

Development of a software for economical optimization in the motor oil formulation

Irina León González, MSc¹, Sergio A. Pérez, PhD²

¹*Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador, iribleon@espol.edu.ec*

²*Universidad de Carabobo, Venezuela, sperez@uc.edu.ve*

Abstract: In industry and transportation systems, lubricating oils play a fundamental role, since they must keep equipment in good condition. For the oil to fulfill this function, it must have a good viscosity, therefore it is important to define its characteristics well. In the lubricating oil formulation industry, it is very important to have programs that allow cost optimization, based on the optimal determination of lubricant bases and additives used, guaranteeing compliance with the physical properties of the final product. This work was carried out in a lubricating oil formulation company, with the aim of characterizing and mathematical modeling for the estimation of viscosity in the final product. The results determined that the Arrhenius model was convenient, with deviations in its estimate of less than 3%. The effect of incorporating viscosity improvers (VI) in the base mixtures was studied, observing in this case greater deviations, requiring the incorporation of a correction factor based on the percentage of VI used. Finally, a program was developed to minimize the formulation cost in Excel, using the Solver utility and the Generalized Reduced Gradient (GRG) optimization method. The program was validated in the optimization of 6 commercial products, resulting in savings in formulations of de 6622.41 USD \$ in products formulated in the plant in the year 2022.

Keywords: *Viscosity, Mathematical model, Lubricating oils, Optimization*

Desarrollo de un programa para la optimización económica en la formulación de aceites de motor

Irina León González, MSc¹, Sergio A. Pérez, PhD²

¹Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador, iribleon@espol.edu.ec

²Universidad de Carabobo, Venezuela, sperez@uc.edu.ve

Resumen: *En la industria y sistemas de transporte los aceites lubricantes cumplen un papel fundamental, ya que deben mantener los equipos en buenas condiciones. Para que el aceite cumpla esta función, debe tener una buena viscosidad, por lo tanto, es importante definir bien sus características. En la industria de formulación de aceites lubricantes resulta muy importante disponer de programas que permita la optimización de costos, basados en la determinación óptima de bases lubricante y aditivos utilizados, garantizando el cumplimiento de las propiedades físicas del producto final. El presente trabajo se realizó en una empresa de formulación de aceites lubricantes, con el objetivo de llevar a cabo la caracterización y el modelaje matemático para la estimación de la viscosidad en el producto final. Los resultados determinaron que el modelo de Arrhenius resultó conveniente, con desviaciones en su estimación inferiores al 3%. Se estudió el efecto de incorporar mejoradores de viscosidad (VI) en las mezclas de bases, observándose en este caso mayores desviaciones, siendo necesario la incorporación de un factor de corrección en función del porcentaje de VI utilizado. Finalmente se desarrolló un programa para la minimización del costo de formulación en Excel, utilizando el utilitario Solver y el método de optimización del Gradiente Reducido Generalizado (GRG). El programa fue validado en la optimización de 6 productos comerciales, resultando un ahorro en las formulaciones de 6622.41 USD \$ en productos formulados en planta en el año 2022.*

Palabras Clave: *Viscosidad, Modelo matemático, Aceites lubricantes, Optimización*

I. INTRODUCCIÓN

En las empresas dedicadas a la comercialización de productos de hidrocarburos, especialmente aceites lubricantes para el sector automotor e industrial, es muy frecuente el uso de diferentes bases lubricantes y aditivos que permitan obtener un aceite que funcione bajo presión y altas temperaturas [1].

El proceso de blending consiste en el mezclado de las bases lubricantes a una cierta temperatura y se agregan diferentes aditivos, y durante ese proceso se supervisa como parámetro crítico de calidad del producto final la viscosidad y densidad,

las cuales depende de los componentes y cantidades que se le agreguen, tales como bases refinadas y re-refinadas, aditivos y mejoradores de viscosidad [1,2].

