



Facultad de Ingeniería

INGENIERÍA INDUSTRIAL

Trabajo de Grado – Segundo Semestre 2019

[191016] Solución digital para la programación de asignación de vehículos para una empresa de transporte de hidrocarburos

Kevin David Benítez Hernández ^{1 a,c}, María José Delgado Castillo ^{2 a,c}, Valentina Infante Vega ^{3 a,c},

Julian David Reyes Rueda ^{b,c}

^aEstudiante de Ingeniería Industrial

^bProfesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Industrial

^cPontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Resumen

In Colombia, oil production is one of the most important economic activities. Within this, operations related to the export of crude oil represent annually revenues of more than 10 billion COP. In the country, hydrocarbons are transported by different methods, such as oil pipelines, gas pipelines, tank trucks or ships. Tank trucks transportation is a logistics link in the distribution, since its function is to transport crude oil from the fields to the pumping stations. For this, there are different companies that provide this service. In Colombia, the costs associated with hydrocarbon transport represents 53% of the costs of the hydrocarbon production chain, which is why the companies in charge of this sector focus on cost efficiency. This paper presents a study of this problem for a hydrocarbon transport company by the development of an application that will carry out the programming of vehicle allocation. Therefore, it will consist on different optimization techniques such as heuristics and metaheuristics to achieve an ideal solution.

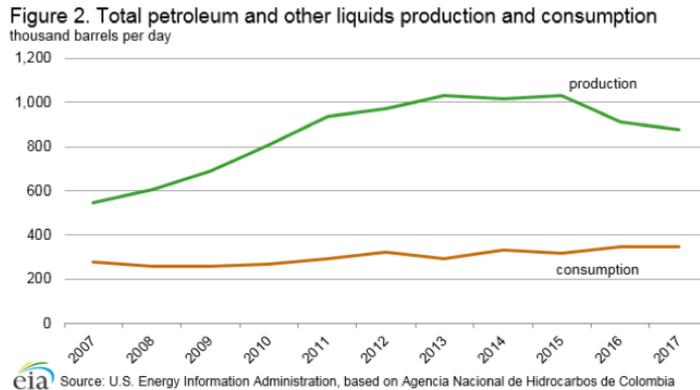
To solve the problem, the nearest neighbor algorithm was selected together with the tabu search (TS) algorithm. This, in order to find the most optimal solution satisfying the requirements and objectives of the company, including equity and reduction of associated costs. Finally, an application was obtained using Visual Basic for Application (VBA), which requires input data from the user for its operation and as a result, prints out the weekly schedule of the vehicles respecting the restrictions and ensuring their feasibility. With this, it is possible to know the status of the truck at any time of the week. As a complement, a diagnosis was made on the use of Information and Technology (IT) in order to promote the use of this type of digital tools in the company on a daily basis.

1. Justificación y planteamiento del problema

El sector minero energético en Colombia ha tenido gran participación en la economía nacional en los últimos años. Sin embargo, debido a la caída de los precios mundiales del petróleo a mediados del 2014, se ha visto afectada la expansión de esta actividad (Ilustración 1). De acuerdo con el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2018), la variación anual del valor agregado de explotación de petróleo crudo, gas natural y las actividades de apoyo para la extracción del petróleo decrecieron en un 1,4% del PIB. A pesar de esto, los datos presentados en el Country Analysis Brief: Colombia de U.S Energy Information Administration (EIA, 2019) establecen que Colombia produce alrededor de 879 mil barriles de crudo al día (bd) ocupando el tercer lugar de los países latinoamericanos líderes en la producción de petróleo después de Venezuela y Brasil. Según el Ministerio de Minas y Energías (2018), para el 2017 se contaban con reservas petroleras que tenían capacidad de 1665 millones de barriles de petróleo (mbls) con una vida media de 5,1 años. Durante ese mismo año se tuvo una producción de 312 mbls, reduciendo la vida media en un 17%. Gracias a exploraciones dirigidas por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), en el año 2018 se

agregaron 429 mbls a la capacidad de pozos petroleros para un total de 1782 mbls, aumentando la vida media a 5,7 años.

Ilustración 1 Producción y Consumo de Petróleo Crudo en Colombia.

