



# Viscosidad de la mezcla Fuel oíl-Diésel al 8 % para generadores de vapor

## Viscosity of the mixture Fuel oil-8% diesel for steam generators

Isabel Xiomara García-Rodríguez<sup>1,\*</sup>, Manuel Cantos-Macías<sup>II</sup>,  
Andrés Valeri González-Maimó<sup>III</sup>

I. Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial. Santiago de Cuba, Cuba

II. Universidad Tecnológica de Manabí. Manta, Ecuador

III. Fábrica de Aceite (ERASOL) Santiago de Cuba, Cuba

\*Autor de correspondencia: [isabelx@uo.edu.cu](mailto:isabelx@uo.edu.cu)

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 internacional](#)



Recibido: 31 de mayo de 2019

Aceptado: 28 de junio de 2019

### Resumen

En los generadores de vapor piro tubulares frecuentemente se emplean mezclas de combustibles pesados y ligeros generando tupición o sobreconsumos de combustible. El presente trabajo se realizó con el objetivo de evaluar la viscosidad cinemática de la mezcla de Fuel oíl – Diésel al 8% a través de correlaciones matemáticas y mediante experimentación, para facilitar la toma de decisiones de los especialistas a cargo del proceso, referente a las fallas presentadas por los quemadores y al sobreconsumo de combustible. Fueron empleados el método experimental y el método matemático demostrándose que empleando la

ecuación de Arrhenius y el procedimiento desarrollado en el trabajo puede estimarse la viscosidad cinemática en un valor aproximado, con la muestra estudiada se obtiene 109,11 mm<sup>2</sup>/s, el valor obtenido se encuentra por debajo del rango establecido por el fabricante para el quemador utilizado, sin embargo, para incrementar la eficiencia técnica y energética, el proceso de mezclado requiere de modernización.

**Palabras claves:** regla de mezclas; viscosidad cinemática; Fuel oíl; Diésel.

### Abstract

Frequently, in the Piro tubular steam generators are used of mixtures light and heavy fuel that block and bring about over consumption of fuel. The burners and the consumption of fuel wrote the present piece of work with the aim of evaluating the cinematic viscosity of the mixture of fuel oil-diesel up to an 8% throughout a math correlation and by means of experimentation for facilitating decisions taking by specialists in change of referent process in the failure present. The methods that were used: the experimental and

the mathematical one to demonstrate how to estimate cinematic viscosity in an approximately value with the sample already studied it was obtained 109,11 mm<sup>2</sup>/s and underneath was obtained the range established by the manufacturer for the burner used, however, to increase the technical and energetic efficiently, the process require modernization

**Key words:** mixing rule; kinematic viscosity; Fuel oil; Diesel.

### Cómo citar este artículo:

García Rodríguez IX, Cantos Macías M, González Maimó AV. Viscosidad de la mezcla Fuel oíl-Diésel al 8 % para Generadores de Vapor. Ingeniería Mecánica. 2020;23(1):e592. ISSN 1815-5944.

## Introducción

El empleo de mezclas Fuel oíl-diésel a diferentes porcentajes en generadores de vapor piro tubulares es una alternativa para disminuir el consumo de Diésel por su alto costo con relación al Fuel oíl. La no existencia de laboratorios especializados en las entidades consumidoras impide la determinación de la viscosidad de las mezclas, lo que trae consigo incertidumbres en el personal técnico y especialistas acerca de las fallas que ocurren en los quemadores. Siendo necesario una alternativa para evaluar la viscosidad cinemática de la mezcla Fuel oíl-Diésel al 8% partiendo de los datos recibidos en la carta de conformidad que permita tener una idea del valor de la calidad de la mezcla combustible y sus posibles efectos al proceso de combustión.