Con el objetivo de predecir la viscosidad final de un aceite lubricante en función de la viscosidad de cada componente y la proporción en la que estos son usados, se han propuestos diferentes modelos matemáticos, entre los más usados se tienen los modelos de Arrhenius, Bingham, Kendall y Monroe, Cragoe, Refutas entre otros. Para la selección del modelo matemático se deben realizar pruebas a nivel de laboratorio con el fin de comparar los resultados y seleccionar el que presente un menor margen de error [3,4,5,6].

Si se considera la gran variedad de bases lubricantes y aditivos utilizados en la formulación de aceites lubricantes, el costo unitario asociado que incide directamente en el costo del producto terminado, y la relación funcional de carácter no lineal existente entre las variables costos y composiciones de componente en una formulación, es factible entonces la implementación de un algoritmo computacional que determine las proporciones óptimas en la formulación de cada variedad de aceite, satisfaciendo así los parámetros de calidad al menor costo posible, basado en los conceptos de optimización por el método de gradiente reducido generalizado (GRG) [7,8,9].

En el proceso de formulación de un modelo de optimización hay que dar los siguientes pasos:

1. Determinación de las variables de decisión. Representan los elementos del sistema a modelar que son controlables por el decisor. En los modelos lineales continuos estas variables toman como valores números reales y se representan por letras con subíndices como se acostumbra a hacer con las variables matemáticas, o literales alusivos a su significado: peso, valor, etc.
2. Determinación de las restricciones. Representan las limitaciones prácticas de determinados recursos o imposiciones físicas de la realidad. Se expresan como ecuaciones e inecuaciones lineales de las variables de decisión.
3. Formulación de la función objetivo. Se trata de la función que mide la calidad de la solución y que hay que optimizar (maximizar un beneficio o minimizar un coste).

En el presente trabajo, a fin de dar respuesta a la siguiente interrogante: ¿Es posible diseñar un algoritmo computacional que facilite la determinación de la composición del aceite con el fin de optimizar los costos de producción manteniendo la calidad dentro de los parámetros establecidos?, se propone el desarrollo de un programa computacional en Excel para la minimización de costos de formulación de diferentes aceites lubricantes comerciales, fabricados por una empresa del ramo, y determinar el modelo matemático más adecuado para predecir la viscosidad

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LEIRD).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LEIRD).
DO NOT REMOVE

final del producto, en función de la composición final del aceite lubricante.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Determinación de modelo para viscosidades

Para la determinación del modelo matemático a utilizar en la determinación de la viscosidad del producto final se realizaron ensayos de laboratorio con mezclas binarias y terciarias, utilizando una base lubricante 250 (B1), una base pesada 600 (B2) y una base ligera (B3) obtenida en el proceso de refinación de aceites usados, proceso existente en la planta donde se realizó el estudio. Adicionalmente se realizaron ensayos para evaluar el efecto de un mejorador de viscosidad (VII) [10,11].

En los ensayos con las mezclas binarias y ternarias se midió la viscosidad a 40 y 100 °C. En los terceros ensayos, se realizaron las mediciones de viscosidad a mezclas binarias, conformada por una base lubricante y mejoradores de viscosidad. Las mediciones de viscosidad se hicieron bajo la Norma ASTM D445, método para la determinación de la viscosidad cinemática de productos líquidos derivados del petróleo, para lo cual se requiere un set de tubos capilares de vidrio graduados y de un baño termostático.

En los ensayos realizados con mezclas binarias y ternarias de bases lubricantes, se utilizaron las composiciones mostradas en las Tablas I y II respectivamente, mientras que las utilizadas para mezclas de la base B3 y VI, son presentadas en la Tabla III.