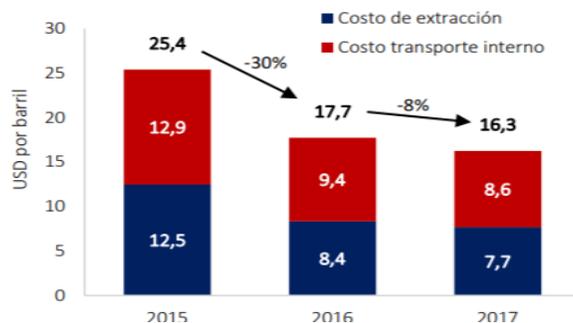


Fuente: (U.S Energy Information Administration, 2019)

El sector de hidrocarburos representa el 70% del sector minero energético. De acuerdo con el Boletín Técnico de exportaciones del DANE, para el 2018 el 27,3% de las exportaciones de Colombia contribuyeron al petróleo, productos derivados del petróleo y productos conexos, siendo este el principal activo de exportación del país. La cadena productiva de los hidrocarburos está compuesta por seis partes: etapa de exploración sísmica, etapa de perforación exploratoria, etapa de producción, etapa de refinación, etapa de transporte y la etapa de comercialización (Anexo 1). El transporte del sector de hidrocarburos en Colombia se realiza mediante cuatro modalidades: oleoducto, gasoductos, carrotaques y buques. Esta etapa consiste en transportar los hidrocarburos desde el pozo hasta los sitios de almacenamiento y procesamiento. Esta actividad se realiza mediante empresas cuya responsabilidad es expedir certificados para el trámite y obtención de las guías de transporte de crudo del Ministerio de Minas y Energía.

Para el 2017, según la Asociación Colombiana de Petróleo (2018), el costo de operación promedio para la producción de petróleo en Colombia fue de 16,3 USD por barril. De ellos, USD 7,7 / bl son costos de extracción y USD 8,6 / bl de transporte desde el campo hasta el punto de exportación o refinación (Ilustración 2). El costo de transporte representa el 53% de los costos de operación disminuyendo en un 8% con respecto al costo del 2016. Según Jonathan Malagón (2016) la red de oleoductos es el principal medio de transporte de hidrocarburos, gracias a sus bajos costos. Además, añade que las conexiones por carretera son necesarias a la hora de transportar crudo desde los pozos hasta las estaciones de bombeo. De acuerdo con La República, en el año 2019 el precio promedio del barril de petróleo se mantuvo entre los USD 60 y USD 70 respectivamente favoreciendo a las grandes compañías que operan en esta industria.

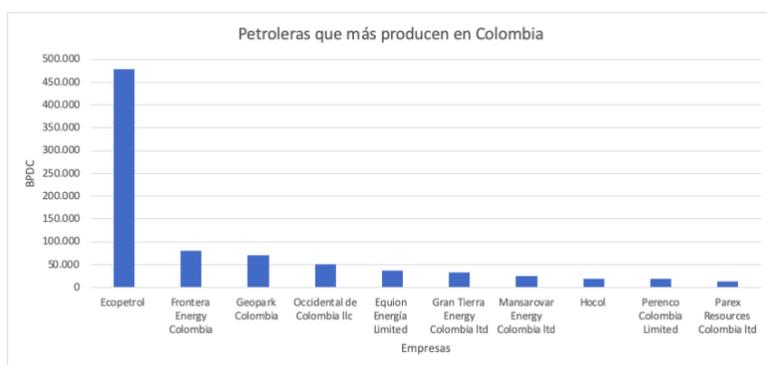
Ilustración 2 Costos de operación en Colombia.



Fuente: Asociación Colombiana del Petróleo

La empresa sin ánimo de lucro Cootranskilili ubicada en Puerto Asís, Putumayo, ofrece servicios de logística internacional para el transporte de petróleo crudo por carrotaques desde el yacimiento hasta el sitio de distribución. La empresa está compuesta por 32 socios y 125 carrotaques de dos y tres ejes con capacidad de 250 y 280 barriles (1 barril = 159 litros = 42 galones) (Anexo 2). Cootranskilili brinda el servicio de transporte de crudo para las operadoras Gran Tierra Energy Colombia LTD y Vetra Exploración y Producción S.A.S. De acuerdo con las estadísticas de la República (2019) la empresa Gran Tierra produjo alrededor de 32,000 barriles promedio por día calendario (bpdc) siendo ésta una de las operadoras con mayor participación en la producción de petróleo crudo en Colombia, mientras que Vetra produjo aproximadamente 2,000 bpdc.

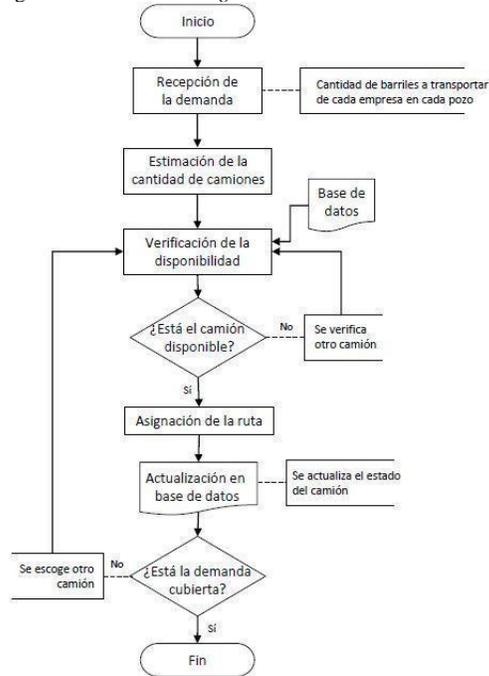
Ilustración 3. Diagrama Barriles Producidos por día Calendario de las principales Operadoras en Colombia 2019



Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos en Colombia. Elaboración: Propia

El sistema de transporte de la empresa Cootranskilili comprende el traslado del petróleo crudo desde los pozos Cohembi, Quinde, Cumplidor, Nancy, Quillacinga y Santana, ubicados en el departamento de Putumayo, hasta el Oleoductos de Crudos Pesados Ecuador (OCP Ecuador). Las cifras del DANE (2018) establecen que el 4,4% de las exportaciones de crudo de Colombia tienen como destino Ecuador, representando una participación en el mercado de 0,5% del petróleo crudo exportado. En el año 2018 Cootranskilili transportó más de 1,222,500 barriles de crudo hacia Ecuador, es decir, 4,890 viajes durante el año. El proceso de logística de transporte de Cootranskilili se basa en la asignación de carrotaques a cada pozo, de acuerdo con la cantidad de petróleo crudo requerido a transportar por cada una de las operadoras. Este proceso se realiza mediante las etapas de recepción de demanda, revisión de disponibilidad de carrotaques y asignación de vehículos para cada pozo.

Diagrama 1. Proceso de asignación de camiones de Cootranskilili



Fuente: Propia

El desarrollo de la asignación de vehículos inicia con la demanda semanal de barriles a transportar, requeridos por las operadoras Vetra y Gran Tierra desde los pozos hasta el OCP Ecuador. Acorde a las estadísticas de Cootranskilili, Gran Tierra demanda semanalmente alrededor de 16,250 barriles de crudo, es decir 65 vehículos y Vetra, alrededor de 8,750 barriles de crudo o 35 vehículos. De acuerdo con la demanda de los clientes, Cootranskilili estima la cantidad de vehículos necesarios para satisfacer los requerimientos. La empresa cuenta con 95 tractocamiones propios y 30 tractocamiones de afiliados ecuatorianos que pueden conducirse a una velocidad máxima de 40 km/h. Por políticas de la empresa, el 40% de la participación de tractocamiones por viaje debe ser de origen ecuatoriano.

Para la asignación de vehículos a cada pozo se revisa la base de datos por medio de un código de identificación, el cual contiene información de cada tractocamión, tal como: placa, nombre y cédula del conductor, número de chasis, estado del vehículo, entre otros. Se verifica la disponibilidad de los vehículos y se realiza la asignación dando prioridad a los pozos Santana y Quinde, puesto que son los más cercanos al parqueadero automotriz de la empresa. Se estima una distancia máxima de 188.57 km, teniendo en cuenta la relación de distancia entre el parqueadero automotriz, los pozos y el OCP. Se informa al conductor del tractocamión la ruta asignada y se actualiza la base de datos para la asignación posterior. Los tractocamiones se encuentran disponibles nuevamente cuando es terminado el viaje o se encuentran ubicados en el parqueadero de la empresa. Al final de cada mes se realiza un reporte a los socios sobre la cantidad de viajes realizados por cada camión y su respectiva ruta. Por políticas de la empresa, al final de cada mes se espera que los tractocamiones tengan la misma cantidad de viajes, con el fin de garantizar que las utilidades de los socios sean proporcionales a la cantidad de vehículos que poseen.

En la empresa Cootranskilili se evidencia una inequidad en el proceso de asignación de los vehículos. Durante el año 2018, se comprobó que el 34% de los camiones no cumplen con la media de viajes por año, representando alrededor de \$35.000.000 COP de inequidad entre los socios. Actualmente la empresa no tiene una planeación adecuada para el proceso de asignación. Esto se debe

a que se realiza la asignación diaria y no se contempla un horizonte de planeación apropiado. Así mismo, los datos no son generados automáticamente, es decir, no cuentan con la tecnología adecuada para el manejo y el almacenamiento de la información. Adicionalmente, existen falencias en la estandarización del proceso, puesto que no existe un control sobre los mantenimientos de los vehículos, incrementando el número de reprocesos. En el último año se reportaron 24 reprocesos que equivalen a \$19.000.000 COP de pérdidas anuales para la empresa. Esto se debe a que muchos vehículos no cumplen con el reglamento de las operadoras. Por consiguiente, Cootranskilili debe enviar un nuevo vehículo afectando los costos de calidad o ese viaje se pierde. Por la caída del precio del petróleo la empresa se enfoca en la eficiencia de los costos para maximizar sus utilidades. Por lo tanto, se requiere de una herramienta digital que apoye el proceso de planeación para cumplir con los objetivos de la empresa.

Por lo anterior, es necesario realizar un diseño que dé respuesta a la siguiente pregunta de investigación: ¿qué herramienta tecnológica digital puede ser utilizada para mejorar la programación de vehículos en una empresa de logística para el transporte de hidrocarburos y cómo asegurar que este tipo de tecnologías se realicen de manera continua en la organización?