Imbert González [1] considera que la viscosidad es una propiedad de transporte utilizada en diseño y optimización de procesos químicos y petroquímicos que involucran transporte de fluidos, agitación, mezcla, filtración, intercambio de calor. La revisión de la literatura de los últimos cinco años reporta que la mayoría de los modelos matemáticos que se han establecido para la estimación de la viscosidad de líquidos son de

naturaleza empírica, sin embargo, muchos autores han desarrollado correlaciones matemáticas para la estimación de su valor. Sánchez [2] desarrolla correlaciones para predecir la viscosidad dinámica del petróleo crudo en función de su gravedad relativa, la cual se considera una propiedad fundamental del petróleo y por tanto de fácil determinación. Dicha correlación no se ajusta al caso de las mezclas, no obstante, Valdés Parada [3] reporta que existe la posibilidad de predecir la viscosidad de la mezcla a partir de la viscosidad que presenta cada uno de los hidrocarburos a la misma temperatura antes de ser mezclados. Benalcázar [4] propone un algoritmo que, bajo condiciones de viscosidad del crudo, caudal, condiciones iniciales de bombeo y estructurales del oleoducto permite simular el transporte de crudo. Suarez [5] proponen una regla de mezclado para predecir el efecto que causa en la viscosidad del petróleo extra pesado añadir formulaciones de petróleo ligero y otros diluentes. Saltos [6] Emplea un modelo de regresión lineal múltiple y obtiene un modelo matemático con un ajuste R2, capaz de predecir el consumo de mezclas diferentes de hidrocarburos y con diferentes cargas.

La investigación bibliográfica realizada ha demostrado la tendencia que existe en la aplicación de correlaciones matemáticas para estimar la viscosidad de una mezcla de crudos, siempre y cuando la ecuación empleada sea ajustada experimentalmente. No obstante, las condiciones, objetivos y características técnicas del proceso objeto de estudio no se corresponden con las de los autores citados, resulta una experiencia diferente con un fin netamente práctico. En el presente trabajo se desarrolla un algoritmo para la estimación de la viscosidad de la mezcla Fuel oil-Diésel empleando una regla de principios del siglo XX comprobada experimentalmente aplicando las normas ASTM (*American Society for Testing Materials*), dando lugar a un algoritmo para la creación de un Software que ahorra tiempo e informa al especialista para la toma de decisiones ejecutivas acerca de la calidad del combustible a consumir.

## Métodos y Materiales

Los quemadores de las calderas piro tubulares muestran en las características técnicas los requerimientos de viscosidad cinemáticas para un rango a determinadas temperaturas. En el presente estudio se utilizó como referencia un quemador con los siguientes requerimientos de viscosidad cinemática, 50 °C (15°E-50°E), este rango expresado en el sistema internacional de unidades es 112 mm<sup>2</sup>/s- 372 mm<sup>2</sup>/s.

En el estudio fue utilizada una muestra de Fuel oil y de Diésel, la viscosidad de ambos combustibles aparece en la tabla 1 y los datos se obtuvieron de la carta de conformidad entregada por la empresa comercializadora al cliente, en el momento de servir el producto.

**Tabla 1.** Viscosidad cinemática y densidad relativa del Fuel oil-Diésel.  
Fuente: empresa comercializadora

Hidrocarburos	Temperatura	Viscosidad cinemática (mm <sup>2</sup> /s)	Densidad relativa
Fuel oil	50 °C	159	0,96033
Diésel	40 °C	3,60	0,84664

## Método experimental

Aplicando el procedimiento establecido en la norma ASTM 445 se evaluó de forma experimental la viscosidad de la mezcla Fuel oil-diésel al 8%. Fueron empleados un Viscosímetro Cannon- Fenske, serie n<sup>2</sup>-300, constante nominal (mm<sup>2</sup>/s)/s :0,25; con intervalo de viscosidad cinemática en centiStoke (mm<sup>2</sup>/s) de 50 a 250 que posee un certificado de calibración 34806 y un areómetro 1298 (Aräometer nach espec. Gewicht temperatura 15 °C), con un intervalo de 0,7 a 1,00.

## Método Matemático

Las Reglas de mezclado para predecir la viscosidad dinámica de mezclas de hidrocarburos se observan en la tabla 4.