TABLA I
COMPOSICIÓN DE MEZCLAS BINARIAS

Mezcla	B1 (%)	B2 (%)
M1	50	50
M2	25	75
M3	75	25

TABLA II
COMPOSICIÓN DE MEZCLAS TERNARIAS

Mezcla	B1 (%)	B2 (%)	B3 (%)
M4	33	34	33
M5	20	2,0	60
M6	40	40	20
M7	40	20	40
M8	20	40	40

TABLA III
COMPOSICIÓN DE MEZCLAS BINARIAS DE BASE Y VI

Mezcla	B3 (%)	VII (%)
M9	90	10
M10	85	15
M11	80	20
M12	75	25
M13	70	30

En relación con los modelos matemáticos para la determinación de la viscosidad del producto final (μ_m), se evaluaron aquellos modelos reportados en la literatura que consideren su dependencia con la viscosidad cinemática de cada componente (μ_i) y de su fracción másica (X_i), considerándose en este estudio los modelos de Arrhenius y de Kendall & Monroe, las respectivas ecuaciones son mostradas a continuación.

$$\text{Arrhenius (1887)} \quad \ln \mu_m = \sum_{i=1}^n X_i * \ln \mu_i \quad (1)$$

$$\text{Kendal \& Monroe (1917)} \quad \mu_m = \left(\sum_{i=1}^n X_i * \mu_i^{1/3} \right)^3 \quad (2)$$

A los fines de discriminar el modelo matemático más adecuado, se considera la desviación porcentual entre los valores experimentales y los estimados por los modelos considerados, a través de la ecuación (3).

$$\text{Error Absoluto} = \frac{\text{Abs}(\mu_{\text{experimental}} - \mu_{\text{modelo}})}{\mu_{\text{experimental}}} * 100 \quad (3)$$

B. Optimización de formulación de producto final

En esta etapa del trabajo se realizó la optimización económica de la formulación con 6 diferentes productos, para los cuales ya la empresa había comercializado, y así poder realizar el cálculo del costo de las fórmulas óptimas de los productos. Para ello se dispone de la información del costo por kilogramo de cada componente, las restricciones en cuanto a cantidades específicas de determinados aditivos, restricción en cuanto a la cantidad máxima de VI que se podía agregar a la mezcla, la densidad aproximada del producto y por último las restricciones en cuanto el rango de viscosidad en el cual debía estar la mezcla final.

Para la optimización, determinada por una minimización del costo de formulación, se usó la función Solver de Excel y el método de optimización GRG no lineal. Entre las restricciones de este sistema se tienen: la cantidad máxima de VI es del 15%,

los porcentajes de aditivos se mantienen constantes a lo indicado en la fórmula dada por la empresa y la viscosidad de cada producto debe estar dentro de un rango de calidad definido a partir de los valores históricos de producción.

Para validar los resultados obtenidos en la optimización, se reprodujeron a escala de laboratorio la formulación de 6 productos con la formulación óptima determinada por el programa. Se prepararon 450 g de cada producto, y se midió la viscosidad del producto final a 100°C y la densidad mediante un densímetro con escala graduada desde 0.8 a 0.9 g/ml, confirmando que estos parámetros de calidad se encuentran dentro del rango de calidad exigidos. La Tabla IV presenta los códigos comerciales de los seis productos utilizados en la optimización.

Tabla IV
COMPOSICIÓN DE MEZCLAS BINARIAS DE BASE Y VI

Producto	Código estándar del Producto Final
P1	SAE 40 PREMIUM CF SL
P2	PCMO 20W50 SN R
P3	HDEO 15W40 CI-4 R
P4	PCMO 10W30 SN R
P5	F 90 GL-4 R
P6	HDEO 25W60 CF-4 R

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Discriminación del modelo matemático para estimación de viscosidad en mezclas de bases lubricantes

Con el objetivo de discriminar el modelo matemático más adecuado para estimación de la viscosidad final del producto, se determinó la viscosidad de cada componente que formaría parte del producto final. Los resultados son presentados en la Tabla V.