2. Antecedentes

En la actualidad, Mora (2018) establece que el costo de la gestión de transporte en una empresa representa alrededor del 40% de los costos logísticos, siendo este uno de los elementos más dispendioso dentro de la cadena de suministro. Esto ha llevado a la implementación de diferentes herramientas de planeación que permiten optimizar la cadena de suministro de una empresa, con el fin de mejorar la gestión de los materiales. Estas herramientas utilizan técnicas matemáticas y modelos heurísticos para asignar recursos limitados a las actividades que se deben desarrollar.

- **Heurísticas y Metaheurísticas**

Los modelos heurísticos son algoritmos que buscan evaluar los posibles estados desde un nodo hasta el objetivo, con el fin de obtener el estado óptimo y conveniente. La optimización del potencial total utilizando algoritmos metaheurísticos (TPO/MA) es uno de los métodos más eficientes para resolver problemas no lineales cuyas capacidades son más avanzadas para problemas con restricciones limitadas y con múltiples soluciones. De acuerdo con Siarry (2013), el método TPO/MA es mucho más ventajoso que los métodos clásicos. Esto abarca problemas con características no lineales, geoméricamente no lineales y soluciones múltiples, que pueden abordarse simplemente introduciendo en la formulación de características las restricciones necesarias. Los modelos metaheurísticos toman menos tiempo de cómputo y son insensibles a los datos de problemas. Por lo tanto, sus aplicaciones son más confiables para los problemas de programación de mayor tamaño. Las metaheurísticas llevan a cabo una búsqueda más minuciosa en el espacio de soluciones y es menos probable que termine en un óptimo local. Estas pueden ser divididas en tres grandes grupos: búsqueda local (Búsqueda Tabú), búsqueda basada en poblaciones (algoritmos genéticos y procedimientos de memoria adaptativa) y mecanismos de aprendizaje (redes neuronales y colonia de hormigas).

- **Algoritmo Búsqueda Tabú**

La técnica Búsqueda Tabú en la actualidad es considerada como una de las mejores heurísticas para solucionar problemas de optimización combinatoria, gracias a los resultados que han reportado muchos autores (Glover y Laguna, 1997). Es muy importante debido a que combina diferentes procedimientos heurísticos de búsqueda local con la utilización inteligente de memoria. Estos elementos combinados con diferentes estrategias, tales como intensificación y diversificación, permiten “escapar” de óptimos locales y así explorar distintas regiones del espacio de soluciones.

Segun Youssef (1999), la busqueda tabu es una de las técnicas más antiguas y, aunque sea un algoritmo simple, funciona bien con variedades de problemas tipo NP-Hard. Esta técnica se puede utilizar como un algoritmo determinístico o como un algoritmo estocástico. Los algoritmos determinísticos son aquellos que llegan a la solución final a través de decisiones determinísticas, por lo que en distintas ejecuciones con los mismos datos para un mismo problema siempre llevan a la misma solución. Por lo contrario, los algoritmos estocásticos crean la solución con base en decisiones aleatorias que dan lugar a distintas soluciones si se corre varias veces. Por lo tanto, la Búsqueda Tabú es un método basado en un algoritmo iterativo, en donde parte de una solución inicial, la cual se modifica para llegar a una solución que mejora la función de coste. En algunas ocasiones se empieza a partir de una solución inicial aleatoria, mientras que en otras veces se genera una solución mediante alguna técnica heurística para alimentar al método de la Búsqueda Tabú.

- **Planeación y programación**

La planeación es un proceso que permite fijar una serie de pasos que se deben seguir para cumplir con una meta establecida y mejorar el manejo de los materiales de una organización. De acuerdo con Khodr (2012), varios estudios han demostrado que la coordinación adecuada del material y el flujo de información financiera conduce a una mayor eficiencia y reducción de los niveles de inventario. Es decir, una coordinación adecuada mejora las funciones de adquisición, producción, distribución y ventas. Existen tres tipos de planeación: planeación estratégica, planeación táctica y planeación operativa. La primera hace referencia a una planeación a largo plazo, cuyo objetivo es establecer la ubicación de las instalaciones, las inversiones en la planta o el capital. La planeación táctica hace referencia a una planeación a mediano plazo, por lo general mensualmente. Esta planeación se relaciona con la optimización del flujo de bienes, tales como la asignación de objetos de producción y el transporte desde las instalaciones a los centros de distribución. La planeación operativa es la planeación a corto plazo, es decir, es la planeación diaria que se encarga de la producción y los temas de inventario en el entorno interno de la empresa.

