferencia debido a la resolución de ecuaciones diferenciales por Ansys FLUENT para la obtención de los flujos de masa, la diferencia obtenida en esta situación (0.052) es intolerable.

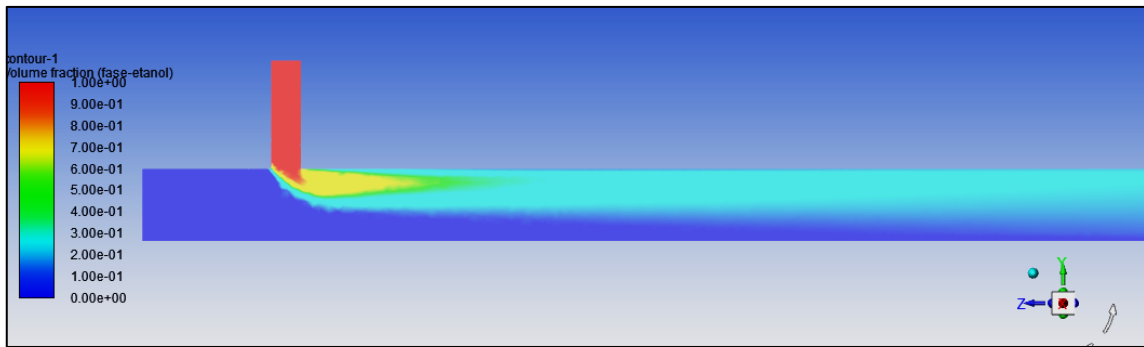
**Figura 7**

*Perfil de concentraciones de etanol en la segunda corrida.*



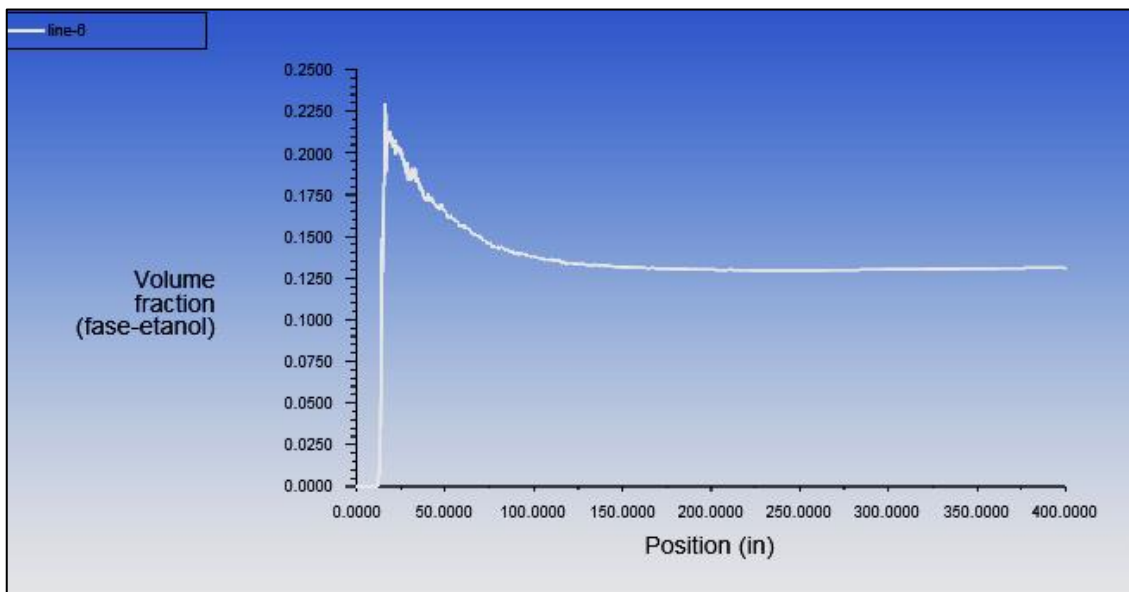
**Figura 8**

*Ampliación del punto de inyección de etanol en la segunda corrida.*



**Figura 9**

*Concentración de etanol a lo largo de la tubería en la segunda corrida.*



### **Tercera corrida.**

En la tercera corrida se cambiaron las condiciones de frontera a valores de flujo de masa para el ingreso de gasolina y etanol. Sin embargo, la condición de frontera de la salida no podría ser especificada como concentración de etanol en volumen. Esta condición deberá ser fijada entonces en base a la presión. Por lo tanto, se efectuó una primera prueba con las condiciones de frontera detalladas en la Tabla 14. Los valores de presión obtenidos en el programa se muestran en la Figura 10.

Puede apreciarse que la presión de ingreso obtenida para el etanol es ligeramente superior a la de la gasolina. Sin embargo, dado que el flujo principal transcurre por la tubería de gasolina, la caída de presión se tomará en referencia a esa línea. Luego, la caída de presión será:

$$\Delta P = \text{entrada gasolina} - \text{salida gasohol}$$
$$\Delta P = 341,230.38 - 338,678.9 = 2,551.48 \text{ Pa}$$

**Tabla 14**

*Condiciones de frontera empleadas en el dominio de flujo para la primera prueba de la tercera corrida.*

DESCRIPCIÓN	OBSERVACIÓN	UNIDAD	VALOR
Flujo de entrada de gasolina	---	kg/s	28.9
Flujo de entrada de etanol	---	kg/s	2.58
Presión de gasohol a la salida	Después de las 400 in de longitud. Valor arbitrario, se presume cercano a la presión de ingreso de la gasolina y etanol.	Pa(g)	338678.9
Tubería	Estacionaria	---	No deslizamiento

## Figura 10

*Fluctuaciones de presión de la primera prueba de la tercera corrida.*

entrada_etanol	341680.7
entrada_gasolina	341230.38
salida_gasohol	338678.9
-----	-----

Por tanto, para la presión de entrada que se ha usado en las dos corridas anteriores, la presión de salida que deberá fijarse como condición de frontera en la tercera corrida será:

$$P_{salida} = 349,903.9 - 2,551.48 = 347,352.42 \text{ Pa} = 347.35 \text{ kPa}$$

Las condiciones de frontera para la tercera corrida se muestran en la Tabla 15.

## Tabla 15

*Condiciones de frontera empleadas en el dominio de flujo para la tercera corrida*

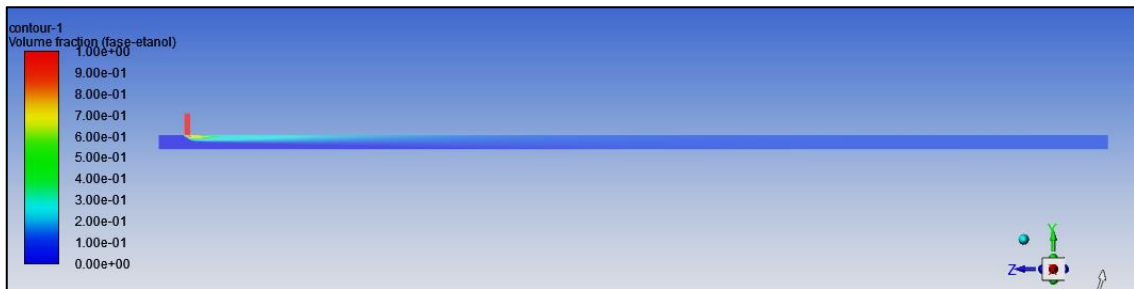
DESCRIPCIÓN	OBSERVACIÓN	UNIDAD	VALOR
Flujo de entrada de gasolina	---	kg/s	28.9
Flujo de entrada de etanol	---	kg/s	2.58
Presión de gasohol a la salida	Después de las 400 in de longitud	Pa(g)	347,352.42
Tubería	Estacionaria	---	No deslizamiento

La Figura 11 muestra el perfil de concentraciones de la tercera corrida. Puede apreciarse que, nuevamente, no existen problemas para el ingreso de etanol a la línea principal, sin existir tampoco zonas de retroflujo. Las presiones obtenidas para las corrientes en esta tercera corrida se muestran en la Figura 12.

Puede apreciarse que la presión de la corriente de gasolina cumple con el valor calculado mostrado en la Tabla 10. La presión de la corriente de etanol, para su ingreso, deberá ser esencialmente la misma.

**Figura 11**

*Perfil de concentraciones de etanol en la tercera corrida.*



**Figura 12**

*Presiones de las corrientes en la tercera corrida.*

entrada_etanol	350354.16
entrada_gasolina	349903.86
salida_gasohol	347352.42
-----	-----

La Figura 13 muestra la concentración de etanol a lo largo de la tubería en la tercera corrida. La concentración deseada a la salida finalmente se logró. La longitud de mezcla, considerando una precisión del orden de  $10^{-3}$  para la fracción en volumen, es de 199.6 in (aproximadamente 5 m), donde se verificó una concentración de 0.0784 en fracción volumen, con tendencia al descenso, hasta llegar a una concentración de 0.0781 a la salida de la tubería de 400 in de longitud.

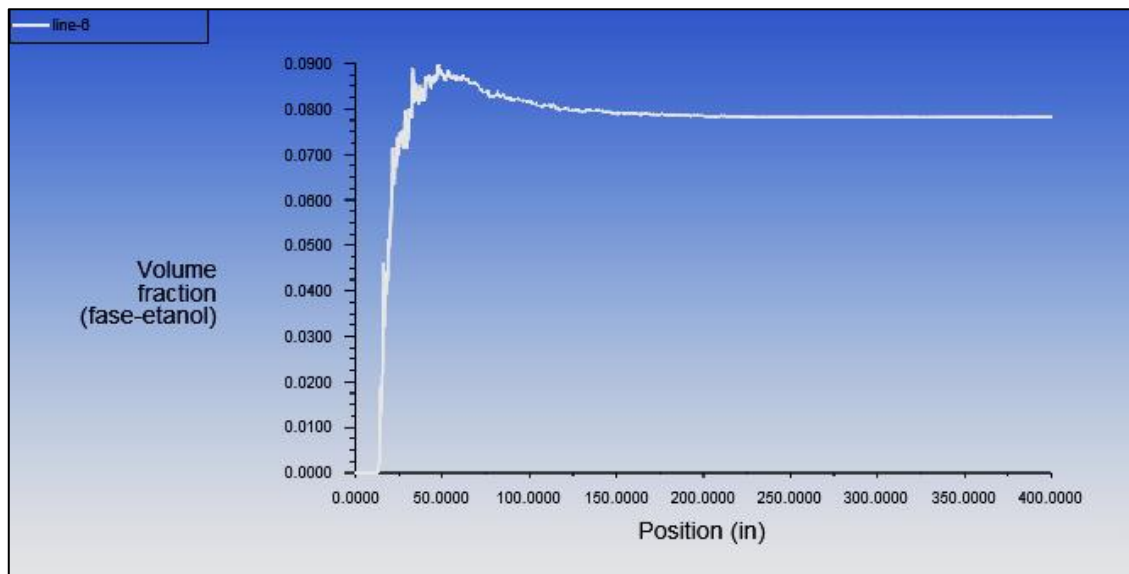
#### **Cuarta corrida.**

En la cuarta corrida se consideró el escenario con la menor presión disponible, debido al descenso de la altura en el tanque de gasolina. Según se aprecia en la Tabla 10, esta presión es de 275,593.4 Pa. Debido a que el flujo y el sistema no han cambiado respecto a la tercera corrida, puede esperarse la misma caída de presión, esto es, 2,551.48 Pa. Por lo tanto, se tendrán las condiciones de frontera que se dan en la Tabla 16.



**Figura 13**

*Concentración de etanol a lo largo de la tubería en la tercera corrida.*



**Tabla 16**

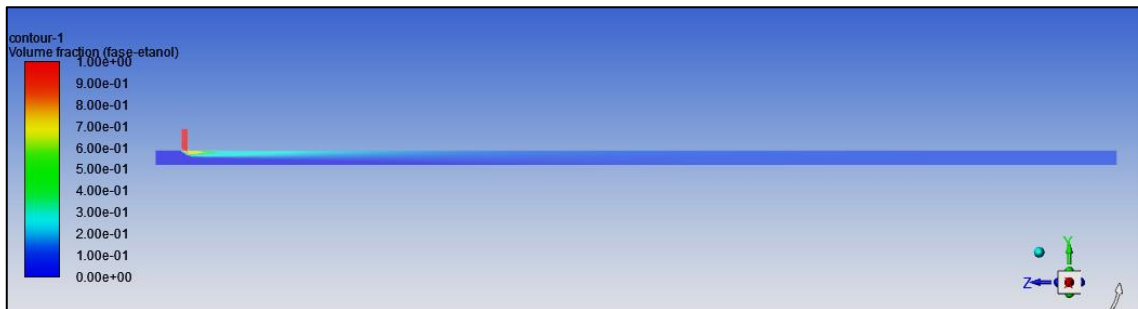
*Condiciones de frontera empleadas en el dominio de flujo para la cuarta corrida*

DESCRIPCIÓN	OBSERVACIÓN	UNIDAD	VALOR
Flujo de entrada de gasolina	---	kg/s	28.9
Flujo de entrada de etanol	---	kg/s	2.58
Presión de gasohol a la salida	Después de las 400 in de longitud	Pa(g)	273,041.9
Tubería	Estacionaria	---	No deslizamiento

La Figura 14 muestra el perfil de concentraciones de la cuarta corrida. Puede apreciarse que, nuevamente, no existen problemas para el ingreso de etanol a la línea principal, sin existir tampoco zonas de retroflujo. Las presiones obtenidas para las corrientes en esta tercera corrida se muestran en la Figura 15.

**Figura 14**

*Perfil de concentraciones de etanol en la cuarta corrida.*



**Figura 15**

*Presiones de las corrientes en la cuarta corrida.*

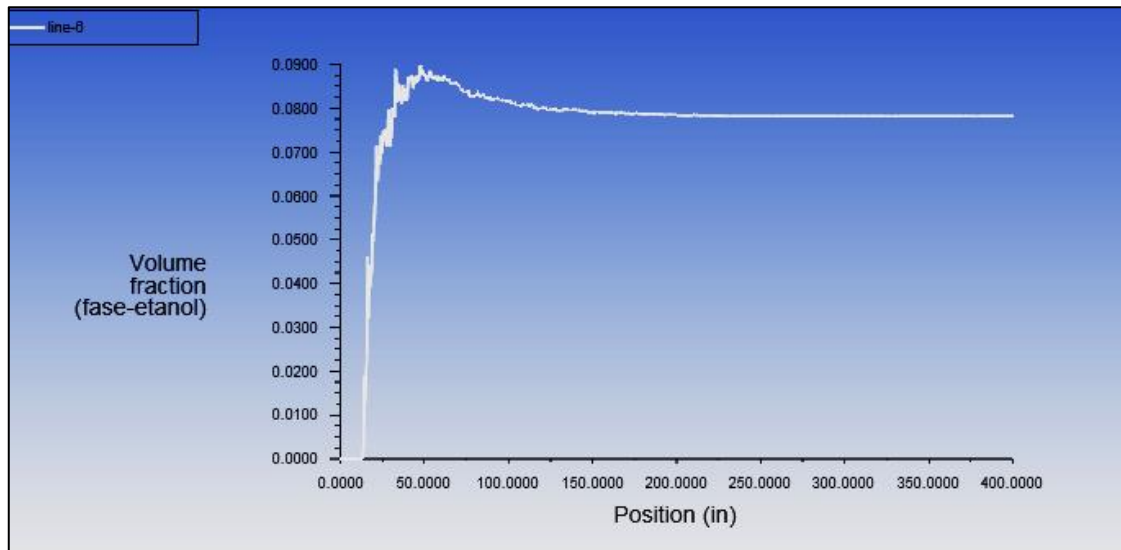
entrada_etanol	276043.65
entrada_gasolina	275593.34
salida_gasohol	273041.92
-----	-----

Puede apreciarse que la presión de la corriente de gasolina cumple con el valor calculado correspondiente al menor nivel de gasolina en el tanque, mostrado en la Tabla 10. Nuevamente, la presión de la corriente de etanol, para su ingreso, deberá ser esencialmente la misma.