Tabla V
VISCOSIDAD DE COMPONENTES PUROS

Bases Lubricantes	Viscosidad (Cp)	
	T=40°C	T=100°C
B1	63.44	8.26
B2	115.62	13.8
B3	30.53	5.57
VI1	8300	1202

Como era de esperarse, la viscosidad obtenida para el mejorador de viscosidad VI es alta, puesto que la función principal de estas sustancias es aumentar la viscosidad del producto final. En relación con las bases lubricantes seleccionadas para el estudio, estas poseen una viscosidad muy diferente, de forma que, al mezclarlas en diferentes

proporciones, el producto final presente una determinada viscosidad, en función de la fracción de cada base utilizada. Asimismo, se observa que a una mayor temperatura la viscosidad de las sustancias disminuye.

Para las mezclas binarias evaluadas, los resultados experimentales de viscosidad de las mezclas con diferentes composiciones de las bases B1 y B2 se muestran en la Tabla VI, y los valores de viscosidad calculados a partir de los modelos matemáticos, y sus errores absolutos respectivamente son mostrados en la Tabla VII.

Tabla VI
VISCOSIDAD PARA LAS MEZCLAS BINARIAS

M1			Viscosidad (Cp)	
Base Lubricante	Peso (g)	Fracción en Peso Xi	T=40°C	T=100°C
B1	50.13	0.48	85.3	10.74
B2	52.47	0.51		
Total	102.6	1.00		
M2			Viscosidad (Cp)	
Base Lubricante	Peso (g)	Fracción en Peso Xi	T=40°C	T=100°C
B1	25.4	0.25	99.44	12.23
B2	74.98	0.74		
Total	100.38	1.00		
M3			Viscosidad (Cp)	
Base Lubricante	Peso (g)	Fracción en Peso Xi	T=40°C	T=100°C
B1	75.27	0.74	75.94	9.5
B2	25.59	0.25		
Total	100.86	1.00		

Tabla VII
ERROR PORCENTUAL ABSOLUTO DE MODELOS MATEMATICOS EN MEZCLAS BINARIAS

Modelo	M1	M2	M3	Promedio (%)
Arrhenius	0.01	0.91	0.75	0.56
Kendall & Monroe	1.08	0.80	0.60	0.83

A partir de la Tabla VI se observa que a medida se use una mayor proporción de la base más viscosa (B2), resulta mayor la viscosidad del producto final, independientemente de la temperatura, adicionalmente, si la viscosidad de esta base B2, aunque se encuentre en una proporción menor respecto a B1, tiene una gran influencia en la viscosidad del producto final.

En relación con los modelos evaluados, los resultados de los errores presentados en la Tabla VII indican que los dos modelos propuestos muestran un error menor al 1%, y por lo tanto, para mezclas binarias de bases lubricantes, aun con viscosidades diferentes, ambos modelos tienen una buena capacidad predictiva.

Ahora bien, cuando se incorpora a las mezclas una tercera base a las mezclas, procedente de un proceso de re-refinación de aceites usados, se obtuvieron los resultados para viscosidades mostrados en la Tabla VIII, y tal como se observó para las mezclas binarias, se repite el efecto de la viscosidad de la base lubricante más viscosa (B2) y de su proporción sobre la viscosidad del producto final.

TABLA VIII
VISCOSIDAD DE MEZCLAS TERNARIAS

M4			Viscosidad Cp	
Base Lubricante	Peso (g)	Fracción en Peso Xi	T=40°C	T=100°C
B1	30.15	0.32	60.2	8.6
B2	31.84	0.34		
B3	30.00	0.32		
Total	91.99	1.00		
M5			Viscosidad Cp	
Base Lubricante	Peso (g)	Fracción en Peso Xi	T=40°C	T=100°C
B1	20.13	0.21	45.36	7.2
B2	20.13	0.20		
B3	60.16	0.59		
Total	100.42	1.00		
M6			Viscosidad Cp	
Base Lubricante	Peso (g)	Fracción en Peso Xi	T=40°C	T=100°C
B1	42.86	0.42	68.11	9.33
B2	38.1	0.37		
B3	19.68	0.19		
Total	100.64	1.00		
M7			Viscosidad Cp	
Base Lubricante	Peso (g)	Fracción en Peso Xi	T=40°C	T=100°C
B1	44.79	0.43	50.7	7.72
B2	19.27	0.18		
B3	38.82	0.37		
Total	102.88	1.00		
M8			Viscosidad Cp	
Base Lubricante	Peso (g)	Fracción en Peso Xi	T=40°C	T=100°C
B1	20.46	0.20	58.84	8.5
B2	39.81	0.39		
B3	40.41	0.40		
Total	100.68	1.00		