**Tabla 4.** Reglas de mezclado para hidrocarburos. Fuente: referencias citadas

Autor	Regla de mezclado	Donde:
Ecuación de Arrhenius	$\mu = \mu_A^{X_A} \cdot \mu_B^{X_B}$ (1)	$\mu_m$ -viscosidad dinámica de la mezcla de hidrocarburos. $\mu_A$ -viscosidad dinámica del hidrocarburo pesado. $X_A$ -porcentaje del hidrocarburo pesado. $X_B$ -Porcentaje del hidrocarburo ligero $\mu_B$ - viscosidad dinámica del hidrocarburo ligero.
Ecuación de Bingham	$\frac{1}{\mu} = \frac{X_A}{\mu_A} + \frac{X_B}{\mu_B}$ (2)	
Ecuación de Kendall-Monroe	$\mu^{1/3} = X_A \mu_A^{1/3} + X_B \mu_B^{1/3}$ (3)	
Ecuación de Linear	$\mu_m = X_A \mu_A + X_B \mu_B$ (4)	
Ecuación de Cragoe	$\mu = 5 \cdot 10^{-4} \exp \frac{1000 \ln 20}{L}$ (5)	

Para obtener la viscosidad cinemática partiendo de las reglas de mezclado, tabla 2, se ha seguido un procedimiento basado en el empleo de correlaciones matemáticas propuesta por varios autores, como a continuación se muestra:

1. Corregir la densidad del Fuel oil y la del diésel a 50°C empleando la ecuación 6

$$\rho_x^T = \rho_x^{15^\circ C} [1 - 0,000648(T - 15)] \quad (6)$$

Donde:

$\rho_x^T$  – densidad que se desea corregir a la nueva temperatura.

$\rho_x^{15^\circ C}$ - densidad medida a 15 °C

T- temperatura a la que se desea corregir la densidad.

2. Calcular la densidad de la mezcla de Fuel oil- Diesel al 8% a 50 °C.

$$\rho_m = X_F \rho_F + X_D \rho_D \quad (7)$$

3. Estimar la viscosidad cinemática del Diesel a 50 °C.

La ecuación desarrollada por Andrade [7], puede ser usada para la estimación de la viscosidad cinemática a cualquier temperatura, en el caso de fracciones líquidas de petróleo. Para estimar la viscosidad a 50°C, se expresa de la forma siguiente:

$$\vartheta_x^{50^\circ C} = 10^{A \cdot (0,96)^B - 0,8696} \quad (8)$$

Donde:

A y B son coeficientes determinados experimentalmente, ecuaciones 9 y 10.

$$A = \log_{10}(\vartheta_{100}) + 0,8696 \quad (9)$$

$$B = 0,28008 \cdot \log_{10}(\vartheta_{100}) + 1,8616 \quad (10)$$

$\vartheta_{100}$  es la viscosidad cinemática a 100 °F (aproximadamente 38 °C o 311 °K) en cSt.

4. Calcular la viscosidad dinámica a 50 °C del Fuel oil y del Diesel, aplicando la relación matemática siguiente:

$$\mu_{50^\circ C} = \vartheta_{50^\circ C} \cdot \rho_{50^\circ C} \quad (11)$$

Donde:

$\mu_{50^\circ C}$ - viscosidad dinámica o absoluta a 50 °C

$\vartheta_{50^\circ C}$  - viscosidad cinemática a 50 °C

$\rho_{50^\circ C}$ - densidad a 50 °C.

5.-Aplicar las reglas de mezclas, tabla 4

6.-Calcular la viscosidad cinemática de la mezcla a 50 °C por la ecuación 12:

$$\vartheta_m^{50^\circ C} = \frac{\mu_m^{50^\circ C}}{\rho_m^{50^\circ C}} \quad (12)$$

Donde:

$\vartheta_m^{50^\circ C}$ -Viscosidad cinemática de la mezcla a 50 °C

$\mu_m^{50^\circ C}$  -Viscosidad absoluta de la mezcla a 50 °C

$\rho_m^{50^\circ C}$  -Densidad de la mezcla a 50 °C

## Resultados y Discusión

Desde principio del siglo XX las correlaciones matemáticas para estimar la viscosidad de mezclas de hidrocarburos han sido empleadas surgiendo gran cantidad de modelos. En este sentido Parada [3] reporta que existe la posibilidad de predecir la viscosidad de la mezcla a partir de la viscosidad que presenta cada uno de los hidrocarburos a la misma temperatura antes de ser mezclados. Sin embargo Cardona [8] expresó que la utilización de correlaciones presenta las siguientes desventajas:

1. Rango de aplicación y precisión limitados.

2. La viscosidad tanto en fase líquida como en fase gaseosa, es calculada usando diferentes ecuaciones que pueden ser por tramos, independiente de la presión o por gráficas, mientras que la región cercana al punto crítico no es modelada.