Además de la planeación de producción de bienes, existe la planeación de distribución o de transporte de bienes, en la cual es de vital importancia la toma de decisiones con respecto a rutas, cantidad de productos a enviar, costos mínimos, cantidad de vehículos, entre otros. Con el pasar del tiempo se ha evidenciado un problema en la planeación de enrutamiento de vehículos. De acuerdo con Cordeau, Laporte, Savelsbergh, & Vigo (2007) el problema de ruteo de vehículos se centra principalmente en la gestión de la distribución. Miles de empresas se enfrentan diariamente a la entrega o recolección de bienes con objetivos y restricciones altamente variables debido a que las condiciones de las empresas varían de una configuración a otra. El problema de enrutamiento de vehículos (VRP) es uno de los aspectos más populares en la optimización combinatoria. Su estudio ha logrado proponer formulaciones sólidas, algoritmos de descomposición exactos, numerosas heurísticas y metaheurísticas, permitiendo un mejoramiento continuo en la operación.

Por último, la programación de procesos, al igual que la planeación, es un proceso de toma de decisiones para determinar cuándo, dónde y cómo se va a producir un producto de acuerdo con el horizonte de tiempo establecido. Se han desarrollado modelos de simulación para abarcar los problemas de planeación y programación. El Sistema Multi-Agente (MAS) es uno de los modelos más populares para respaldar la toma de decisiones en la cadena de suministro. El MAS intercambia la información y la relación individual entre los agentes de la cadena para obtener mejores soluciones. Khold (2012) afirma que el Sistema Multi-Agente demuestra de manera eficiente y en tiempo real el comportamiento proactivo y autónomo de los agentes participantes para mitigar los riesgos y rectificar las interrupciones en la cadena de suministro. El modelo MAS une diferentes agentes autónomos para reconocer y resolver problemas en las organizaciones a través del monitoreo de las acciones.

- **Optimización de Transporte**

Optimización se conoce como la búsqueda de resultados más eficaces a través de la utilización de pocos recursos. En cuanto a la optimización del transporte de carga, según Li, Xuan, Yang & Wang (2018), se divide en 3 grupos: administración de la flota, modelamiento de rutas de transporte y optimización de operaciones de cargue y descargue. Sobre estas etapas del transporte se han realizado diferentes investigaciones. Li, Xu, Xuan & Xu (2017) desarrollaron una programación dinámica de vehículos para una red de servicios con demandas mínimas y máximas, en donde relacionaron decisiones de dimensionamiento de la flota con las asignaciones de vehículos. El modelo pretende optimizar el rendimiento de la red de transporte en todo el horizonte de planeación. Además, Han, Lee & Park (2013) consideraron un problema de ruteo con tiempos de viaje desconocidos, donde se desarrolló un enfoque de programación estocástica. Se obtuvieron diferentes rangos de tiempo de viaje, los cuales se utilizaron para identificar las rutas con el menor costo. También para la optimización de las operaciones de cargue y descargue Benavent, Landete, Mota & Tirado (2015) desarrollaron un modelo con múltiples restricciones, conocido como LIFO, dentro de las cuales existen tiempos límites de cargue.

- **Transformación Industrial**

En los últimos años se ha evidenciado que la información y la tecnología han evolucionado en el sector industrial incorporando nuevos usos de automatización y conectividad en las organizaciones. Lo anterior se conoce como la industria 4.0 o la cuarta revolución industrial, que hace referencia al uso de las tecnologías en los procesos industriales para mayor adaptabilidad, flexibilidad, eficiencia y mejora continua (Anexo 3). Como lo señala Rodríguez & Mancilla (2018), la industria 4.0 se basa en tres pilares: manufactura inteligente, internet de las cosas y manufactura en la nube. La manufactura inteligente se caracteriza por ser flexible, automática y reconfigurable, utilizando herramientas digitales, tales como: big data, robots, sensores, entre otros. Por otro lado, el internet de las cosas hace referencia a la conexión de diferentes elementos mediante dispositivos digitales para la obtención de datos en tiempo real y para la toma de decisiones. Por último, la manufactura en la nube consiste en el uso de computación y la comunicación en red para diseñar, fabricar, programar y simular. Esto permite manejar eficientemente los recursos de la organización. La importancia de la transformación de las empresas actuales a industrial 4.0 radica en la generación de procesos más productivos a menores costos y el aumento de la eficiencia, de esta manera, se logra crear un factor diferenciador frente al entorno competitivo.

De acuerdo con lo nombrado anteriormente, existen diferentes herramientas que permiten mejorar la planeación y asignación de vehículos para una empresa en el área de logística para el transporte de hidrocarburos. Algunas de estas herramientas son: las heurísticas, metaheurísticas, planeación, programación, asignación y optimización en los procesos de cargue y descargue. En cuanto a la solución de la problemática de la empresa Cootranskilili con respecto a la planeación de vehículos, es importante comenzar con una planeación táctica para contemplar un horizonte amplio. Además, implementar un modelo de programación por medio del uso de heurísticas y metaheurísticas con el objetivo de optimizar los recursos y generar mayor utilidad para la empresa, reduciendo los costos asociados. Con respecto al uso de los sistemas de tecnología, es importante tener en cuenta las características de la industria 4.0 para que las herramientas tecnológicas se consoliden en la empresa y puedan establecer una mejora continua en la organización.