Respecto a la precisión de los modelos matemáticos considerados en mezclas ternarias de bases lubricantes, los resultados presentados en la Tabla IX indican que el modelo de Arrhenius presenta un menor porcentaje de error. En base a estos resultados, este modelo será utilizado en la etapa de evaluación del efecto de mejoradores de viscosidad VI sobre la viscosidad del producto final.

Los resultados que permiten analizar el efecto del mejorador de viscosidad sobre la capacidad predictiva del modelo de Arrhenius, presentando las desviaciones obtenidas se muestran

en la Tabla X. Se observa que el efecto de incorporar un mejorador de viscosidad a una mezcla de bases lubricantes, el cual tiene una viscosidad elevada, hace que las estimaciones mediante el modelo de Arrhenius resulten con desviaciones elevadas, y que dicha desviación se incrementa con el porcentaje de VI utilizado, además de resultar mucho más crítico a temperaturas bajas.

TABLA IX
ERROR PORCENTUAL ABSOLUTO DE MODELOS MATEMATICOS EN MEZCLAS TERNARIAS

Modelo	M4	M5	M6	M7	M8	Promedio (%)
Arrhenius	0.87	0.42	0.50	1.29	1.60	0.936
Kendall & Monroe	3.16	2.60	2.46	5.65	4.28	3.630

TABLA X
ERROR PORCENTUAL ABSOLUTO DEL MODELO DE ARRHENIUS PARA MEZCLA DE BASE LUBRICANTE B3 Y VI

Modelo de Arrhenius	M9	M10	M11	M12	M13	Promedio (%)
% Error a 40°C	15.21	22.64	21.36	32.19	46.32	27.54
% Error a 100°C	5.64	4.94	10.38	11.00	10.49	8.49

Con la idea de mejorar la capacidad de ajuste del modelo de Arrhenius, en caso de utilizar un mejorador de viscosidad en el aceite lubricante, se incorpora un parámetro de ajuste en función de la fracción en peso del VI y de las temperaturas de control de calidad. Las Figuras 1 y 2 presentan estos resultados

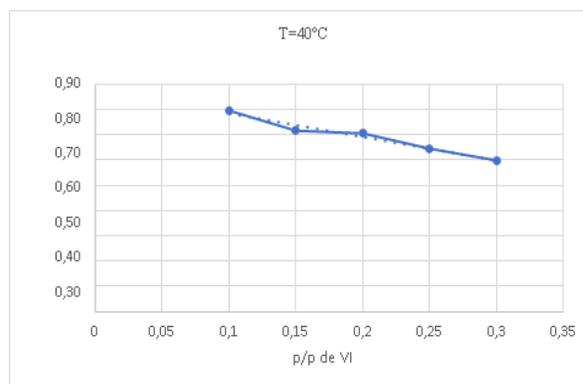


Fig. 1 Parámetro de ajuste para corrección de estimación de modelo de Arrhenius en función de fracción en peso de VI a T=40°C

B. Programa para la optimización de formulación de aceites lubricantes

Se utilizó el programa Excel para generar una hoja de cálculo con la cual se pueda optimizar la formulación de productos considerando diferentes bases lubricantes, mejorador de viscosidad VI y aditivos. Se consideró para la programación utilizar hasta cinco bases lubricantes y diez aditivos, dentro de la hoja de cálculo.