La Figura 16 muestra la concentración de etanol a lo largo de la tubería en la cuarta corrida. La concentración deseada a la salida se ha logrado otra vez. En el presente caso, la longitud de mezcla, considerando una precisión del orden de  $10^{-3}$  para la fracción en volumen, es también de 199.6 in (aproximadamente 5 m), donde se verificó una concentración de 0.0784 en fracción volumen, con tendencia al descenso, hasta llegar a una concentración de 0.0781 a la salida de la tubería de 400 in de longitud.

**Figura 16**

*Concentración de etanol a lo largo de la tubería en la cuarta corrida.*



**Quinta corrida.**

En esta corrida se incrementó el diámetro de la tubería de gasolina a 8", considerando la tubería de inyección lateral para el etanol de 2.5". La longitud de la tubería de gasolina se incrementó a 600", en caso la longitud de mezcla se viera incrementada. Los nuevos valores de presión obtenidos, considerando el cambio de diámetro de la tubería de gasolina, se muestran en la Tabla 17 y la Tabla 18.

De la misma manera que en la tercera corrida, se efectuó una primera prueba con las condiciones de frontera detalladas en la Tabla 19, donde se supuso una presión al término de la tubería de 8". Los valores de presión obtenidos se muestran en la Figura 17.

Puede apreciarse que la caída de presión es de 890.93 Pa.

**Tabla 17**

*Variación en el tiempo de la presión de la corriente de gasolina antes de su ingreso al dominio de flujo para la quinta corrida.*

<b>TIEMPO (t)</b> <b>h</b>	<b>ALTURA ÚTIL DE GASOLINA EN EL TANQUE (h)</b> <b>m</b>	<b>PRESIÓN MANOMÉTRICA ESTÁTICA DE LA GASOLINA A SU INGRESO AL DOMINIO DE FLUJO (P<sub>2G</sub>)</b> <b>kPa</b>
0	10	431.16
1	9.97	428.30
2	9.58	425.44
3	9.19	422.59
4	8.81	419.73
5	8.42	416.87
6	8.03	414.01
7	7.64	411.15
8	7.25	408.29
9	6.86	405.44
10	6.47	402.58
11	6.08	399.72
12	5.69	396.86
13	5.30	394.00
14	4.91	391.15
15	4.52	388.29
16	4.13	385.43
17	3.74	382.57
18	3.35	379.71
19	2.96	376.86
20	2.57	374.00
21	2.18	371.14
22	1.79	368.28
23	1.40	365.42
24	1.02	362.57
25	0.63	359.71
26	0.24	356.85

**Tabla 18**

*Variación en el tiempo de la presión de la corriente de etanol antes de su ingreso al dominio de flujo para la quinta corrida.*

<b>TIEMPO (t)</b> <b>h</b>	<b>ALTURA ÚTIL DE ETANOL EN EL TANQUE (h)</b> <b>m</b>	<b>PRESIÓN MANOMÉTRICA ESTÁTICA DE ETANOL A SU INGRESO AL DOMINIO DE FLUJO (P<sub>2E</sub>)</b> <b>kPa</b>
0	10	392.60
1	9.97	389.59
2	9.58	386.58
3	9.19	383.57
4	8.81	380.56
5	8.42	377.55
6	8.03	374.54
7	7.64	371.53
8	7.25	368.51
9	6.86	365.50
10	6.47	362.49
11	6.08	359.48
12	5.69	356.47
13	5.30	353.46
14	4.91	350.45
15	4.52	347.44
16	4.13	344.43
17	3.74	341.42
18	3.35	338.41
19	2.96	335.39
20	2.57	332.38
21	2.18	329.37
22	1.79	326.36
23	1.40	323.35
24	1.02	320.34
25	0.63	317.33
26	0.24	314.32

El análisis de la Figura 17 indica, como era de esperarse, que la presión de ingreso de la línea de etanol debe ser comparable a la presión de la línea de gasolina para que pueda ingresar sin problemas. Por tanto, una presión de ingreso de etanol de 392,602.07 Pa (Tabla 18) será insuficiente para su ingreso a la tubería principal. Esto obliga a considerar el escenario en el que la presión de la línea de gasolina se reduzca de manera que se equipare a la de etanol (la menor). Como el flujo no ha variado, la caída de presión será la obtenida en la prueba (Figura 17). Así, se definen las nuevas condiciones de frontera que se muestran en la Tabla 20. Sin embargo, antes de efectuar la solución conviene verificar el gráfico de la concentración de etanol a lo largo de la tubería, Figura 18, obtenida en esta corrida de prueba. La longitud de mezcla obtenida fue de 377.7 in (aproximadamente 9.6 m).

**Tabla 19**

*Condiciones de frontera empleadas en el dominio de flujo para la primera prueba de la quinta corrida*

DESCRIPCIÓN	OBSERVACIÓN	UNIDAD	VALOR
Flujo de entrada de gasolina	---	kg/s	28.9
Flujo de entrada de etanol	---	kg/s	2.58
Presión de gasohol a la salida	Después de las 600 in de longitud. Valor arbitrario, se presume cercano a la presión de ingreso de la gasolina.	Pa(g)	430,000
Tubería	Estacionaria	---	No deslizamiento

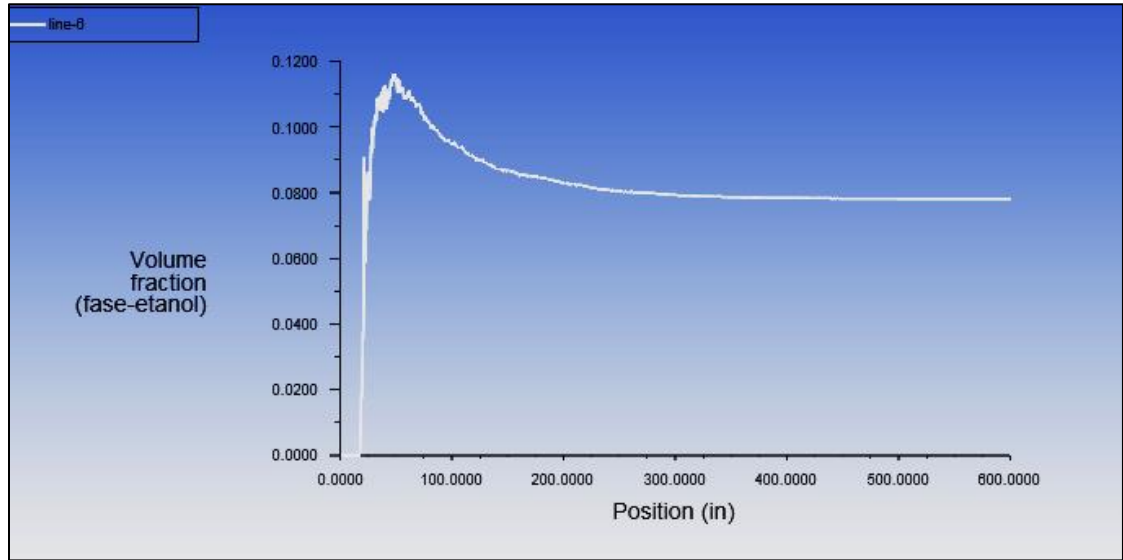
**Figura 17**

*Fluctuaciones de presión de la primera prueba de la quinta corrida.*

entrada_etanol	430945.52
entrada_gasolina	430890.93
salida_gasohol	430000
-----	-----

**Figura 18**

*Concentración de etanol a lo largo de la tubería en la prueba de la quinta corrida.*



**Tabla 20**

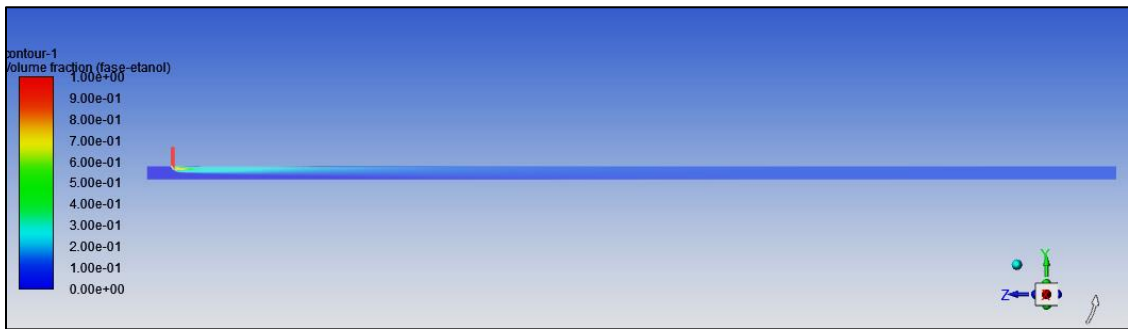
*Condiciones de frontera empleadas en el dominio de flujo para la quinta corrida*

DESCRIPCIÓN	OBSERVACIÓN	UNIDAD	VALOR
Flujo de entrada de gasolina	---	kg/s	28.9
Flujo de entrada de etanol	---	kg/s	2.58
Presión de gasohol a la salida	Después de las 600 in de longitud.	Pa(g)	391,711.14
Tubería	Estacionaria	---	No deslizamiento

La Figura 19 muestra el perfil de concentraciones de la quinta corrida. No se verifican problemas para el ingreso de etanol a la línea principal, ni tampoco zonas de retroflujo. Las presiones obtenidas para las corrientes en esta quinta corrida se muestran en la Figura 20. Como puede verificarse, las presiones de ingreso son comparables entre sí y congruentes con los valores establecidos.

**Figura 19**

*Perfil de concentraciones de etanol en la quinta corrida.*



**Figura 20**

*Presiones de las corrientes obtenidas en la quinta corrida.*

entrada_etanol	392656.65
entrada_gasolina	392602.07
salida_gasohol	391711.14
-----	-----

La Figura 21 muestra la concentración de etanol a lo largo de la tubería en la cuarta corrida. La longitud de mezcla, considerando una precisión del orden de  $10^{-3}$  para la fracción en volumen, es de 377.7 in (aproximadamente 9.6 m, igual que en la prueba), donde se verificó una concentración de 0.0784 en fracción volumen, con tendencia al descenso, hasta llegar a una concentración de 0.0781 a la salida de la tubería de 600 in de longitud.

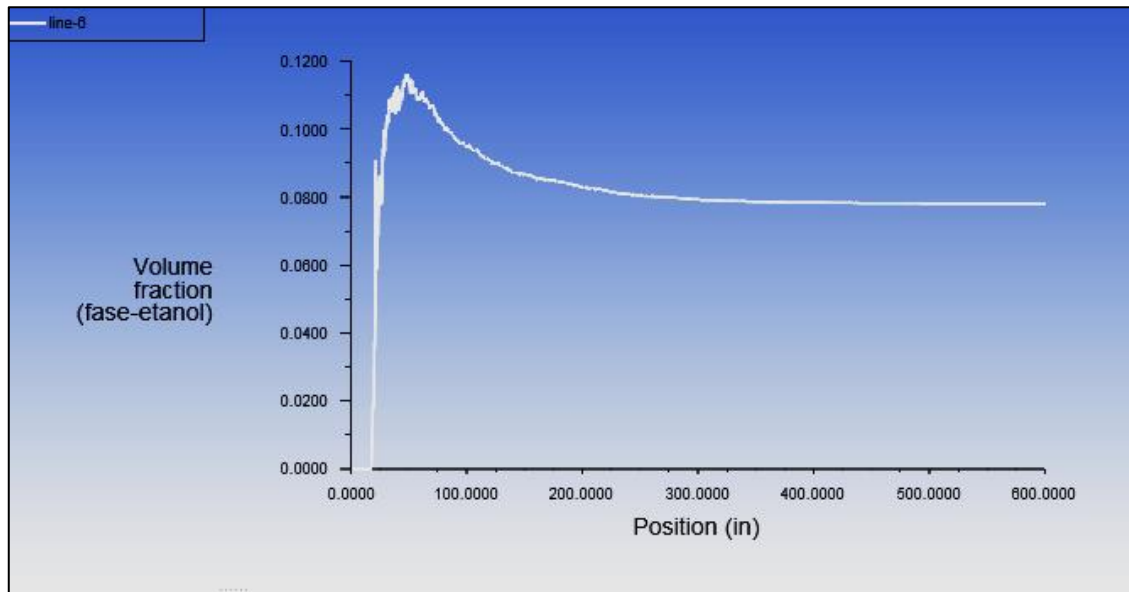
**Sexta corrida.**

En la sexta corrida se consideró el escenario con la menor presión disponible, debido al descenso de la altura en el tanque de etanol (reducción que deberá ser controlada también en la línea de flujo de gasolina). Según se aprecia en la Tabla 18, esta presión es de 314,317.78 Pa. Debido a que el flujo y el sistema no han cambiado respecto a la quinta corrida, puede esperarse la misma caída de presión, esto es, 890.93 Pa. Por lo tanto, se tendrán las condiciones de frontera que se dan en la Tabla 21.



**Figura 21**

*Concentración de etanol a lo largo de la tubería en la quinta corrida.*



**Tabla 21**

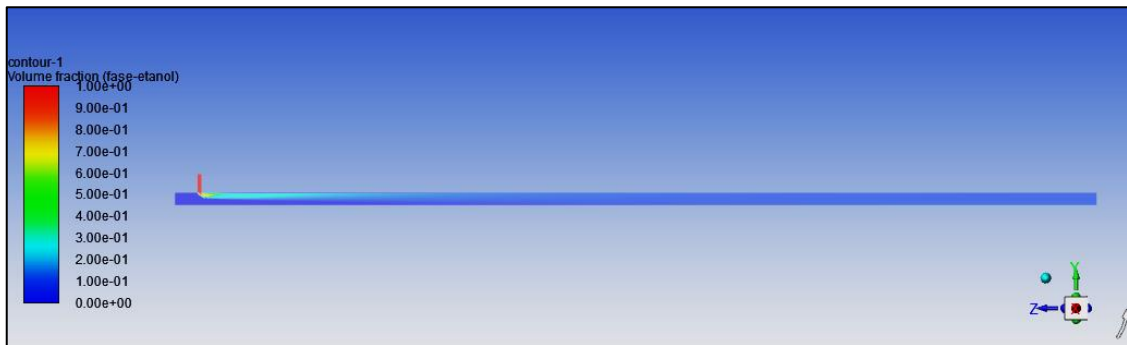
*Condiciones de frontera empleadas en el dominio de flujo para la sexta corrida.*

DESCRIPCIÓN	OBSERVACIÓN	UNIDAD	VALOR
Flujo de entrada de gasolina	---	kg/s	28.9
Flujo de entrada de etanol	---	kg/s	2.58
Presión de gasohol a la salida	Después de las 600 in de longitud.	Pa(g)	313,426.85
Tubería	Estacionaria	---	No deslizamiento

La Figura 22 muestra el perfil de concentraciones de la sexta corrida. Las presiones obtenidas para las corrientes en esta tercera corrida se muestran en la Figura 23. Nuevamente, puede verificarse que las presiones de ingreso al dominio de flujo de las corrientes de gasolina y etanol son comparables, y también congruentes con el valor de la corriente de etanol más baja a la salida del volumen de control N° 2 (Tabla 18).