3. Objetivos

Realizar el diseño de una solución digital para la programación de vehículos de una empresa de transporte de hidrocarburos con el fin de minimizar los costos asociados, garantizando equidad en

la asignación de turnos, y proponer herramientas para la apropiación tecnológica de este tipo de soluciones en la organización.

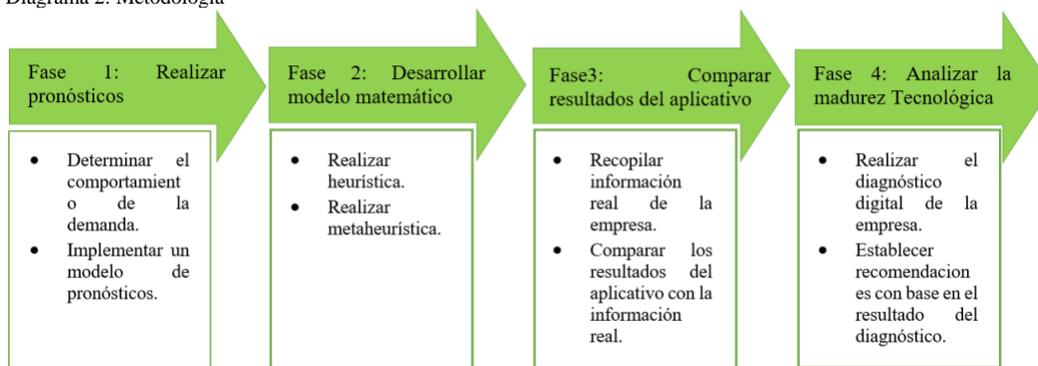
Objetivos Específicos

- Desarrollar un modelo de pronósticos de la demanda que permita realizar la programación de vehículos en la empresa.
- Diseñar e implementar un modelo matemático de optimización para la programación de asignación de vehículos de transporte de una empresa de hidrocarburos que minimice los costos asociados.
- Evaluar el impacto de la programación resultante del modelo matemático, implementado en comparación a la programación actual que realiza la empresa.
- Analizar la madurez tecnológica de la empresa y proponer herramientas para la implementación de este tipo de soluciones que soporten la toma de decisiones.

4. Metodología

La metodología se llevó a cabo mediante el desarrollo de cuatro fases, las cuales son necesarias para cumplir los objetivos específicos. En la primera fase se desarrollaron los pronósticos de los barriles de crudo a transportar de cada nodo (Cohembi, Quinde, Cumplidor, Nancy, Quillacinga y Santana) en cada día, durante una semana. Esto se realizó por medio de la recopilación de información con el fin de determinar el modelo de pronósticos que mejor se adaptara al comportamiento de los datos recopilados. Con base en los pronósticos se realizó la segunda fase, la cual hace referencia a la solución digital para la programación de asignación de vehículos de la empresa mediante el uso de una heurística, con el fin de mejorar este proceso, reduciendo los costos asociados. Adicionalmente, se implementó una metaheurística para mejorar el resultado obtenido anteriormente. En consecuencia, en la tercera fase se realizó la comparación de los resultados de los costos obtenidos del aplicativo con respecto a los datos otorgados por la empresa. Finalmente, en la cuarta fase se realizó un diagnóstico de la madurez tecnológica de la empresa, con el fin de proponer la implementación de este tipo de tecnologías para apoyar la toma de decisiones. A continuación se presenta el resumen de la metodología:

Diagrama 2: Metodología



Fuente: Propia

4.1 Pronóstico de demanda

Con el fin de seleccionar el modelo de pronósticos que se adapta a las demandas en barriles de crudo diarios durante una semana de cada pozo, se llevó a cabo los siguientes pasos:

1. Se solicitó a la empresa la demanda diaria de cada pozo del año 2018.
2. Se identificaron las variables dependientes e independientes, siendo la variable independiente los días de la semana y la variable dependiente la demanda de barriles de crudo de cada pozo.
3. Se realizó una gráfica (días vs. demanda) por cada pozo, para determinar si es una serie estacionaria, con tendencia o estacional.
4. Utilizando una macro en Excel se selecciona el método de pronóstico que más se ajusta al comportamiento de la demanda de cada pozo en el tiempo. Es importante resaltar que dependiendo de las características de la gráfica existen diferentes métodos. Con respecto a las series con tendencia, existen los modelos conocidos como regresión lineal y Suavización Exponencial Doble (Holt). Por otro lado, para las series estacionarias existen los métodos basados en promedios tales como: promedio simple, promedio móvil y promedio móvil ponderado, así como el método de Suavización Exponencial Simple (SES). Finalmente, para las series estacionales existe el método conocido como Suavización Exponencial Triple (SET o Winters). Para desarrollar la macro, de acuerdo con las gráficas, se formularon y programaron los modelos de pronóstico de series con tendencia (Holt) y estacionarias (SES).
5. Por medio de la macro se determinan los parámetros de los dos modelos de pronóstico seleccionados con el objetivo de minimizar el error porcentual absoluto (MAPE). [Se trabajó con el MAPE dado que es un indicador que presenta la desviación absoluta de los valores en forma porcentual y no en unidades como las demás medidas de error \(Error cuadrático medio \(MSE\), Error medio \(ME\), Error medio absoluto \(MAD\) y Desviación Estándar\). El error porcentual absoluto al igual que el error cuadrático medio son los indicadores mas usados en los modelos de pronósticos, sin embargo, el MSE maximiza el error dado que en su ecuación se eleva al cuadrado el error alterando aquellos periodos donde la diferencia es mas significativa, mientras que el MAPE involucra todos los valores y los compara con la demanda real siendo un error mas exacto.](#)
6. De acuerdo con el MAPE, la herramienta determina cuál de los dos modelos presenta un menor error porcentual con respecto a los datos reales.
7. Se realiza el pronóstico diario de acuerdo con el modelo seleccionado por la macro durante una semana para cada pozo.

Adicionalmente, la herramienta permite el ingreso de nuevas demandas con el fin de actualizar y mejorar los pronósticos. Esta macro se encuentra integrada con el aplicativo digital desarrollado para la planeación y asignación de vehículos para la empresa Cootranskilili. Los pronósticos obtenidos son un parámetro de entrada para la ejecución del modelo matemático.

4.2 Modelo Matemático

En la fase dos se desarrolló el modelo matemático a partir de una heurística y metaheurística para encontrar la mejor solución. La solución obtenida de la heurística es el dato de entrada para el desarrollo de la metaheurística. A continuación se presenta un resumen de la formulación matemática del modelo.

Tabla 1: Modelo Matemático

Conjuntos	K: Camiones J: Pozos X: Socios I: Horas
Variabes	<ul style="list-style-type: none"> • C_{kji}: Cantidad de camiones k a asignar al pozo j la hora i • B_{kji}: 1 Si el camión k visita el pozo j en la hora i; 0 dlc • KIL_{ki}: Kilometraje del camión k en la hora i • Num_{kjt}: Cantidad de barriles que transporta el camión k del pozo j al pozo t en la hora i • Man_{ik}: Si en la hora i se le debe realizar mantenimiento al camión k
Función Objetivo	Minimizar: Costos de mantenimiento aceite + Costo de mantenimiento llantas + Costos de hora de espera para cargar + Costos de hora de espera para descargar + Costos hora de espera franja + Costos de inequidad + Costos de capacidad de carga + Costos de viáticos

Parámetros	<ul style="list-style-type: none"> • Cap_k: Capacidad del camión k • VP: Velocidad promedio • Dis_{jt}: Distancia entre pozo a pozo • NV_i: Número de Viajes del camión i • E_i: Estado del camión i • $T1_i$: Tiempo de cargue en el pozo • $T2_1$: Tiempo de descargue en OCP • Costo por viajar de pozo a pozo • $C1$: Costo por mantenimiento aceite • $C2$: Costo por mantenimiento llantas • $C3$: Costo hora de espera en pozo • $C4$: Costo hora de hora de espera en OCP • $C5$: Costo de espera por franja horaria • $C6$: Costo por transportar menos crudo de su capacidad máxima • $C7$: Costos por viáticos • $C8$: Costos por consumo de gasolina
Restricciones	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad: El camión k debe ir cargado mínimo con el 50% de la capacidad total. • Franja horaria: Si el camión k llega al pozo j después de las 5pm, sale del pozo j a las 7 am del día siguiente. • Bahías de cargue y descargue: Si camión k llega al pozo j y las bahías se encuentran ocupadas, asignar horas de espera al camión k. • Mantenimiento: Si el camión k en la hora i se encuentra en mantenimiento, no puede ser asignado ese día.