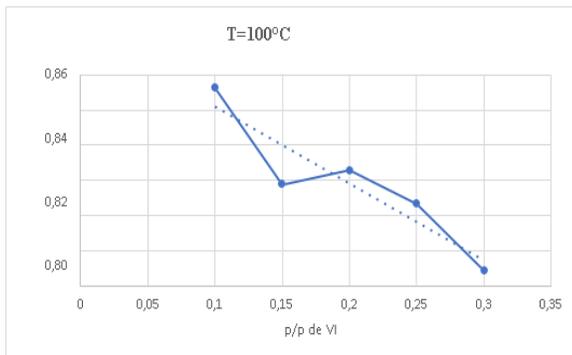


Fig. 2 Parámetro de ajuste para corrección de estimación de modelo de Arrhenius en función de fracción en peso de VI a T=100°C

B.1. Uso del programa para la optimización de formulación de aceites lubricantes

El programa dispone de tres hojas de cálculo, donde la primera presenta las instrucciones de uso, en la segunda están los macros para definición de los datos y resultados de esta hoja de cálculo luego de la optimización y una tercera, donde están las tres bases de datos utilizadas como fuente de información a la segunda hoja de cálculo. La Fig. 3 presenta las indicaciones de uso del programa.

Modo de uso

En la pestaña "Programa" se encuentra el programa de optimización

En la pestaña "Base de datos" se encuentra la base de datos con la cual el programa trabaja

- Selección de productos:

Dando clic izquierdo debajo de la celda "Producto", se mostrará la opción para desplegar una lista con los productos disponibles, al abrir la lista dando clic izquierdo se seleccionará el producto que se desea optimizar. Automáticamente se cargarán los límites de viscosidad.
- Selección de bases:

Dando clic izquierdo debajo de la celda "BASE", se mostrará la opción para desplegar una lista de bases lubricantes, al abrir la lista dando clic izquierdo se seleccionará la base con la que se va a trabajar. Automáticamente se cargarán los valores de viscosidad y costo por cada kilogramo de base.
- Selección de aditivos:

Dando clic izquierdo debajo de la celda "ADITIVO", se mostrará la opción para desplegar una lista de aditivos, al abrir la lista dando clic izquierdo se seleccionará el aditivo con el que se va a trabajar. Automáticamente se cargarán los valores de viscosidad, costo por cada kilogramo de aditivo y porcentaje fijo que debe ir en el producto (restricción).
- Selección de mejorador de viscosidad:

Dando clic izquierdo debajo de la celda "VI", se mostrará la opción para desplegar una lista de aditivos, al abrir la lista dando clic izquierdo se seleccionará el mejorador de viscosidad con el que se va a trabajar. Automáticamente se cargarán los valores de viscosidad, costo por cada kilogramo de mejorador y porcentaje máximo que puede llevar el producto (restricción).
- Correr el programa:

Una vez seleccionados todos los componentes, en los espacios en blanco se debe seccionar la opción "NONE", tanto para bases y aditivos.

Ir a la opción "solver" y dar clic derecho en la opción "Resolver"

En la fila "Porcentaje (P/P%) se muestran los valores de las fracciones másicas optimizadas

En el lado izquierdo de la hoja se observan los valores de la viscosidad de la mezcla y el costo por kilogramo de producto.

Fig. 3 Manual de uso del programa de optimización

Con relación a las bases de datos utilizadas durante la optimización, la Fig. 4 presenta las principales características de estas bases de datos, donde se delimitaron las celdas en las cuales se muestran los valores de viscosidad de cada componente, costo por kg, VI utilizado, límites permitidos de viscosidad y porcentajes máxicos de los aditivos.