**Figura 22**

*Perfil de concentraciones de etanol en la sexta corrida.*



**Figura 23**

*Presiones de las corrientes obtenidas en la sexta corrida.*

entrada_etanol	314372.36
entrada_gasolina	314317.78
salida_gasohol	313426.85
-----	-----

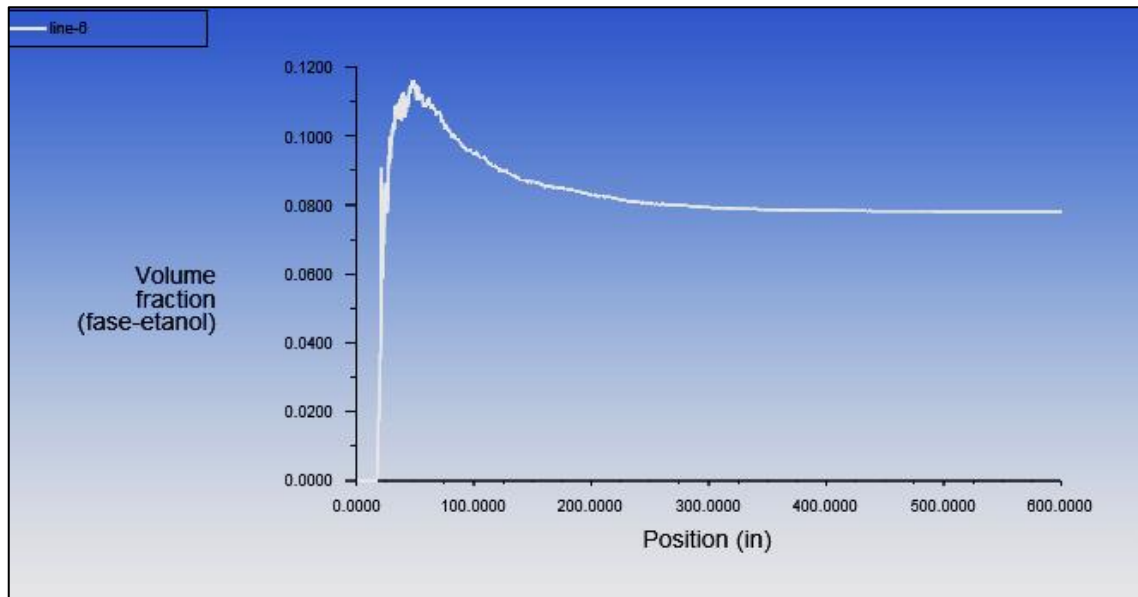
La Figura 24 muestra la concentración de etanol a lo largo de la tubería en la sexta corrida. La longitud de mezcla, considerando una precisión del orden de  $10^{-3}$  para la fracción en volumen, es también de 377.7 in (aproximadamente 9.6 m), donde se verificó una concentración de 0.0784 en fracción volumen, con tendencia al descenso, hasta llegar a una concentración de 0.0781 a la salida de la tubería de 600 in de longitud.

### ***Séptima corrida.***

En esta corrida se disminuyó el diámetro de la tubería de etanol a 2", mientras que el diámetro de la tubería de gasolina fue de 6". La longitud de la tubería de gasolina fue de 600", considerando el escenario en el que la longitud de mezcla se viera incrementada con respecto a la tercera corrida. Los nuevos valores de presión obtenidos, considerando el cambio de diámetro de la tubería de etanol, se muestran en la Tabla 22 y la Tabla 23.

**Figura 24**

*Concentración de etanol a lo largo de la tubería en la sexta corrida.*



De la misma manera que en las corridas anteriores, se efectuó una primera prueba con las condiciones de frontera detalladas en la Tabla 24, donde se supuso una presión al término de la tubería de 6". Los valores de presión obtenidos se muestran en la Figura 25. Puede apreciarse que la caída de presión es de  $3,492.36 Pa$ .

Nuevamente, a partir de la Figura 25, puede verse que la presión de etanol debe ser comparable a la de la gasolina para su ingreso en la línea de mezcla. Por tanto, la presión de la gasolina a su entrada al dominio de flujo se deberá ajustar a un valor equivalente a la de la línea de etanol, esto es, se trabajará con una presión de gasolina (en  $t = 0$ ) de  $213,532.40 Pa$ .

Considerando la caída de presión obtenida, las nuevas condiciones de frontera quedaron definidas como se muestra en la Tabla 25. Nuevamente, antes de efectuar la solución conviene verificar el gráfico de la concentración de etanol a lo largo de la tubería, Figura 26, obtenida en la corrida de prueba. La longitud de mezcla obtenida fue de 254.3 in (aproximadamente 6.5 m).

**Tabla 22**

*Variación en el tiempo de la presión de la corriente de gasolina antes de su ingreso al dominio de flujo para la séptima corrida.*

<b>TIEMPO (t)</b>	<b>ALTURA ÚTIL DE GASOLINA EN EL TANQUE (h)</b>	<b>PRESIÓN MANOMÉTRICA ESTÁTICA DE LA GASOLINA A SU INGRESO AL DOMINIO DE FLUJO (P<sub>2G</sub>)</b>
<b>h</b>	<b>m</b>	<b>kPa</b>
0	10	349.90
1	9.97	347.05
2	9.58	344.19
3	9.19	341.33
4	8.81	338.47
5	8.42	335.61
6	8.03	332.76
7	7.64	329.90
8	7.25	327.04
9	6.86	324.18
10	6.47	321.32
11	6.08	318.46
12	5.69	315.61
13	5.30	312.75
14	4.91	309.89
15	4.52	307.03
16	4.13	304.17
17	3.74	301.32
18	3.35	298.46
19	2.96	295.60
20	2.57	292.74
21	2.18	289.88
22	1.79	287.03
23	1.40	284.17
24	1.02	281.31
25	0.63	278.45
26	0.24	275.59

**Tabla 23**

*Variación en el tiempo de la presión de la corriente de etanol antes de su ingreso al dominio de flujo para la séptima corrida.*

<b>TIEMPO (t)</b> <b>h</b>	<b>ALTURA ÚTIL DE ETANOL EN EL TANQUE (h)</b> <b>m</b>	<b>PRESIÓN MANOMÉTRICA ESTÁTICA DE ETANOL A SU INGRESO AL DOMINIO DE FLUJO (P<sub>2E</sub>)</b> <b>kPa</b>
0	10	213.53
1	9.97	210.52
2	9.58	207.51
3	9.19	204.50
4	8.81	201.49
5	8.42	198.48
6	8.03	195.47
7	7.64	192.46
8	7.25	189.34
9	6.86	186.43
10	6.47	183.42
11	6.08	180.41
12	5.69	177.40
13	5.30	174.39
14	4.91	171.38
15	4.52	168.37
16	4.13	165.36
17	3.74	162.35
18	3.35	159.34
19	2.96	156.32
20	2.57	153.31
21	2.18	150.30
22	1.79	147.29
23	1.40	144.28
24	1.02	141.27
25	0.63	138.26
26	0.24	135.25

**Tabla 24**

*Condiciones de frontera empleadas en el dominio de flujo para la primera prueba de la séptima corrida*

DESCRIPCIÓN	OBSERVACIÓN	UNIDAD	VALOR
Flujo de entrada de gasolina	---	kg/s	28.9
Flujo de entrada de etanol	---	kg/s	2.58
Presión de gasohol a la salida	Después de las 600 in de longitud. Valor arbitrario, se presume cercano a la presión de ingreso de la gasolina.	Pa(g)	347,352.4
Tubería	Estacionaria	---	No deslizamiento

**Figura 25**

*Fluctuaciones de presión de la primera prueba de la séptima corrida.*

entrada_etanol	351349.48
entrada_gasolina	350844.75
salida_gasohol	347352.39
-----	-----

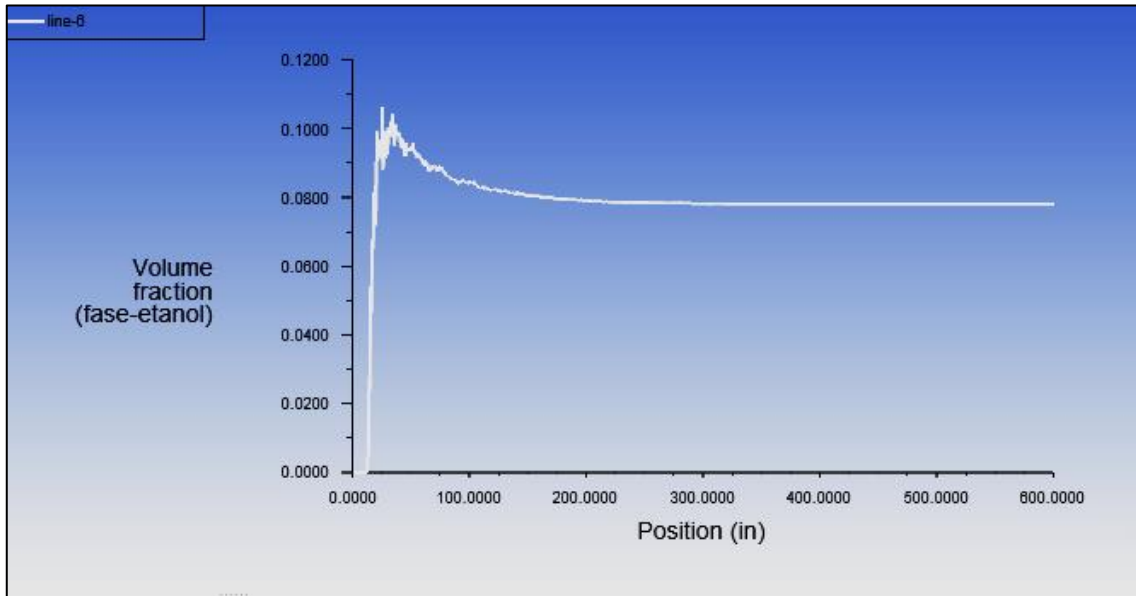
**Tabla 25**

*Condiciones de frontera empleadas en el dominio de flujo para la séptima corrida*

DESCRIPCIÓN	OBSERVACIÓN	UNIDAD	VALOR
Flujo de entrada de gasolina	---	kg/s	28.9
Flujo de entrada de etanol	---	kg/s	2.58
Presión de gasohol a la salida	Después de las 600 in de longitud.	Pa(g)	210,040.04
Tubería	Estacionaria	---	No deslizamiento

**Figura 26**

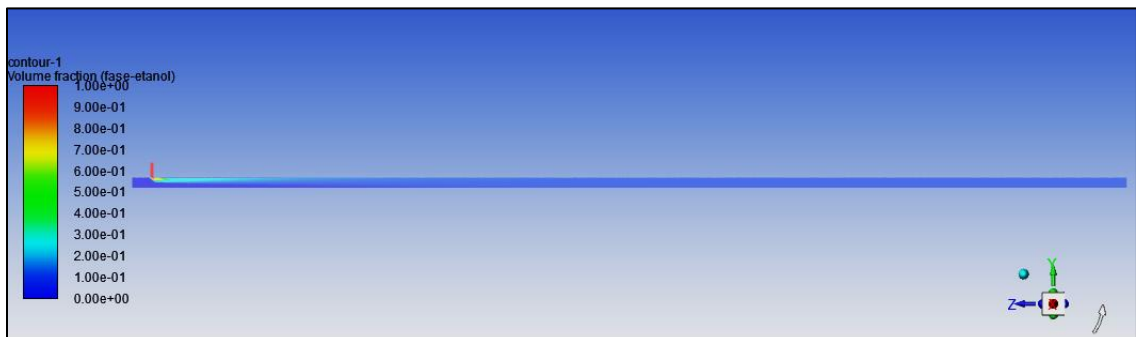
*Concentración de etanol a lo largo de la tubería en la prueba de la séptima corrida.*



La Figura 27 muestra el perfil de concentraciones de la séptima corrida. No se verifican problemas para el ingreso de etanol a la línea principal, ni tampoco zonas de retroflujo. Las presiones obtenidas para las corrientes en esta séptima corrida se muestran en la Figura 28. Como puede verificarse, las presiones de ingreso son comparables entre sí y congruentes con los valores establecidos.

**Figura 27**

*Perfil de concentraciones de etanol en la séptima corrida.*



**Figura 28**

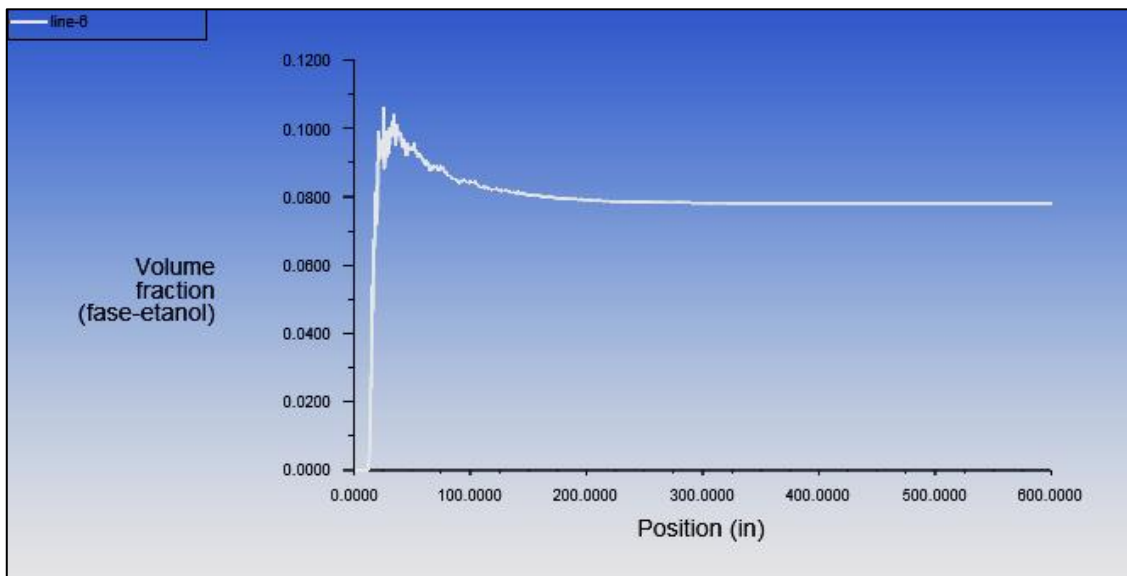
*Presiones de las corrientes obtenidas en la séptima corrida.*

entrada_etanol	214037.5
entrada_gasolina	213532.78
salida_gasohol	210040.04
-----	-----

La Figura 29 muestra la concentración de etanol a lo largo de la tubería en la séptima corrida. La longitud de mezcla, considerando una precisión del orden de  $10^{-3}$  para la fracción en volumen, fue de 254.3 in (aproximadamente 6.5 m), donde se verificó una concentración de 0.0784 en fracción volumen, con tendencia al descenso, hasta llegar a una concentración de 0.0781 a la salida de la tubería de 600 in de longitud.

**Figura 29**

*Concentración de etanol a lo largo de la tubería en la séptima corrida.*



**Octava corrida.**

En la octava corrida se consideró el escenario con la menor presión disponible para el ingreso de etanol por una tubería de 2" en la tubería de gasolina de 6", debido al descenso de la altura en el tanque de etanol (reducción que deberá ser controlada también en la línea de flujo de gasolina). Según se aprecia en la Tabla



23, esta presión es de 135,248.12 Pa. Debido a que el flujo y el sistema no han cambiado respecto a la séptima corrida, se tendrá la misma caída de presión, esto es, 3,492.36 Pa. Por lo tanto, se tendrán las condiciones de frontera que se dan en la Tabla 26.