3. La densidad es involucrada en la evaluación de la viscosidad de un fluido, requiriendo otros modelos para el cálculo de la misma.

Este autor propone un modelo basado en una ecuación de estado, lo que significa que independientemente de las desventajas que presentan las correlaciones la tendencia es a continuar empleándolas como método para estimar los valores de viscosidad en fluidos.

En el trabajo fueron empleados cinco modelos resultando la ecuación de Arrhenius el que más se ajusta a la mezcla fuel oil-diesel al 8%. El valor de la viscosidad de la mezcla a 50 °C obtenido experimentalmente es de 109,33 mm<sup>2</sup>/s y por la ecuación de Arrhenius es de 104,23 mm<sup>2</sup>/s, la diferencia es de 5,1 mm<sup>2</sup>/s. Este resultado muestra que la viscosidad de la mezcla estudiada se encuentra por debajo del valor establecido por el

fabricante de los quemadores lo que incide negativamente en el proceso de combustión del generador de vapor.

Según Jian Zhang [9] en los últimos años, se ha incrementado la utilización de derivados del petróleo como diluentes de aceites crudos pesados, el éxito de dicha tecnología radica en determinar la calidad y cantidad de diluyente necesario para conseguir la mezcla óptima. Al respecto Calvo[10] expresa que el combustible líquido habitualmente se quema a través de una suspensión de gotas generadas como consecuencia de su atomización.

Para la atomización efectiva (gotas pequeñas) se requieren combustibles de baja viscosidad. Los combustibles livianos tales como el Fuel oil N° 2, pueden ser atomizados a temperatura ambiente, Sin embargo, los combustibles más pesados deben ser calentados para producir la viscosidad deseada, el precalentamiento requerido varía desde 373 °K (100°C) para combustibles N° 6 hasta 623 °K (350°C) para productos de fondo de torre con vacío. Teniendo en cuenta la calidad de los hidrocarburos empleados en el estudio, los resultados demuestran que una mezcla Fuel oil-diesel al 4 % garantiza un valor de viscosidad cinemática de 132,0 mm<sup>2</sup>/s en el rango establecido por el fabricante (112-372 mm<sup>2</sup>/s), favoreciendo la eficiencia del proceso de combustión.

Acerca del proceso de mezclado, Galano [11] afirma que: «la preparación de mezclas de derivados del petróleo (Diésel-Fuel oil) para su utilización en calderas, hornos y otros presentan el problema de no ser totalmente estables, lo cual dificulta y en muchos casos imposibilita el proceso de combustión».

Streeter [12] plantea: «si los caudales de entrada y salida varían con el tiempo y el intercambio de momentum entre la entrada y la salida es la única fuente de energía requerida para la mezcla en el tanque, es bastante posible desarrollar zonas muertas o corto circuitos en el tanque lo cual hace que solamente parte del contenido del tanque se mezcle, para crear condiciones uniformes en el tanque frecuentemente se usan mezcladores o agitadores». En el desarrollo de la investigación fue diagnosticado el proceso de mezcla comprobándose que se realiza en un tanque alimentado por una tubería de entrada para los combustibles a mezclar y otra de salida para la mezcla, no existe calentamiento, ni agitación en este proceso, lo cual en opinión de los autores no garantiza la calidad adecuada en la mezcla y es la causa de que en ocasiones exista sobreconsumo y en otras se presenten tupiciones en los quemadores.

La metodología desarrollada ha permitido evaluar el comportamiento de la viscosidad cinemática de la mezcla de Fuel Oil –Diésel al 8% empleada como combustibles en generadores de vapor, demostrándose la importancia del proceso de mezclado para garantizar una posterior combustión eficiente en el generador de vapor. El procedimiento desarrollado en la investigación constituye un algoritmo que puede servir de referencia para la creación de un Software destinado a estimar la viscosidad cinemática de mezclas de hidrocarburos partiendo de los datos contenidos en la carta de conformidad que entrega la empresa distribuidora al servir el producto.