En la hoja de cálculo principal se delimitan también las celdas en las que se van a registrar los valores calculados de las fracciones másicas calculadas durante la optimización del producto, la viscosidad teórica de la mezcla calculada por el modelo de Arrhenius, con ajuste en caso de utilizar VI en la formulación. Las Figs. 5 y 6 muestran estas características del programa, como son la hoja de cálculo principal, e interfaz del módulo Solver utilizado en la optimización.

Características de Bases			Características de aditivos				
Base	Costo (\$/kg)	Viscosidad (Cp)	Componente	Costo (\$/kg)	Viscosidad (Cp)	Porcentaje (%)	Fracción
Base Re-refinada 220 R	0.56	5.5675	EEE-VI R	0.84	980	15	0.15
BRIGHT STOCK	0.94	30.68	CC-4000	2.47	135.42	0.8	0.008
BASE OIL 600 GRUPO II	0.86	12.005	CC-4000	2.47	135.42	0.8	0.008
NONE	1000	1	CC-4000	2.47	135.42	0.8	0.008

Productos y límites de viscosidad		
Producto	Límite mínimo de viscosidad (Cp)	Límite máximo de viscosidad (Cp)
F 90 GL-4 R	15	17.96
PCMO 20W50 SN R	18.8	20.02
HDCE 15W40 CI-4 R	13.82	15.15
PCMO 10W30 SN R	11.14	11.28
INDUTO 20W50 JASO MA2 R	18.46	20.52
INDUTO 20W50 CI-4 R	21.91	24.76
SAE-40 PREMIUM CI-4 SL	13.6	15.39
NONE	-	-
Bianco	10	12

Fig. 4 Bases de datos de las propiedades y costos de bases lubricantes, aditivos y límites de viscosidad de productos comerciales

Producto	BASE 1	BASE 2	BASE 3	BASE 4	BASE 5	VI	ADITIVO1	ADITIVO2	ADITIVO3	ADITIVO4
HDCE 15W40 CI-4 R	Base Re-refinada 220 R	BASE OIL 600 GRUPO II	NONE	NONE	NONE	EEE-VI R	CC-4000	NONE	NONE	NONE
COSTO (\$/kg)	0.56	0.86	1000	1000	1000	0.84	3.54	1000	1000	1000
VISCOSIDAD (Cp)	5.5675	12.005		1	1	980	157.6	1	1	1
RESTRICION OPTIMIZACION						0.15	0.1075	0	0	0
FRACCION EN PESO	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.11	0.00	0.00	0.00
Porcentaje (P/P%)	78.62	0.00	0.00	0.00	0.00	10.63	10.75	0.00	0.00	0.00
Límite mínimo de viscosidad (Cp)	13.82									
Límite máximo de viscosidad (Cp)		15.15								
Viscosidad Calculada Modelo (Cp)						13.82				
Costo por kilogramo (\$/kg)										0.910

BASE 1	BASE 2	BASE 3
ase Re-refinada 220 R	BASE OIL 600 GRUPO II	NONE
0.56	Base Re-refinada 220 R	
5.5675	BRIGHT STOCK	
	BASE OIL 600 GRUPO II	
0.79	NONE	

LISTA DESPLEGABLE PARA SELECCION DE COMPONENTES

Fig. 5 Hoja de cálculo principal para selección de componentes en la formulación, presentación de resultados de la optimización

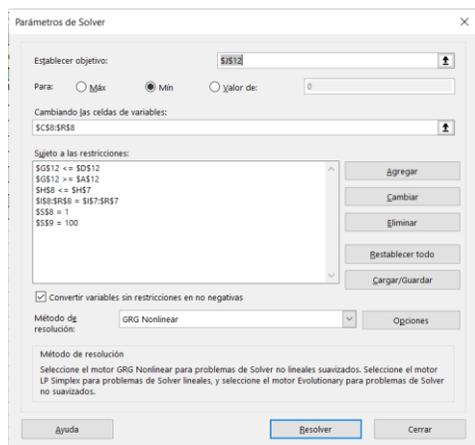


Fig. 6 Parámetros del Solver para la optimización

La Tabla XI presenta los resultados obtenidos para la minimización de los costos de los seis productos comerciales formulados, y utilizados para la validación del programa de optimización.