**Tabla 26**

*Condiciones de frontera empleadas en el dominio de flujo para la octava corrida*

DESCRIPCIÓN	OBSERVACIÓN	UNIDAD	VALOR
Flujo de entrada de gasolina	---	kg/s	28.9
Flujo de entrada de etanol	---	kg/s	2.58
Presión de gasohol a la salida	Después de las 600 in de longitud.	Pa(g)	131,755.76
Tubería	Estacionaria	---	No deslizamiento

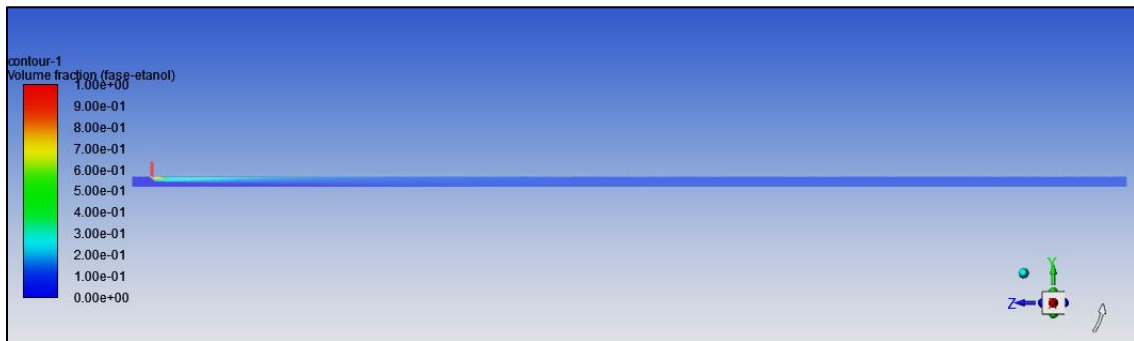
La Figura 30 muestra el perfil de concentraciones de la octava corrida. No se verifican problemas para el ingreso de etanol a la línea principal, ni tampoco zonas de retroflujo. Se verificó que la pérdida de presión es la misma que en la séptima corrida, y la Figura 31 muestra la concentración de etanol a lo largo de la tubería. La longitud de mezcla, considerando una precisión del orden de  $10^{-3}$  para la fracción en volumen, fue nuevamente de 254.3 in (aproximadamente 6.5 m), donde se verificó una concentración de 0.0784 en fracción volumen, con tendencia al descenso, hasta llegar a una concentración de 0.0781 a la salida de la tubería de 600 in de longitud.

***Novena corrida.***

En esta corrida se aumentó el diámetro de la tubería de gasolina a 8", manteniendo el diámetro de la tubería de etanol a 2". La longitud de la tubería de gasolina se fue de 600". Los nuevos valores de presión obtenidos, considerando el cambio de diámetro de la tubería de gasolina, se muestran en la Tabla 27 y la Tabla 28.

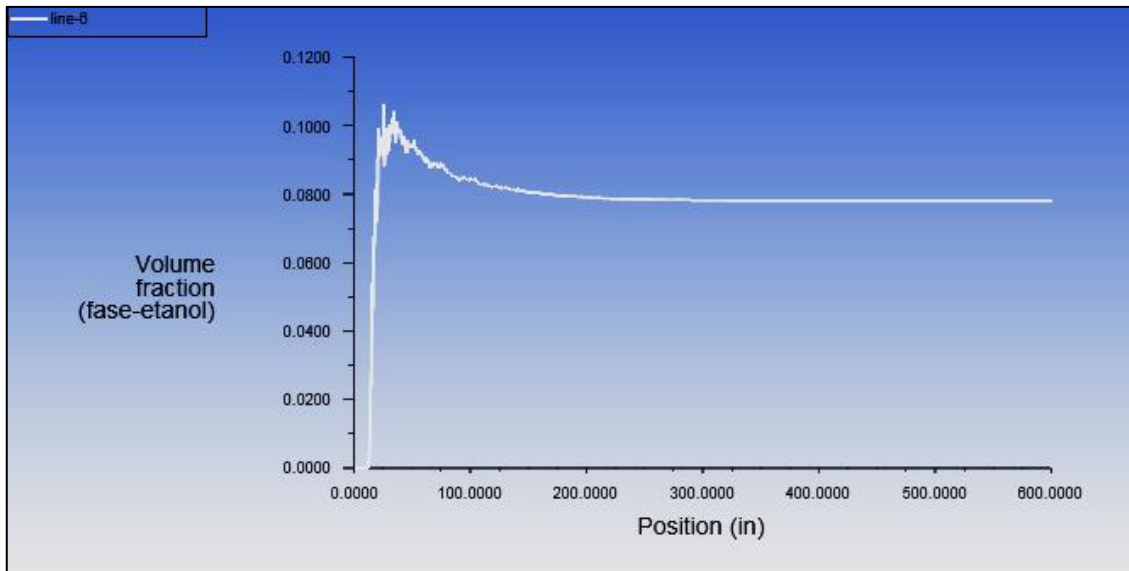
**Figura 30**

*Perfil de concentraciones de etanol en la octava corrida.*



**Figura 31**

*Concentración de etanol a lo largo de la tubería en la octava corrida.*



De la misma manera que en las corridas anteriores, se efectuó una primera prueba con las condiciones de frontera detalladas en la Tabla 29, donde se supuso una presión al término de la tubería de 8". En base a las experiencias anteriores, se consideró el escenario en que la presión de la tubería de gasolina debería igualarse a la de etanol, a fin de que este pueda ser inyectado en la tubería principal. Los valores de presión obtenidos en el programa se muestran en la Figura 32. Puede apreciarse que la caída de presión es de 896.13 Pa.

**Tabla 27**

*Variación en el tiempo de la presión de la corriente de gasolina antes de su ingreso al dominio de flujo para la novena corrida.*

<b>TIEMPO (t)</b> <b>h</b>	<b>ALTURA ÚTIL DE GASOLINA EN EL TANQUE (h)</b> <b>m</b>	<b>PRESIÓN MANOMÉTRICA ESTÁTICA DE LA GASOLINA A SU INGRESO AL DOMINIO DE FLUJO (P<sub>2G</sub>)</b> <b>kPa</b>
0	10	431.16
1	9.97	428.30
2	9.58	425.44
3	9.19	422.59
4	8.81	419.73
5	8.42	416.87
6	8.03	414.01
7	7.64	411.15
8	7.25	408.29
9	6.86	405.44
10	6.47	402.58
11	6.08	399.72
12	5.69	396.86
13	5.30	394.00
14	4.91	391.15
15	4.52	388.29
16	4.13	385.43
17	3.74	382.57
18	3.35	379.71
19	2.96	376.86
20	2.57	374.00
21	2.18	371.14
22	1.79	368.28
23	1.40	365.42
24	1.02	362.57
25	0.63	359.71
26	0.24	356.85

**Tabla 28**

*Variación en el tiempo de la presión de la corriente de etanol antes de su ingreso al dominio de flujo para la novena corrida.*

<b>TIEMPO (t)</b>	<b>ALTURA ÚTIL DE ETANOL EN EL TANQUE (h)</b>	<b>PRESIÓN MANOMÉTRICA ESTÁTICA DE ETANOL A SU INGRESO AL DOMINIO DE FLUJO (P<sub>2E</sub>)</b>
<b>h</b>	<b>m</b>	<b>kPa</b>
0	10	213.53
1	9.97	210.52
2	9.58	207.51
3	9.19	204.50
4	8.81	201.49
5	8.42	198.48
6	8.03	195.47
7	7.64	192.46
8	7.25	189.34
9	6.86	186.43
10	6.47	183.42
11	6.08	180.41
12	5.69	177.40
13	5.30	174.39
14	4.91	171.38
15	4.52	168.37
16	4.13	165.36
17	3.74	162.35
18	3.35	159.34
19	2.96	156.32
20	2.57	153.31
21	2.18	150.30
22	1.79	147.29
23	1.40	144.28
24	1.02	141.27
25	0.63	138.26
26	0.24	135.25

**Tabla 29**

*Condiciones de frontera empleadas en el dominio de flujo para la primera prueba de la novena corrida*

DESCRIPCIÓN	OBSERVACIÓN	UNIDAD	VALOR
Flujo de entrada de gasolina	---	kg/s	28.9
Flujo de entrada de etanol	---	kg/s	2.58
Presión de gasohol a la salida	Después de las 600 in de longitud. Valor arbitrario, se presume cercano a la presión de ingreso de la gasolina, equiparable a la de etanol.	Pa(g)	212,641.47
Tubería	Estacionaria	---	No deslizamiento

**Figura 32**

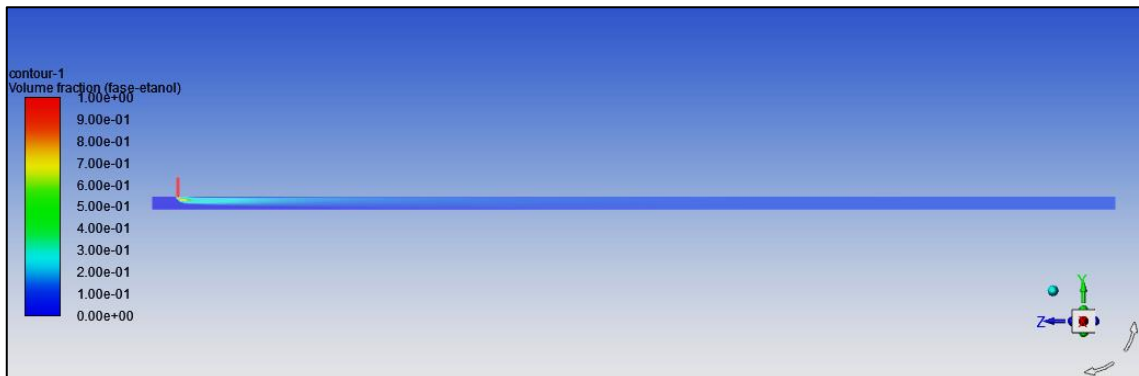
*Fluctuaciones de presión de la primera prueba de la novena corrida.*

entrada_etanol	213627.13
entrada_gasolina	213537.6
salida_gasohol	212641.47
-----	-----

Puede observarse que la presión de entrada de la gasolina es un valor bastante cercano al de ingreso de la corriente de etanol (Tabla 28). Por tanto, dado el alto consumo de recursos computacionales originado por esta corrida debido al gran número de celdas en la malla que tuvieron que resolverse, se tomó esta corrida como la novena. La Figura 33 muestra el perfil de concentraciones, mientras que la longitud de mezcla, considerando una precisión del orden de  $10^{-3}$  para la fracción en volumen, fue de 404.9 in (aproximadamente 10.3 m), donde se verificó una concentración de 0.0784 en fracción volumen, con tendencia al descenso, hasta llegar a una concentración de 0.0781 a la salida de la tubería de 600 in de longitud. La Figura 34 muestra la concentración de etanol a lo largo de la tubería en la novena corrida.

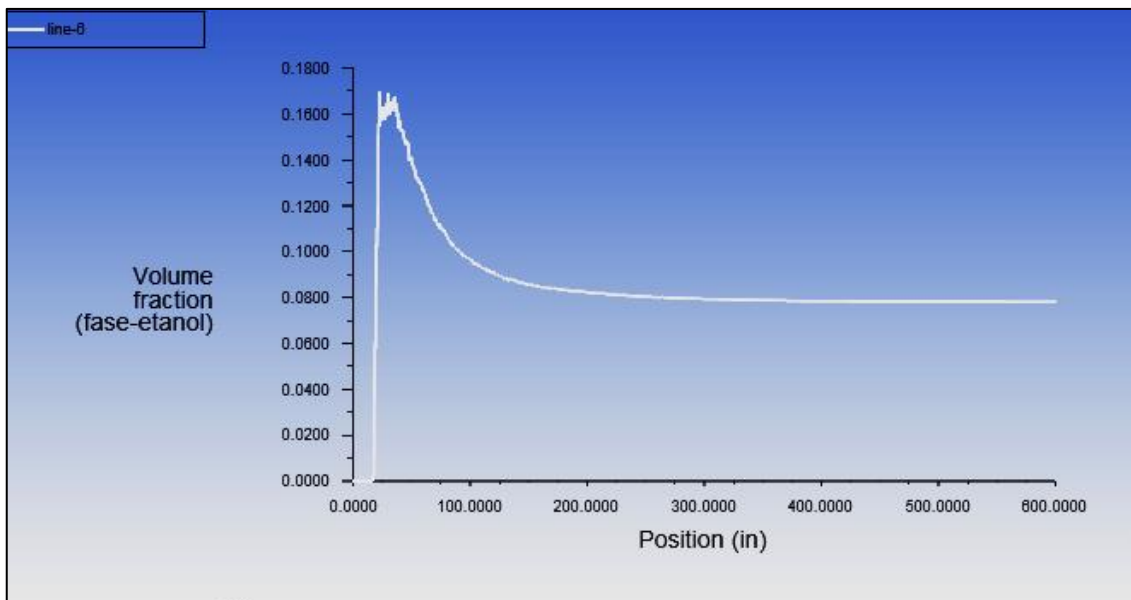
**Figura 33**

*Perfil de concentraciones de etanol en la novena corrida.*



**Figura 34**

*Concentración de etanol a lo largo de la tubería en la novena corrida.*



***Décima corrida.***

En la décima corrida se consideró el escenario con la menor presión disponible para el ingreso de etanol por una tubería de 2" en la tubería de gasolina de 8", debido al descenso de la altura en el tanque de etanol (reducción que deberá ser controlada también en la línea de flujo de gasolina). De la Tabla 28, esta presión es de  $135,248.12 Pa$ . Debido a que el flujo y el sistema no han cambiado respecto a la séptima corrida, se tendrá la misma caída de presión, esto es,  $896.13 Pa$ . Por lo tanto, se tendrán las condiciones de frontera que se dan en la Tabla 30.

**Tabla 30***Condiciones de frontera empleadas en el dominio de flujo para la décima corrida*

DESCRIPCIÓN	OBSERVACIÓN	UNIDAD	VALOR
Flujo de entrada de gasolina	---	kg/s	28.9
Flujo de entrada de etanol	---	kg/s	2.58
Presión de gasohol a la salida	Después de las 600 in de longitud.	Pa(g)	134,351.99
Tubería	Estacionaria	---	No deslizamiento

Según ha podido verificarse en corridas anteriores, se obtiene el mismo escenario que para la corrida con presiones más altas. La concentración de etanol, a lo largo de la tubería es la misma que la mostrada en las Figuras 33 y 34, también con la misma longitud de mezcla.

#### **4.3 Población y muestra.**

No aplicaron en el desarrollo del trabajo.

#### **4.4 Lugar de estudio.**

La investigación se desarrolló en los gabinetes de la Universidad Nacional del Callao – Perú.

#### **4.5 Técnicas e instrumentos para la recolección de la información.**

Las propiedades de los fluidos fueron obtenidas mediante el uso de paquetes termodinámicos disponibles en software especializado de ingeniería como el Aspen HYSYS V10, así como de revisión bibliográfica. Para el modelamiento del proceso de mezcla se emplearon las ecuaciones de movimiento correspondientes: continuidad y Navier-Stokes, así como las ecuaciones de mezcla eulerianas bifásicas. Por otro lado, se empleó el modelo *k-ε realizable* para

el modelamiento de flujo turbulento. Las ecuaciones fueron obtenidas de bibliografía especializada de mecánica de fluidos, referenciada apropiadamente durante el desarrollo del trabajo.

#### **4.6 Análisis y procesamiento de datos.**

Los datos e información obtenidos se procesaron haciendo uso de programas de computadora de solución numérica para la solución de las ecuaciones diferenciales, así como de las variaciones de presión y longitud de mezcla. En el presente trabajo se empleó el Ansys FLUENT v. 19.2 para el análisis del dominio de flujo de mezcla de fluidos, mientras que la variación de la cabeza de presión en el tiempo por el flujo debido a la gravedad se analizó mediante la aplicación de la ecuación de energía con el apoyo de Microsoft Excel 2019, considerando como volúmenes de control los tanques elevados de gasolina y etanol con las líneas de flujo hasta antes del punto de mezcla.

#### **4.7 Aspectos éticos en Investigación.**

El trabajo no constituyó plagio de otro que se encontrara anteriormente desarrollado, haciendo referencia a la totalidad de fuentes, modelos y demostraciones matemáticas que se emplearon en la investigación.



## V. RESULTADOS

### 5.1 Resultados descriptivos.

#### 5.1.1. Modelo matemático.

El modelo matemático desarrollado para la mezcla en línea por gravedad para la obtención de gasoholes consta de un total de cuarenta y tres (43) ecuaciones. Ocho (8) de ellas para los volúmenes de control y treinta y cinco (35) para el dominio de flujo. Se muestran en la Tabla 31 y en la Tabla 32.