La principal limitación del trabajo es que se requiere mejorar la eficiencia del proceso de mezclado con tecnologías apropiadas, usando los mezcladores mecánicos dinámicos o estáticos de amplio uso en la actualidad.

## Conclusiones

El procedimiento matemático empleado y el porcentaje de Diésel en la mezcla son diferentes a los estudios realizados anteriormente por otros autores con relación al tema. El trabajo muestra una nueva alternativa para estimar la viscosidad cinemática de los hidrocarburos para aquellas entidades consumidoras de este tipo de mezclas y que no disponen de un laboratorio al efecto, aún cuando el valor de la viscosidad de la mezcla obtenido por esta vía constituye un estimado, el mismo brinda la información necesaria a técnicos y especialistas para la toma de decisiones en relación a la eficiencia del proceso de combustión y al consumo de combustible.

La mezcla de Fuel Oil-Diesel de viscosidad cinemática de 159 mm<sup>2</sup>/s y 3,60 mm<sup>2</sup>/s a 50 °C y 40 °C respectivamente da como resultado un hidrocarburo de 109,11 mm<sup>2</sup>/s a 50 °C.

## Referencias

1. Imbert González J, García Valladares O, Guillen Gordin R. Análisis hidrodinámico de un flujo turbulento en un espacio anular con espirales insertadas. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 2016;15:149-159.
2. Sánchez Minero F. Comparison of correlations based on API gravity for predicting viscosity of crude oils. *Fuel*. 2014;138:193-199.
3. Valdez Parada J. Velocity and stress jump conditions between a porous medium and a fluid. *Advances in water Resources*. 2014;1(62):327-339.
4. Belcazar, H, Gómez H. Modelación y simulación numérica del transporte del petróleo por el sistema de oleoducto transecuatoriano. *FIGEMPA: investigación y desarrollo*. 2017;1(1):22-30.
5. Suarez E, Pérez J. New Mixing rule for analysis of the influence of a formulation oil on extraheavy oil crude viscosity. *Revista mexicana de ingeniería Química*. 2018;17(1):40-53.
6. Saltos, M y Jarre G. Modelo matemático para predecir la viscosidad de mezclas de biodiesel. *Revista ciencias técnicas agropecuarias*. 2019;28(1):10-22
7. Benjumea PN. Predicción del efecto de la temperatura sobre la viscosidad del biodiesel de aceite de palma y sus mezclas con diésel convencional. *Revista Energética*. 2006;35:33-38.

8. Cardona-Palacio LF. Cálculo de la viscosidad de hidrocarburos a partir de la ecuación cúbica de estado de Jarrhian-Heidaryan. Revista Mexicana de Ingeniería Química. 2016;15(3):1019-1025.
9. Jian Z, Wand X. Study on Optimizing Operation of Preheating Commissioning for Waxy Crude Oil Pipelines. Advances in Mechanical Engineering. 2014;14:25-37.
10. Calvo E, Suárez E. Análisis de Fallas en Generadores de Vapor. Revista Cubana de Ingeniería. 2016;7(1):36-42.
11. Galano J. Estudio de estabilidad de mezclas Diesel-Fuel oil a través de variables macroscópicas. Revista Cubana de Química. 2006;XVIII(1):283-291
12. Streeter, V. Mecánica de los fluidos. 9na Edición. Colombia: McGraw-Hill..

#### Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

#### Contribución de los autores

**Isabel Xiomara García Rodríguez.** <https://orcid.org/0000-0003-00080-26121>

Participó en el diseño de la investigación, de las correlaciones matemáticas para estimar la viscosidad de mezcla de combustibles y el algoritmo destinado a estimar la viscosidad cinemática de mezclas de hidrocarburos. Participó en la revisión y redacción del informe final.

**Manuel Cantos Macías.** <https://orcid.org/0000-0001-7589-0210>

Investigación bibliográfica, análisis y definición de la metodología a emplear en la solución del problema, la revisión crítica del artículo y en la redacción y aprobación de su versión final.

**Andrés Valeri González Maimo.** <https://orcid.org/0000-0002-3509-1542>

Apoyó en la identificación del problema, aporte de datos, realización de las mediciones, documentación de la problemática y en la revisión y redacción final del trabajo