TABLA XI
RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN DE SEIS PRODUCTOS
COMERCIALES FORMULADOS EN LA EMPRESA DE ESTUDIO

Producto	Costo Actual (\$/kg)	Costo Optimo (\$/kg)	Producción año 2022 (Kg)	Ahorro (\$)
P1	0.95	0.91	26367	1010.51
P2	0.99	0.91	43009	3659.15
P3	0.84	0.80	574	231.37
P4	0.79	0.80	898	-98.71
P5	0.84	0.81	4561	1188.51
P6	0.84	0.82	46463	764.24
Total				6622.41

Al aplicar la optimización en los productos seleccionado para el estudio, se obtuvo que, de haber aplicado esta herramienta de cálculo, se hubiera generado \$ 6622.41 de beneficio adicional solo en los estos seis productos.

IV. CONCLUSIONES

Para mezclas binarias y ternarias de mezclas lubricantes se encontró que la ecuación de Arrhenius presenta una buena precisión en la estimación de la viscosidad final de la mezcla, independientemente de la composición, a las temperaturas estándar de 40°C y 100°C; sin embargo, la incorporación de un mejorador de viscosidad, polímero de alto peso molecular, ocasiona desviaciones elevadas en la estimación de la viscosidad con la ecuación de Arrhenius, por lo que se requiere incorporar un parámetro de ajuste. Se desarrolló un programa en Excel para la minimización del costo de formulación de aceites lubricantes

comerciales, obteniéndose algún ahorro en la evaluación de su aplicación en seis productos utilizados como referencia.

REFERENCIAS

- [1] K. Boadu, O. Joel, D. Essumang, and B. Evbuomwan, "A Review of Methods for Removal of Contaminants in Used Lubricating Oil," *Chem. Sci. Int. J.*, pp. 1–11, Apr. 2019.
- [2] J. Santos, "Recovery of Used Lubricating Oils-A Brief Review," *Prog. Petrochemical Sci.*, vol. 1, Apr. 2018.
- [3] C. Sánchez-Alvarracín, J. Criollo Bravo, D. Albuja-Arias, F. García-Ávila, and M. R. Pelaez-Samaniego, "Characterization of Used Lubricant Oil in a Latin-American Medium-Size City and Analysis of Options for Its Regeneration," *Recycling*, vol. 6, Feb. 2021.
- [4] J. A. Botas, J. Moreno, J. J. Espada, D. P. Serrano, and J. Dufour, "Recycling of used lubricating oil: Evaluation of environmental and energy performance by LCA," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 125, no. July, pp. 315–323, 2017, doi: 10.1016.
- [5] N. Zgheib and H. Takache, "Recycling of used lubricating oil by solvent extraction: experimental results, Aspen Plus simulation and feasibility study," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 23, Jan. 2021.
- [6] L. M. Corredor-Rojas, A. Uribe-Rodríguez, and J. C. Cobos-Gómez, "Monitoring and evaluation of energy use in oil treatment facilities," *DYNA*, vol. 83, no. 198, pp. 142–147, 2016.
- [7] E. Negri *et al.*, "Improving Energy Efficiency In Upstream Facilities ." Mar. 23, 2011.
- [8] F. Zhao, Y. Fan, and S. Zhang, "Assessment of efficiency improvement and emission mitigation potentials in China's petroleum refining industry," *J. Clean. Prod.*, vol. 280, p. 124482, Jan. 2021.
- [9] A. Espinoza and S. Macias, "Evaluación energética del sistema de calentamiento de aceite térmico en una refinería de aceite usado de motor.," p. 83, 2020.
- [10] T. H. Jerome Nichols, "ARR-PATENT-2018-PROCESS.pdf," US 9,957,445 B2, 2018.