**Tabla 31**

*Modelo matemático para los volúmenes de control.*

ECUACIÓN	N°
$D_E = \sqrt{\frac{\dot{Q}_E}{\dot{Q}_G}} \cdot D_G^2$	(23)
$V_E = \frac{0.078}{0.922} \cdot V_G$	(24)
$h_{L_{G/E}} = f_{G/E} \cdot \frac{L_{G/E}}{d_{G/E}} \cdot \frac{V_{2_{G/E}}^2}{2g}$	(26)
$f_{G/E} = 8 \left[ \left( \frac{8}{Re} \right)^{12} + (A + B)^{-1.5} \right]^{\frac{1}{12}}$	
$A = \left\{ -2.457 \ln \left[ \left( \frac{7}{Re} \right)^{0.9} + 0.27 \frac{\epsilon}{D} \right] \right\}^{16}$	(27)
$B = \left( \frac{37,530}{Re} \right)^{16}$	
$h(t) = \frac{V_{G/E}(t)}{\pi \cdot \frac{D_{G/E}^2}{4}}$	(28)
$V_{G/E}(t) = V_{G/E}(0) - (\dot{Q}_{G/E} \times t)$	(29)
$H + h_m + h(t) = \frac{P_{2_{G/E}}(t)}{\rho_{G/E} g} + \alpha_2 \frac{V_{2_{G/E}}^2}{2g} + h_{L_{G/E}}$	(30)
$V_{2_{G/E}} = \frac{\dot{Q}_{G/E}}{\pi \cdot \frac{D_{G/E}^2}{4}}$	(31)

**Tabla 32**

*Modelo matemático para el dominio de flujo.*

ECUACIÓN	N°	
$\nabla \cdot \vec{V} = 0$	(32)	
$\rho \nabla \cdot \vec{V}\vec{V} = -\nabla p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V}$	(33)	
$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k V_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon$	(34)	
$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon V_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}}$	(35)	
$C_1 = \text{máx.} \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$	(36)	
$\eta = S \frac{k}{\varepsilon}$	(37)	
$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$	(38)	
$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$	(39)	
$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{k U^*}{\varepsilon}}$	$U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \Omega_{ij} \Omega_{ij}}$	(40)
$A_s = \sqrt{6} \cos \phi$	(41)	
$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6} W)$	(42)	
$W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{\tilde{S}^3}$	(43)	
$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}$	(44)	
$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_j}{\partial x_i} + \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \right)$	(45)	
$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_i}{\partial x_j} - \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right)$	(46)	
$G_k = \mu_t S^2$	(47)	
$\nabla \cdot (\rho_m \vec{V}_m) = 0$	(48)	

$$\vec{V}_m = \frac{\alpha_E \rho_E \vec{V}_E + \alpha_G \rho_G \vec{V}_G}{\rho_m} \quad (49)$$

$$\alpha_E + \alpha_G = 1 \quad (50)$$

$$\rho_m = \alpha_E \rho_E + \alpha_G \rho_G \quad (51)$$

$$\nabla \cdot (\rho_m \vec{V}_m \vec{V}_m) = -\nabla p + \rho_m \vec{g} + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{V}_m + \nabla \vec{V}_m^T)] + \nabla \cdot (\alpha_E \rho_E \vec{V}_{a,E} \vec{V}_{a,E}) \quad (52)$$

$$\mu_m = \alpha_E \mu_E + \alpha_G \mu_G \quad (53)$$

$$\vec{V}_{EG} = \vec{V}_E - \vec{V}_G \quad (54)$$

$$c_E = \frac{\alpha_E \rho_E}{\rho_m} \quad (55)$$

$$\vec{V}_{a,E} = (1 - c_E) \vec{V}_{EG} \quad (56)$$

$$f_{drag} = 1 + 0.15 Re^{0.687} \quad \text{para } Re \leq 1,000 \quad (57)$$

$$f_{drag} = 0.0183 Re \quad \text{para } Re > 1,000$$

$$Re = \frac{\rho_G |\vec{V}_E - \vec{V}_G| d_E}{\mu_G} \quad (58)$$

$$\vec{a} = \vec{g} - (\vec{V}_m \cdot \nabla) \vec{V}_m \quad (59)$$

$$\vec{V}_{EG} = \frac{d_E^2 (\rho_E - \rho_m)}{18 \mu_G f_{drag}} \vec{a} - \frac{\eta_t}{\sigma_t} \left( \frac{\nabla \alpha_E}{\alpha_E} - \frac{\nabla \alpha_G}{\alpha_G} \right) \quad (60)$$

$$\eta_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \left( \frac{\gamma_\gamma}{1 + \gamma_\gamma} \right) (1 + C_\beta \xi^2)^{-1/2} \quad (61)$$

$$\xi = \frac{|\vec{V}_{EG}|}{\sqrt{\frac{2}{3}} k} \quad (62)$$

$$\gamma_\gamma = \frac{\left( \frac{3}{2} C_\mu \frac{k}{\varepsilon} \right)}{\left( \frac{\rho_E d_E^2}{18 \mu_G} \right)} \quad (63)$$

$$C_\beta = 1.8 - 1.35 (\cos \theta)^2 \quad (64)$$

$$\cos \theta = \frac{\vec{V}_{EG} \cdot \vec{V}_E}{|\vec{V}_{EG}| |\vec{V}_E|} \quad (65)$$

$$\nabla \cdot (\alpha_E \rho_E \vec{V}_E) = 0 \quad (66)$$

### **5.1.2. Solución y simulación del modelo.**

El resumen de los resultados obtenidos en las diez corridas se muestra en la Tabla 33.

### **5.2 Resultados inferenciales.**

El presente trabajo, al no haber aplicado sobre una muestra específica, sino más bien estar basado en principios físicos y químicos, no cuenta con resultados inferenciales que se pudieran extrapolar hacia poblaciones o conjuntos.

### **5.3 Otro tipo de resultados estadísticos.**

Dado que en la presente investigación los resultados se basaron en su sentido físico, no se obtuvieron resultados estadísticos.

**TABLA 33**

*Resumen de resultados obtenidos en las diez corridas.*

CORRIDA	DIÁMETRO TUBERÍA GASOLINA (dG) in	DIÁMETRO TUBERÍA ETANOL (dE) in	dE/dG	VELOCIDAD INGRESO GASOLINA (v2G) ft/s	VELOCIDAD INGRESO ETANOL (v2E) ft/s	v2E/v2G	PRESIÓN INGRESO GASOLINA (P2G) Pa	PRESIÓN INGRESO ETANOL (P2E) Pa	PRESIÓN SALIDA GASOHOL (Ps) Pa	P2E/P2G	CAÍDA DE PRESIÓN ( $\Delta P = P_s - P_{2G}$ ) Pa	LONGITUD DE MEZCLA in
1	6	2.5	0.4167	6.9574	3.3902	0.4873	349,903.87	392,602.07	No determinada (corrida fallida)	1.1220	No determinada (corrida fallida)	No determinada (corrida fallida)
2	6	2.5	0.4167	6.9574	3.3902	0.4873	349,903.87	349,903.87	No determinada (corrida fallida)	1.0000	No determinada (corrida fallida)	No determinada (corrida fallida)
3	6	2.5	0.4167	6.9574	3.3902	0.4873	341,230.38	341,680.70	338,678.90	1.0013	-2,551.48	199.6
							349,903.86	350,354.16	347,352.42	1.0013	-2,551.44	199.6
4	6	2.5	0.4167	6.9574	3.3902	0.4873	275,593.34	276,043.65	273,041.92	1.0016	-2,551.42	199.6
5	8	2.5	0.3125	3.9135	3.3902	0.8663	430,890.93	430,945.52	430,000.00	1.0001	-890.93	377.7
							392,602.07	392,656.65	391,711.14	1.0001	-890.93	377.7
6	8	2.5	0.3125	3.9135	3.3902	0.8663	314,317.78	314,372.36	313,426.85	1.0002	-890.93	377.7
7	6	2	0.3333	6.9574	5.2972	0.7614	350,844.75	351,349.48	347,352.39	1.0014	-3,492.36	254.3
							213,532.78	214,037.50	210,040.04	1.0024	-3,492.74	254.3
8	6	2	0.3333	6.9574	5.2972	0.7614	135,248.12	135,586.24	131,755.76	1.0025	-3,492.36	254.3
9	8	2	0.2500	3.9135	5.2972	1.3536	213,537.60	213,627.13	212,641.47	1.0004	-896.13	404.9
10	8	2	0.2500	3.9135	5.2972	1.3536	135,248.12	135,315.74	134,351.99	1.0005	-896.13	404.9

## VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados.

#### Hipótesis general

Mediante el correcto planteamiento y desarrollo de los fundamentos y principios que gobiernan el flujo y la mezcla de fluidos, se podrá desarrollar el modelo matemático para la mezcla en línea por gravedad para la obtención de gasoholes.

Para el desarrollo del modelo se dividió el sistema de mezcla en tres regiones bien diferenciadas mostradas en la Figura 1: un volumen de control para el flujo de gasolina hasta el punto de mezcla, un volumen de control para el flujo de etanol hasta el punto de mezcla, y un dominio de flujo que incluye el punto de inyección para el mezclado y la longitud de mezcla necesaria para el mismo.

El análisis de los volúmenes de control se efectuó mediante la aplicación de la ecuación de la energía, pues eran de interés las características globales del flujo tales como su flujo de masa, volumen y presión a su ingreso al dominio de flujo, en vez de las propiedades de los mismos antes de su ingreso al dominio. Para cumplir con los grados de libertad se especificó un volumen de producción de gasohol de 22.8 MBPD, una diferencia de cotas de 50 m y longitudes de tuberías de 570 m, datos basados en la realidad nacional. Las propiedades de los fluidos se evaluaron a 25 °C y con criterios de diseño basados en las velocidades permisibles de líquidos dentro de tuberías se obtuvieron los tamaños de tubería que resultarían apropiados. También se dimensionaron los tanques de modo que la disminución de altura de ambos fluidos fuera la misma conforme avanzaban los flujos, y así evitar fluctuaciones por diferencias de carga estática.

El modelo de los volúmenes de control quedó así definido por las ecuaciones (23), (24), (26), (27), (28), (29), (30) y (31); y trabajado con los valores de las Tablas 7, 8 y 9. Para su solución se empleó un estado cuasi-estacionario en

Microsoft EXCEL 2019, considerando intervalos de vaciado de los tanques de una hora.

El análisis del dominio de flujo se realizó mediante el empleo de las ecuaciones de continuidad, conservación del momento y mezcla bifásica, quedando su modelo definido por las ecuaciones (32) a (66). La solución de este sistema se efectuó con ayuda del software Ansys FLUENT 19.2, considerando estado estacionario para los intervalos de los volúmenes de control, mediante el empleo de mallas para modelar la geometría de los tubos, con elementos de hasta 0.5 in como máximo.

Hipótesis específicas.

La primera hipótesis específica señala que “el tiempo influye en el modelo de homogeneización”.

Al respecto, pudo comprobarse que, mientras se mantenga el control sobre los flujos de las corrientes de gasolina y etanol que están por mezclarse, a fin de que mantengan la relación correcta para que el gasohol formulado cuente con 7.8% de alcohol en volumen, el tiempo no influirá en el modelo desarrollado ni tampoco en la longitud de mezcla obtenida.

Lo anterior considera unos sistemas de tuberías específicos, con una diferencia de cotas definidas y una producción de gasohol determinada. Como se pudo apreciar, y según se muestra en la Tabla 33, para un escenario en el que se controlen los valores de los flujos de gasolina y etanol de modo que permanezcan constantes a fin de asegurar una correcta relación de mezcla, el paso del tiempo no influyó en la longitud de mezcla obtenida.

La segunda hipótesis específica señala que “las presiones del dominio de flujo influyen en el modelo de homogeneización”.

Al igual que en la hipótesis específica anterior, las presiones al interior del dominio de flujo no influirán en el modelo de mezcla ni en la longitud de mezcla obtenida en tanto los flujos de gasolina y etanol se controlen a un valor fijo,

manteniendo la relación de mezcla apropiada en todo momento.

Además, según se ha verificado en las corridas cuyos resultados se resumen en la Tabla 33, las presiones de la gasolina y el etanol antes de su confluencia en el punto de inyección necesitarán ser comparables. En las corridas efectuadas, se verificó que la presión de la corriente de etanol en el punto de inyección era solo ligeramente superior a la de la gasolina, con un exceso máximo alrededor de los 0.5 kPa. De acuerdo a lo evaluado, valores de presión excesivos en la corriente de etanol originarían zonas de retroflujo y una mayor longitud de mezcla requerida.

Por otra parte, no resultó apropiado considerar a las presiones de ingreso como condiciones de frontera para la solución del modelo en el dominio de flujo, pues la composición del producto obtenido tras la solución no era aceptable. Resultó conveniente establecer la presión como una condición de frontera a la salida del dominio, fijando como condiciones de frontera de ingreso los caudales de flujo de cada corriente, expresados en masa.

## **6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios similares.**

En concordancia con un estudio similar y según se pudo verificar en la primera corrida efectuada, se ha podido contrastar que no siempre es deseable que el jet de la corriente lateral impacte en el lado opuesto de la tubería, al proporcionar una mayor longitud de mezcla y una región de retroflujo [15]. Sin embargo, se ha podido verificar la existencia de publicaciones que indican que en ingeniería química es deseable que el jet impacte en la tubería opuesta, a fin de acelerar el mezclado, a pesar de que hay aplicaciones industriales donde esto no siempre sería lo deseado [71].

Al respecto, la presente investigación opta por recomendar que la corriente de etanol no impacte en el lado opuesto de la tubería de gasolina para la formulación de gasohol, pues el resultado del modelo es concordante con el hecho de que se



espere un retroflujo y una mayor longitud de mezcla. Además, al estarse empleando la gravedad, una región de retroflujo no resulta conveniente para mantener la caída de presión constante.

Por otro lado, existe una investigación que señala que para caudales de mezcla y una relación de mezcla constantes, un incremento de diámetro conllevaba a una mayor longitud de mezcla [19]. Este hecho es confirmado mediante el presente modelo, el cual considera caudales y relación de mezcla constantes. El estudio de la Tabla 33 indica que las tuberías de 8 in de diámetro proporcionaron longitudes de mezcla superiores a las de 6 in.

Respecto al uso del modelo de turbulencia *k-ε realizable* para simulación de inyección por jet lateral para mezclado en línea, mismo modelo que fue empleado en el presente trabajo, un estudio de investigación indica que sí existe correspondencia entre la simulación y los resultados obtenidos de manera experimental [72]. Por tanto, puede esperarse que los resultados obtenidos en el presente trabajo, de llevarse a cabo bajo las condiciones indicadas, sean congruentes con verificaciones experimentales.

### **6.3 Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes.**

El autor de la presente investigación se responsabiliza por la información emitida en el presente informe, de acuerdo con el Reglamento del Código de Ética de la investigación de la Universidad Nacional del Callao a través de la Resolución del Consejo Universitario N° 260-2019-CU.

## VII. CONCLUSIONES

Se logró modelar matemáticamente el proceso de homogeneización en línea por gravedad para la obtención de gasoholes. El modelo constó con un total de cuarenta y tres (43) ecuaciones, de las cuales ocho (8) aplicaron a dos volúmenes de control constituidos por los sistemas de flujo desde los tanques de gasolina y etanol hasta el punto de mezcla, y treinta y cinco (35) aplicaron al dominio de flujo abarcando desde el punto de mezcla (inyección) hasta la longitud de mezcla de los productos.

Se determinó que, mientras se mantenga el control sobre los flujos de las corrientes de gasolina y etanol que están por mezclarse, a fin de que mantengan la relación correcta para que el gasohol formulado cuente con 7.8% de alcohol en volumen, el tiempo no influirá en el modelo desarrollado ni tampoco en la longitud de mezcla obtenida.

Se determinó que, en tanto los flujos de gasolina y etanol se controlen a un valor fijo y manteniendo la relación de mezcla apropiada en todo momento, las presiones de la gasolina y el etanol antes de su confluencia en el punto de inyección necesitarán ser comparables a fin de no originar retroflujos ni mayor longitud de mezcla. En las corridas efectuadas, se verificó que la presión de la corriente de etanol en el punto de inyección era solo ligeramente superior a la de la gasolina, con un exceso máximo alrededor de los 0.5 kPa. Además, de esta manera las caídas de presión al término de la longitud de mezcla eran las mismas para flujos determinados y diámetros de tubería específicos, sin importar que las presiones de gasolina y etanol fueran disminuyendo con el paso del tiempo y sin alterar también la longitud de mezcla.

## VIII. RECOMENDACIONES

Verificar, empleando un equipo de cómputo de características superiores al usado en el presente trabajo, la independencia de la malla empleada para la solución de las ecuaciones en el dominio de flujo, usando elementos cuya dimensión máxima sea inferior a 0.5 in., hasta llegar al punto en el que los resultados muestren una variación mínima.

Realizar corridas a escala laboratorio de acuerdo a las condiciones dadas en el presente trabajo, a fin de efectuar la validación del modelo con resultados reales, el cual deberá simularse bajo los nuevos valores que se empleen.

Estudiar el efecto que el ángulo de inyección de etanol en la tubería de gasolina tendría sobre la solución del modelo en el dominio de flujo, pues se ha tomado conocimiento de investigaciones realizadas que indican que el ángulo influye sobre la longitud de mezcla obtenida; sin embargo, la delimitación temporal del trabajo impidió efectuar corridas con las cuales corroborar esta información. En este estudio podrían considerarse también los efectos de las perturbaciones en el flujo de entrada al dominio de flujo en tramos de tubería inferiores a la longitud de entrada hidrodinámica.

## IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] EPSTEIN, Alex. *The Moral Case for Fossil Fuels*. United States of America: Portfolio/Penguin, 2014. ISBN: 978-1-59184-744-1.
- [2] JALOPNIK. A Brief History Of Gasoline: How Gas Got Into Our Lives. 2021 [fecha de consulta: 27 de noviembre de 2022]. Disponible en: <https://jalopnik.com/a-brief-history-of-gasoline-how-gas-got-into-our-lives-1846958607>
- [3] GASOLINE. En: *Encyclopedia Britannica* [en línea]. Chicago: The Britannica Group, 2022 [fecha de consulta: 27 de noviembre de 2022]. Disponible en: <https://www.britannica.com/technology/gasoline-fuel>
- [4] SPRINGER INTERNATIONAL PUBLISHING. *Springer Handbook of Petroleum Technology*. 2° Edición. United States of America: Hsu y Robinson, 2017. ISBN: 978-3-319-49345-9.
- [5] HOUGEN, Olaf, WATSON, Kenneth y RAGATZ, Roland. *Principios de los Procesos Químicos*. España: Editorial Reverté S.A., 1982. 258 pp. ISBN: 978-84-291-4052-1.
- [6] FOGLER, H. Scott. *Elements of Chemical reaction Engineering*. Fifth Edition. United States of America: Pearson Education, Inc., 2016. 431 pp. ISBN: 978-0-13-388751-8.
- [7] WEININGER, Stephen y STERMITZ, Frank. *Química Orgánica*. España: Editorial Reverté S.A., 1988. 84 pp. ISBN: 84-291-7527-X.
- [8] A Brief History of Octane in Gasoline: From Lead to Ethanol [en línea]. Washington: Werner, C. / Stolark, J. (30 de marzo de 2016) [fecha de consulta: 27 de noviembre de 2022]. Disponible en: <https://www.eesi.org/papers/view/fact-sheet-a-brief-history-of-octane>
- [9] ORGANISMO Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (Osinergmin). Decreto Supremo N° 021-2007-EM. 2007 [fecha de consulta: 2 de diciembre de 2022]. Disponible en: [https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro\\_documental/PlantillaMarcoLegalBusqueda/Reglamento%20para%20la%20Comercializaci%C3%B3n%20de%20Biocombustibles.pdf](https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/PlantillaMarcoLegalBusqueda/Reglamento%20para%20la%20Comercializaci%C3%B3n%20de%20Biocombustibles.pdf)

- [10] ETCHELLS III, Arthur y MEYER, Chris. Mixing in Pipelines. En: PAUL, Edward, ATIEMO-OBENG, Victor y KRESTA Suzanne. *Handbook of Industrial Mixing, Science and Practice*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., pp. 391-477. 2004. ISBN 0-471-26919-0.
- [11] ENERGY XPRT. Ethanol Blending System. [s.a] [fecha de consulta: 3 de diciembre de 2022]. Disponible en: <https://www.energy-xprt.com/products/ethanol-blending-system-331786>
- [12] MTR. Ethanol and Biodiesel Blending Skid. [s.a] [fecha de consulta: 3 de diciembre de 2022]. Disponible en: <https://mtrth.com/product/ethanol-and-biodiesel-blending-skid/>
- [13] EMERSON. Inline Blenders. 2022 [fecha de consulta: 3 de diciembre de 2022]. Disponible en: <https://www.emerson.com/en-us/catalog/automation-solutions/measurement-instrumentation/blending-systems/emerson-in-line-blenders>
- [14] SEBORG, Dale, EDGAR, Thomas y MELLICHAMP, Duncan. *Process Dynamics and Control*. 2° ed. United States of America: John Wiley & Sons Inc., 2004. ISBN 0-471-00077-9.
- [15] ZUGHBI, Habib, KHOKHAR, Zahid y SHARMA, Rajendra. Mixing in Pipelines with Side and Opposed Tees. *Industrial & Engineering Chemical Research* [en línea]. 2003. Vol. 42, no. 21, p. 5333-5344. [Consulta: setiembre 2022]. DOI. 10.1021/ie0209935. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/321320131\\_Mixing\\_in\\_Pipelines\\_with\\_Side\\_and\\_Opposed\\_Tees](https://www.researchgate.net/publication/321320131_Mixing_in_Pipelines_with_Side_and_Opposed_Tees).
- [16] YU, Wen y MORALES, América. Gasoline Blending System Modeling via Static and Dynamic Neural Networks. *International Journal of Modelling and Simulation* [en línea]. 2004. Vol. 24, no. 3, p. 151-160. [Consulta: setiembre 2022]. DOI. 10.1080/02286203.2004.11442299. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02286203.2004.11442299>.
- [17] XIAOOU, Li y WEN, Yu. Modeling of Crude Oil Blending via Discrete-Time Neural Networks. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering* [en línea]. 2008. Vol. 2, no. 6, p. 821-828. [Consulta: setiembre 2022]. ISSN

1307-6892.

Disponible

en:

<https://zenodo.org/record/1076590/files/11060.pdf>.

- [18] ALIYU, Abdulmumuni, MARHAENDRAJANA, Taufan y BINDAR, Yazid. Application of CFD for Numerical Analysis of Liquid-Liquid Mixing in T-Shape Mixer Using Ansysfluent. *Preprints* [en línea]. 2018. [Consulta: setiembre 2022]. DOI. 10.20944/preprints201807.0548.v1. Disponible en: <https://www.preprints.org/manuscript/201807.0548/v1>.
- [19] SUN, Bin, et al. Experimental and Numerical Analyses on Mixing Uniformity of Water and Saline in Pipe Flow. *Water* [en línea]. 2020. Vol. 12, no. 8, p. 2281. [Consulta: setiembre 2022]. DOI. 10.3390/w12082281. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/w12082281>.
- [20] GUTIÉRREZ ORIHUELA, Mariano. Evaluación Técnica-Económica para instalar un Sistema de Mezcla en Líneas de Gasolinas en Refinería Talara. Tesis (Título de Ingeniero Petroquímico). Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, 2006.
- [21] QUINDE CARDOZA, Elizabeth. Evaluación Técnica Económica para Implementar un Nuevo Sistema de Blending en Línea para la Formulación de Gasolinas y Petróleos Industriales en Refinería Talara. Tesis (Título de Ingeniera Química). Piura: Universidad Nacional de Piura, 2012.
- [22] BIRD, Robert, STEWART, Warren y LIGHTFOOT, Edwin. *Transport Phenomena*. 2.<sup>a</sup> ed. United States of America: Jhon Wiley & Sons, Inc., 2002. ISBN 0-471-41077-2.
- [23] CENGEL, Yunus. *Fluid Mechanics – Fundamentals and Applications*. 4.<sup>a</sup> ed. Unites States of America: McGraw-Hill Education, 2018. ISBN 978-1-259-69653-4.
- [24] WILCOX, David. *Turbulence Modeling for CFD*. 3.<sup>a</sup> ed. La Cañada: DCW Industries, Inc., 2006. ISBN 978-1-928729-08-2.
- [25] FLUENT Inc. *FLUENT 6.3 User's Guide*. United States of America: Fluent Inc., 2006.
- [26] MATAIX Plana, C. Turbomáquinas hidráulicas. 2.a ed. España: Universidad Pontificia Comillas, 2009. pp. 167-171. ISBN: 978-84-8468252-3.

- [27] AFIF Khouri, E. Apuntes de hidráulica para explotaciones forestales. España: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo, 2004. pp. 103-111. ISBN: 978-84-8317453-1.
- [28] ANSYS, Inc. Ansys Fluent Theory Guide. United States of America: Ansys, Inc., 2021. p. 562-564.
- [29] SKIBA, Yuri. *Métodos y Esquemas Numéricos: Un Análisis Computacional*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2005. ISBN 970-32-2023-1.
- [30] TORO, Eleuterio. Riemman Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics. 3.a ed. Germany: Springer, 2009. ISBN: 978-3-540-25202-3.
- [31] SMART Process Design. *Aspentech's Hysys: Fluid Package (Thermodynamics) Notes* [en línea]. 2009 [fecha de consulta: 25 de marzo de 2023]. Disponible en: <https://smartprocessdesign.com/aspentechs-hysys-fluid-package-thermodynamics-notes/>
- [32] MR. CFD. *Introduction to ANSYS Fluent: A beginner's guide to CFD simulation* [en línea]. Turkey, 2023 [fecha de consulta: 25 de marzo de 2023]. Disponible en: <https://www.mr-cfd.com/introduction-to-ansys-fluent-a-beginners-guide/>
- [33] PETROPERÚ. Gasohol Súper Plus. 2023. [fecha de consulta: 26 de marzo de 2023]. Disponible en: <https://www.petroperu.com.pe/productos/combustibles/gasohol-superplus/>
- [34] PETROPERÚ. Gasolina Súper Plus. 2023. [fecha de consulta: 15 de febrero de 2023]. Disponible en: <https://www.petroperu.com.pe/productos/combustibles/gasolina-superplus/>
- [35] DICCIONARIO de la Lengua Española [en línea]. España: Real Academia Española, 2023 [fecha de consulta: 26 de marzo de 2023]. Disponible en: <https://dle.rae.es/densidad>
- [36] DICCIONARIO de la Lengua Española [en línea]. España: Real Academia Española, 2023 [fecha de consulta: 26 de marzo de 2023]. Disponible en: <https://dle.rae.es/viscosidad?m=form>

- [37] EDUCACIÓN en Ingeniería Química. Blending & Refinería Conchán de Petroperú. 2022. [fecha de consulta: 27 de marzo de 2023]. Disponible en: <https://www.ssecoconsulting.com/blending-en-refinacion-petroleo.html>
- [38] ESSS. Dinámica de Fluidos Computacional: ¿qué es? 2016. [fecha de consulta: 27 de marzo de 2023]. Disponible en: <https://www.esss.co/es/blog/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/#:~:text=La%20Din%C3%A1mica%20de%20Fluidos%20Computacional,qu%C3%ADmicas%2C%20combusti%C3%B3n%2C%20aeroac%C3%BAstica%20etc.>
- [39] SPRINGER Link. Computational mesh. 2022. [fecha de consulta: 27 de marzo de 2023]. Disponible en: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-37619-2\\_5#:~:text=Download%20chapter%20PDF-,A%20computational%20mesh%20is%20a%20set%20of%20surfaces%20in%20the,regularly%20fill%20the%20computational%20domain.](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-37619-2_5#:~:text=Download%20chapter%20PDF-,A%20computational%20mesh%20is%20a%20set%20of%20surfaces%20in%20the,regularly%20fill%20the%20computational%20domain.)
- [40] DICTIONARY.COM. Fluid. 2023. [fecha de consulta: 27 de marzo de 2023]. Disponible en: <https://www.dictionary.com/browse/fluid>
- [41] CANALES, Edgardo y MELO, Diógenes. *Dinámica de Procesos para Ingenieros Químicos*. Chile: Universidad de Concepción, 2019. 3 pp. ISBN: 978-956-227-454-8.
- [42] JONES, David y PUJADÓ, Peter. *Handbook of Petroleum Processing*. The Netherlands: Springer, 2008. p. 543. ISBN: 978-1-4020-2820-5.
- [43] SONIC CORPORATION. Inline Blending Systems. [s.a] [fecha de consulta: 14 de febrero de 2023]. Disponible en: <https://www.sonicmixing.com/blending-systems/>
- [44] MINISTERIO de Energía y Minas. Estadísticas. 2023. [fecha de consulta: 15 de febrero de 2023]. Disponible en: [https://www.minem.gob.pe/\\_estadisticaSector.php?idSector=5](https://www.minem.gob.pe/_estadisticaSector.php?idSector=5)
- [45] MUNICIPALIDAD Provincial de Talara. *Diagnóstico de Brechas* [en línea]. Talara: Unidad de Programación Multianual de Inversiones, 2020 [fecha de consulta: 15 de febrero de 2023]. Disponible en:



[https://munitalara.gob.pe/uploads/oficinas/OPP/UPMI/utic\\_diagnostico18082020.pdf](https://munitalara.gob.pe/uploads/oficinas/OPP/UPMI/utic_diagnostico18082020.pdf)

- [46] PETROPERÚ S.A. *Servicio de Caracterización, Evaluación de Riesgos a la Salud y el Ambiente, y Elaboración del Plan dirigido a la remediación de las Instalaciones Priorizadas de PETROPERÚ, Estudio de Caracterización, Refinería Conchán* [en línea]. Lima: Tema Litoclean S.A.C., 2021 [fecha de consulta: 15 de febrero de 2023]. Disponible en: <https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAH/ESTUDIO%20DE%20CARACTERIZACION/REFINERIA%20CONCHAN/3138026.pdf>
- [47] PETROPERÚ. Nueva Refinería Talara. 2023. [fecha de consulta: 15 de febrero de 2023]. Disponible en: <https://www.refineriatalara.com/esquema-de-proceso/>
- [48] TECHNIP. *Informe del Proyecto de Modernización de la Refinería Talara* [en línea]. England: Technip PMC Services Ltd., 2013. p. 12 [fecha de consulta: 15 de febrero de 2023]. Disponible en: <https://www.refineriatalara.com/wp-content/uploads/2018/01/Informe-Proyecto-Modernizacion-Refineria-Talara.pdf>
- [49] SMITH, J., VAN NESS, H., ABBOTT, M. y SWIHART, M. *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*. 8.<sup>a</sup> ed. Unites States of America: McGraw Hill, 2017. p. 146. ISBN: 978-1-259-69652-7.
- [50] MINISTERIO de Desarrollo Agrario y Riego. Descripción de las principales variables climáticas de la costa. 2015. [fecha de consulta: 15 de febrero de 2023]. Disponible en: <https://www.midagri.gob.pe/portal/53-sector-agrario/el-clima/369-principales-variables-climaticas-de-la-costa#>
- [51] ASTM. Standard Specification for Automotive Spark-Ignition Engine Fuel. D4814 – 01. United States, 2001.
- [52] HERSCHEL, Winslow. *Viscosity of gasoline* [en línea]. United States of America: Department of Commerce – Technologic Papers of the Bureau of Standards, 1919 [fecha de consulta: 15 de febrero de 2023]. Disponible en: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/nbstechnologic/nbstechnologicpaperT125.pdf>

- [53] AMERICAN Petroleum Institute. Recommended Practice for Design and Installation of Offshore Production Platform Piping Systems. API Recommended Practice 14E (RP 14E). United States, 1991.
- [54] PETERS, Max y TIMMERHAUS, Klaus. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. Singapore: McGraw Hill, Inc. 1991. p. 496. ISBN: 0-07-100871-3.
- [55] AMERICAN Petroleum Institute. Los Tanques de Acero Soldados para el Almacenamiento de petróleo. API Norma 650. United States, 1998.
- [56] AMERICAN Petroleum Institute. Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks. API Standard 620. United States, 1996.
- [57] COZEWITH, C., et al. Computer Simulation of Tee Mixers for Non-Reactive and Reactive Flows. *Ind. Eng. Chem. Res.* [en línea]. 1991, 30(1), 270-275 [fecha de consulta: 18 de febrero de 2023]. DOI. 10.1021/ie00049a043. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie00049a043>.
- [58] FORNEY, L. y MONCLOVA, L. Numerical Simulation of Pipeline Tee Mixers: Comparison with Data. *Industrial Mixing Technology: Chemical and Biological Applications* [en línea]. 1994, Academic Press, NY., 141-143.
- [59] ZUGHBI, H. y RAKIB, M. Numerical Simulations of Mixing in a Fluid Jet Agitated Tank. *Chem. Eng. Commun.* 2002, 189, 1038.
- [60] CROWE, C., SOMMERFIELD, M. y YUTAKA, Tsuji. *Multiphase Flows with Droplets and Particles*. United States of America: CRC Press, 1998. DOI: 10.1080/07373939908917667.
- [61] CROWE, Clayton y MICHAELIDES, Efstathios. Basic Concepts and Definitions. En: CROWE, Clayton. *Multiphase Flow Handbook*. United States of America: CRC Press, 1-65 p. 2006. ISBN 0-8493-1280-9.
- [62] BAILEY, Brent. Performance of Ethanol as a Transportation Fuel. En: WYMAN, Charles. *Handbook on Bioethanol: Production and Utilization*. United States of America: Taylor & Francis, 54 p. 1996. ISBN 1-56032-553-4.
- [63] MEIER, Paul. *The Changing Energy Mix*. United States of America: Oxford University Press, 2020. p. 275. ISBN: 9780190098391.

- [64] MONTOYA, Sandra, *et. al. Tendencias en Biotecnología Agroindustrial*. Colombia: Editorial Universidad de Caldas, 2022. p. 107. ISBN: 978-958-759-311-2.
- [65] UYAZÁN, A., *et. al. Deshidratación del etanol. Revista Ingeniería e Investigación* [en línea]. Diciembre, 2004, 24(3), 49-59 [fecha de consulta: 22 de febrero de 2023]. ISSN: 0120-5609. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/643/64324308.pdf>
- [66] MANNINEN, M., TAIVASSALO, V. y KALLIO, S. *On the mixture model for multiphase flow* [en línea]. Finlandia: VTT Publications 288, Technical Research Centre of Finland, 1996. ISBN: 951-38-4946-5. Disponible en: <https://publications.vtt.fi/pdf/publications/1996/P288.pdf>
- [67] SCHILLER, L. y NAUMANN, Z. A Drag Coefficient Correlation: *VDI Zeitung*. 1935, 77, 318-320.
- [68] ANSYS, Inc. *Ansys Fluent Theory Guide*. United States of America: Ansys, Inc., 2021. p. 609.
- [69] CHOWDHURY, Rana *et. al. Turbulent flow analysis on bend and downstream of the bend for different curvature ratio. AIP Conference Proceedings* [en línea]. Julio, 2016, 1754(1), 040020 [fecha de consulta: 25 de febrero de 2023]. DOI: 10.1063/1.4958380. Disponible en: <https://aip.scitation.org/doi/citedby/10.1063/1.4958380>
- [70] LIEN, K. *et. al. The Entrance Length for Fully Developed Turbulent Channel Flow. 15th Australasian Fluid Mechanics Conference* [en línea]. Diciembre, 2004 [fecha de consulta: 25 de febrero de 2023]. Disponible en: <https://www.aeromech.usyd.edu.au/15afmc/proceedings/papers/AFMC00093.pdf>
- [71] FENG, Zhigang, WANG, Ziaodong y FORNEY, Larry. Single Jet Mixing at Arbitrary Angle in Turbulent Tube Flow. *Proceedings of the 1998 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting: FEDSM'98* [en línea]. Junio, 1998, 4890, 1-5 [fecha de consulta: 24 de febrero de 2023]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Xiaodong-Wang-38/publication/2444800\\_Single\\_Jet\\_Mixing\\_at\\_Arbitrary\\_Angle\\_in\\_Turbul](https://www.researchgate.net/profile/Xiaodong-Wang-38/publication/2444800_Single_Jet_Mixing_at_Arbitrary_Angle_in_Turbul)

ent\_Tube\_Flow/links/00463536b03f25c7f6000000/Single-Jet-Mixing-at-Arbitrary-Angle-in-Turbulent-Tube-Flow.pdf

- [72] KANG, Guobing. Numerical simulation of jet and cross-flow mixing in Tee pipe. *Advanced Materials Research*. Junio, 2014, 960-961, 523-527. ISSN: 1662-8985.

## ANEXOS

## ANEXO 1

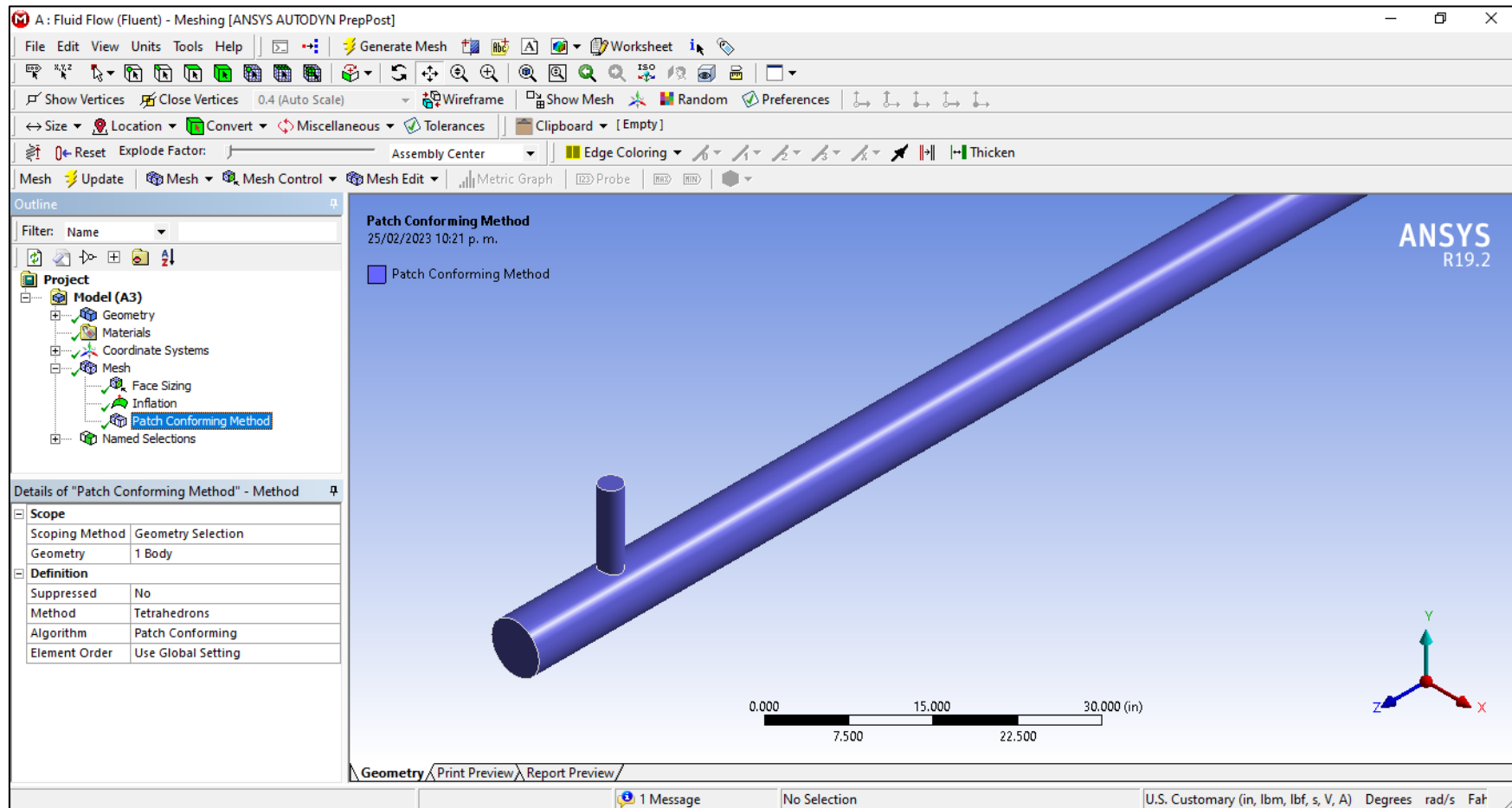
### Matriz de consistencia

“Modelado Matemático de la Homogeneización en Línea por Gravedad para Obtención de Gasoholes”.

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables	Dimensiones	Indicadores
<b>General</b>			<b>Dependiente</b>		Convergencia
¿Cómo se puede modelar matemáticamente la homogeneización en línea por gravedad para la obtención de gasoholes?	Modelar matemáticamente la homogeneización en línea por gravedad para la obtención de gasoholes.	Mediante el correcto planteamiento y desarrollo de los fundamentos y principios que gobiernan el flujo y la mezcla de fluidos, se podrá desarrollar el modelo matemático para la mezcla en línea por gravedad para la obtención de gasoholes.	Y = Modelo de homogeneización.	Longitud de mezcla.	Grado de mezcla.  Resultados con sentido físico.
<b>Específicos</b>			<b>Independiente</b>		
¿Cómo influye el tiempo en el modelo de homogeneización?	Determinar la influencia del tiempo en el modelo de homogeneización.	El tiempo influye en el modelo de homogeneización.	X1 = Dinámica del proceso.	Tiempo.	Convergencia.
¿Cómo influyen las presiones del dominio de flujo en el modelo de homogeneización?	Determinar la influencia de las presiones del dominio de flujo en el modelo de homogeneización.	Las presiones del dominio de flujo influyen en el modelo de homogeneización.		Presiones en el dominio de flujo.	Resultados con sentido físico.

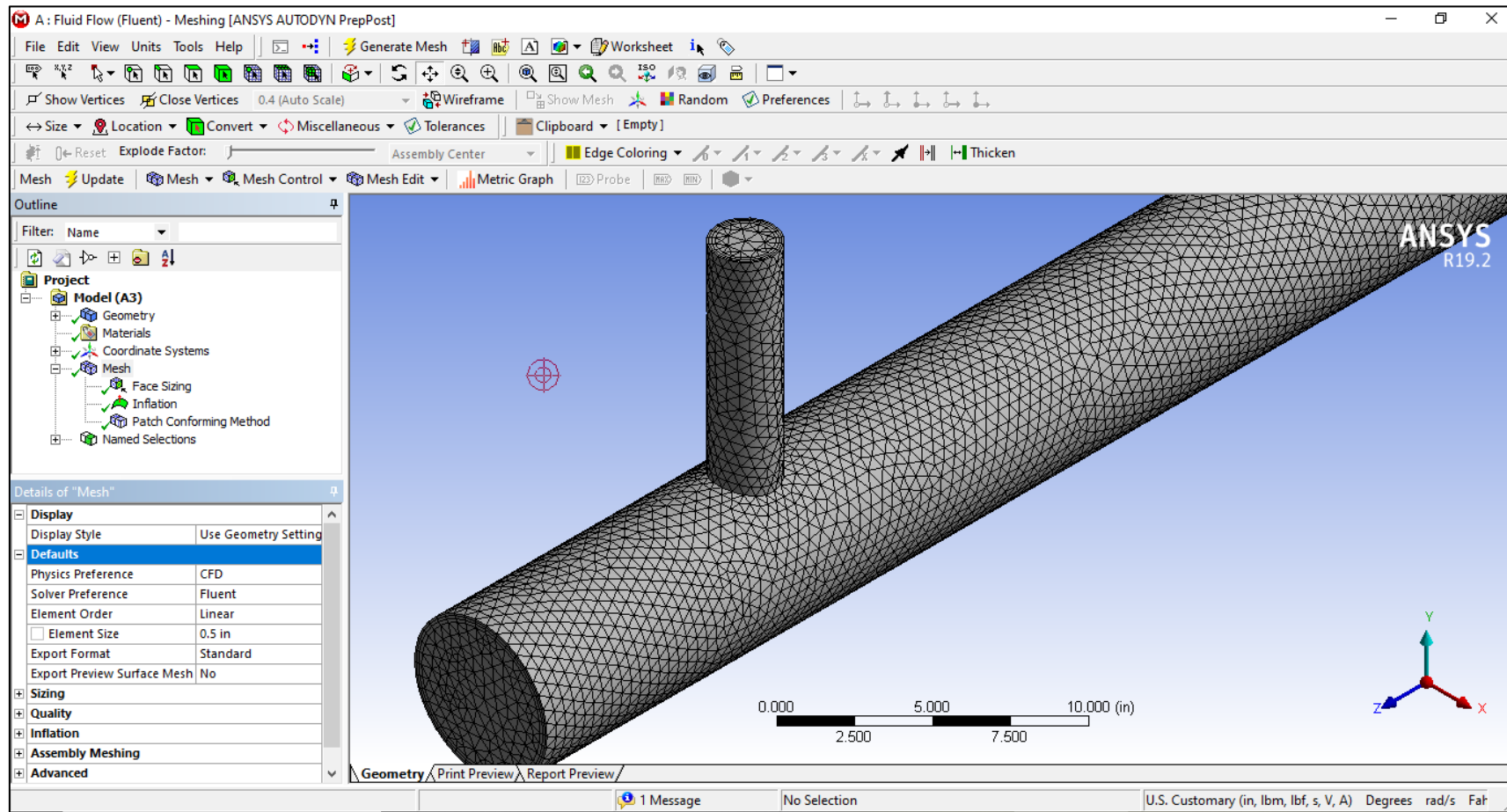
## ANEXO 2

Pantalla principal del generador de mallas de Ansys mostrando uno de los volúmenes generados a punto de ser segmentado por malla. Obsérvese en la esquina inferior izquierda la selección de elementos tetraédricos.



### ANEXO 3

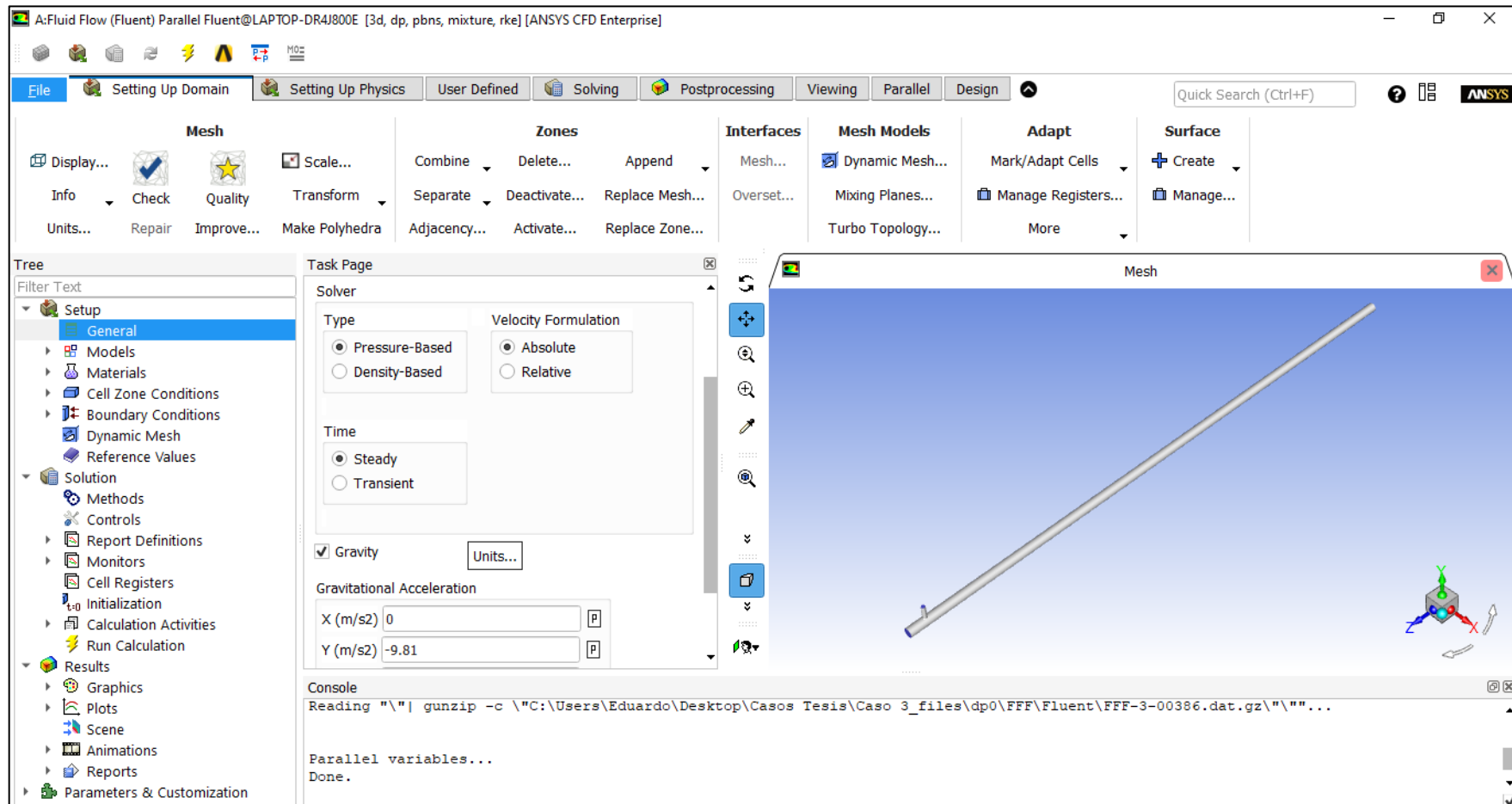
Pantalla principal del generador de mallas de Ansys mostrando uno de los volúmenes generados con mallas tetraédricas. Obsérvese en la esquina inferior izquierda la selección de tamaño de elemento de 0.5 in.





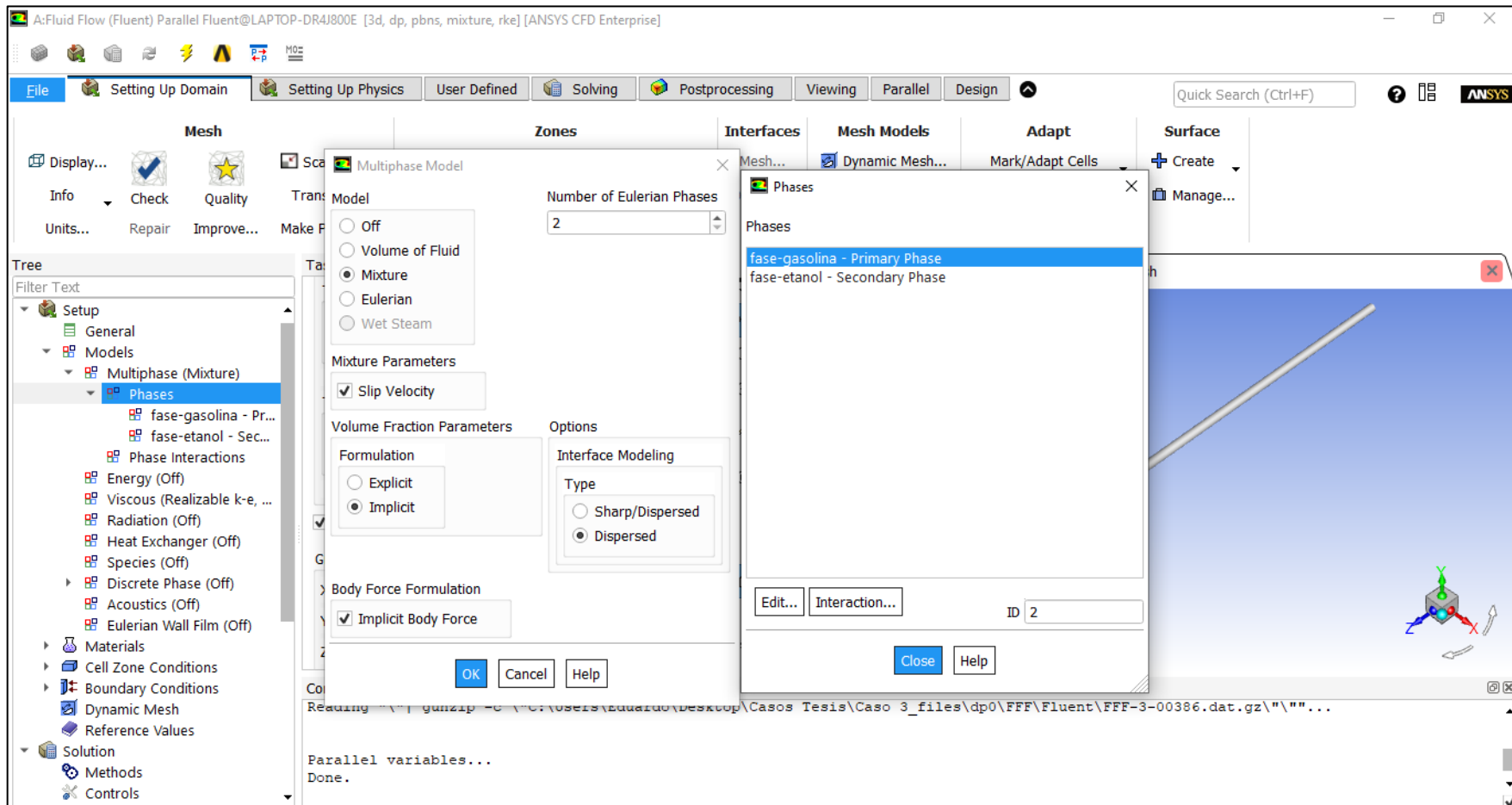
## ANEXO 4

Pantalla principal de Ansys FLUENT 19.2. Obsérvese la configuración de estado estacionario e inclusión del campo gravitatorio en el panel de ajustes generales. A la derecha, la malla por ser resuelta.



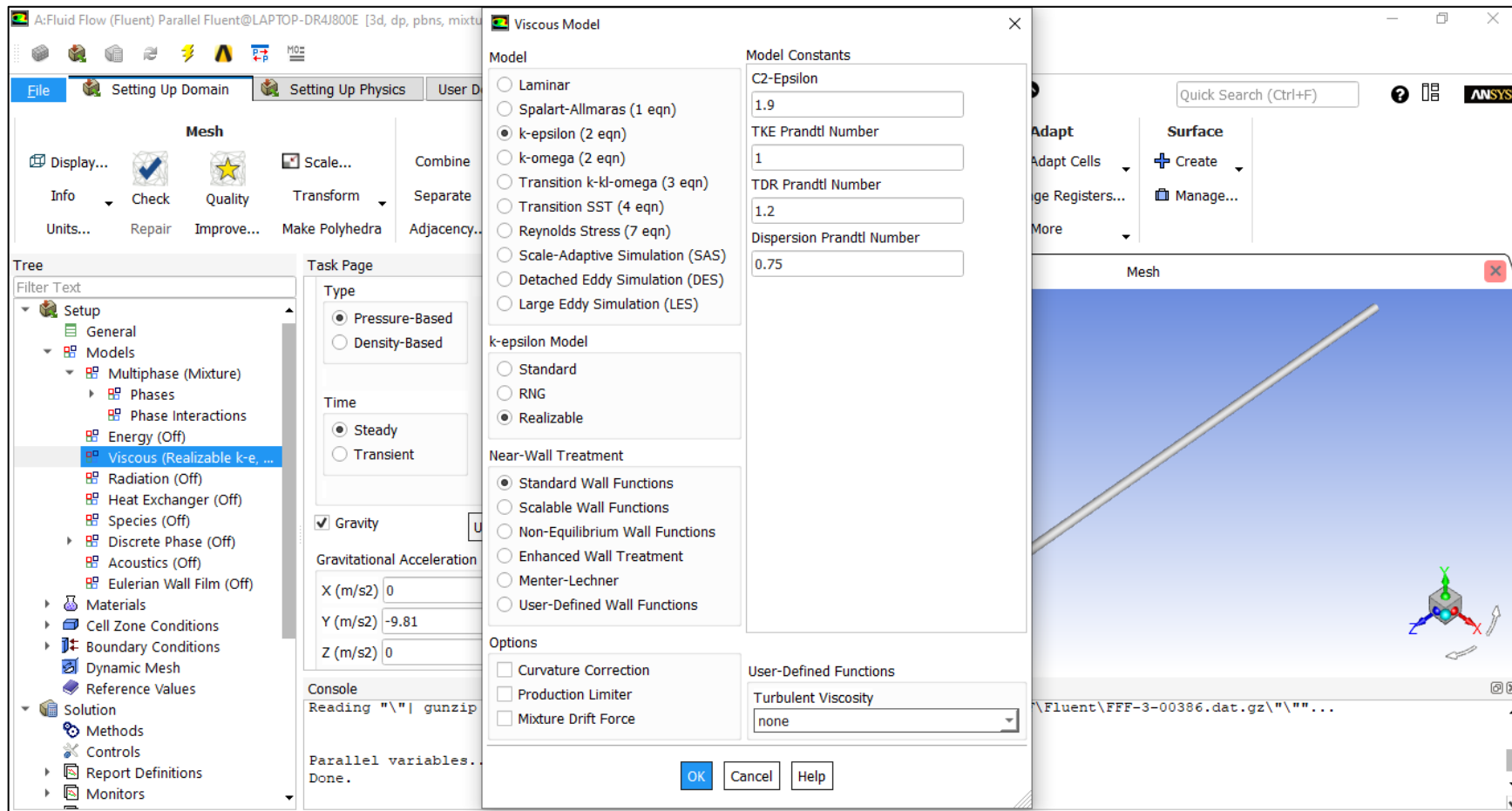
## ANEXO 5

Pantalla de selección de modelo multifase de Ansys FLUENT 19.2. Debido al acoplamiento existente entre la gasolina y el etanol, se seleccionó un modelo de mezcla en lugar de un modelo euleriano.



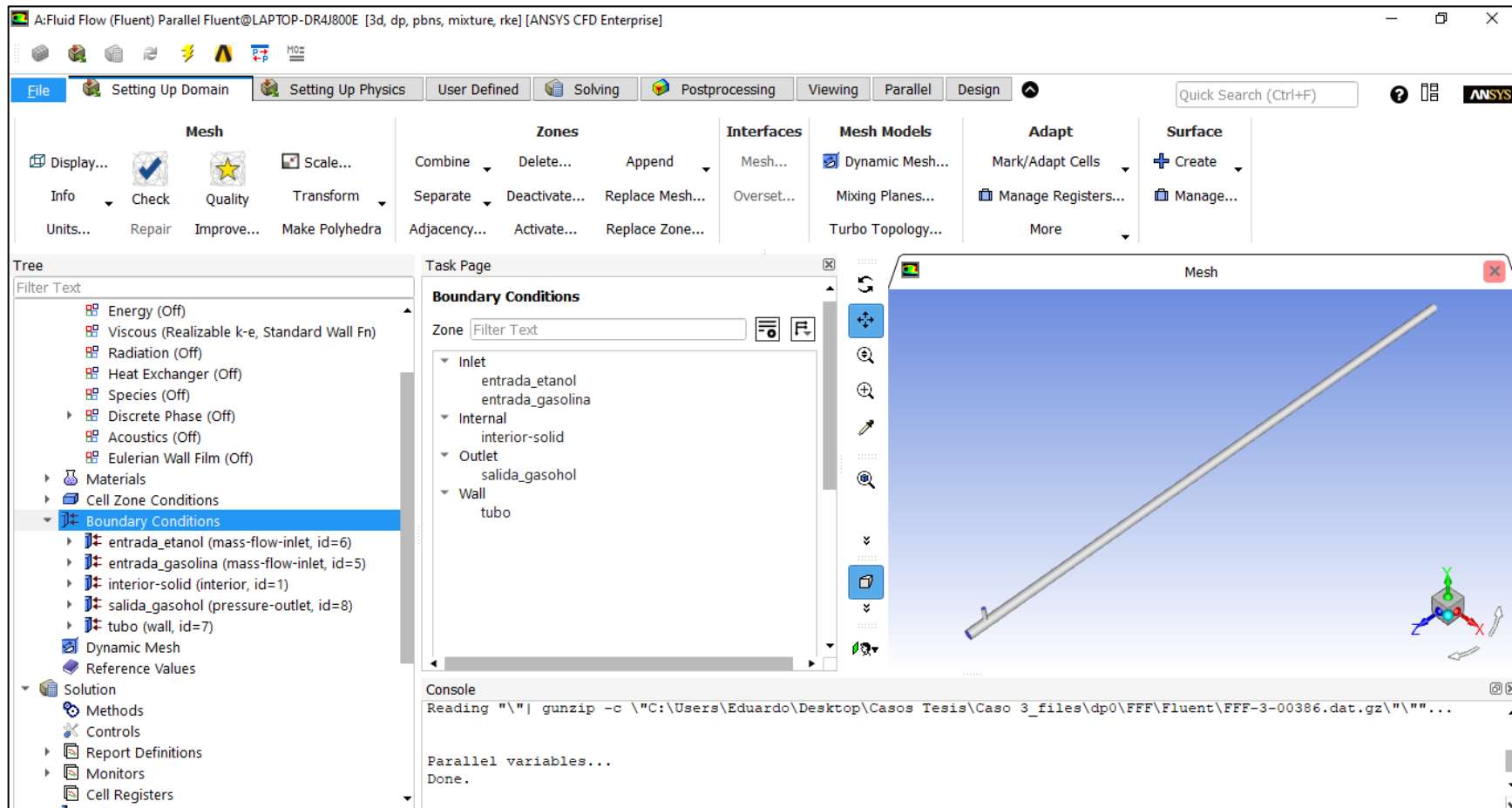
## ANEXO 6

*Pantalla de selección de modelo de turbulencia de Ansys FLUENT 19.2. Debido a la experiencia de investigaciones anteriores para mezcla se empleó el modelo  $k-\epsilon$  realizable.*



## ANEXO 7

*Pantalla de ingreso de condiciones de frontera de Ansys FLUENT 19.2. Como se puede apreciar en el lado izquierdo, las corrientes de ingreso fueron consideradas como flujo másico, y la de salida, de presión.*



## ANEXO 8

Pantalla de métodos de solución empleados por Ansys FLUENT 19.2. Las relaciones de presión-velocidad se resolvieron acopladas, los métodos numéricos empleados consistieron en discretización de mínimos cuadrados basados en celdas, esquema de escalamiento de presión y derivación de primer orden a partir de celdas superiores.