Fuente: Propia

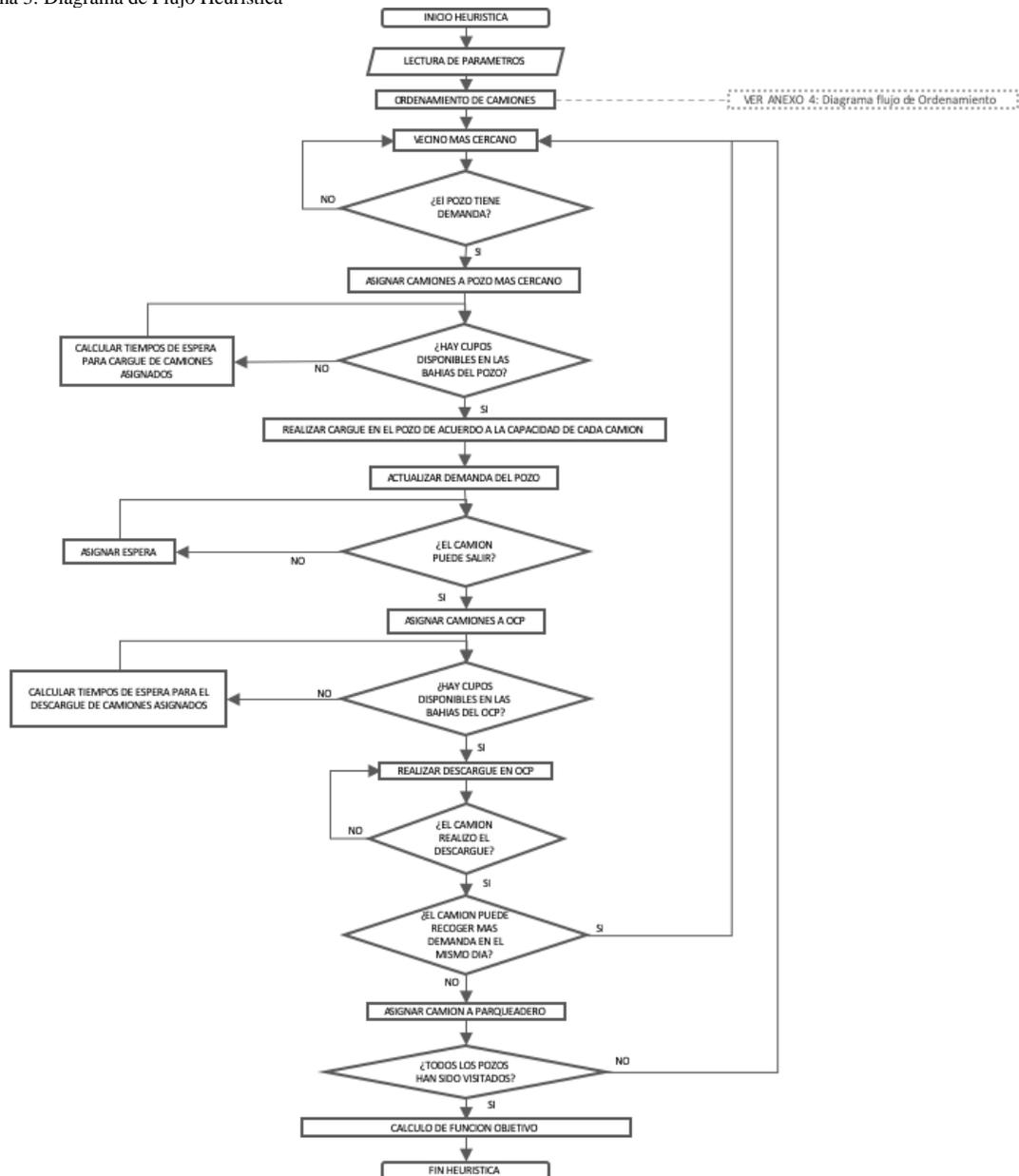
Con el objetivo de acercarnos a la realidad se establecieron los siguientes supuestos:

- Los tiempos de espera en los pozos son determinísticos, ya que sólo se contemplan los vehículos de la empresa.
- De acuerdo con la información brindada por la empresa se establecen horarios en los pozos de cargue (franja horaria). Es decir, el pozo se encuentra abierto desde las 5:00 AM hasta las 6:00 PM. Los camiones que lleguen después de las 6:00 PM incurren en un tiempo de espera para salir.
- El aplicativo se programó para un problema genérico sin tener en cuenta modelos predefinidos (Job Shop, FIFO, etc.).

4.2.1 Heurística

El diagrama 3 representa la solución gráfica de la heurística desarrollada para dar solución al problema evidenciado en la empresa. Se utilizó la heurística vecino más cercano debido a que reduce las distancias entre nodos y los costos asociados. Este algoritmo consiste en construir la ruta más corta y conocer el primer pozo a atender, respetando las restricciones y asegurando factibilidad en el resultado. Adicionalmente, se realizó un ordenamiento de los vehículos para conocer cuál debe ser asignado primero.

Diagrama 3: Diagrama de Flujo Heurística



Fuente: Propia

Por otro lado, en la ilustración 4 se desarrolla un pseudocódigo con el fin de dar a conocer un resumen de las actividades que realiza la heurística para encontrar una solución factible al problema planteado. A continuación, se muestra el pseudocódigo.

Ilustración 4: Pseudocódigo Heurística

```

Leer parámetros de entrada
Para i = 1 hasta total días
Realizar Ordenamiento de camiones
Para k=1 hasta total camiones
  Si la distancia del camión k > distancia de mantenimiento Entonces
    Asignar camiones a mantenimiento
  Sino
    Si camión k el día i en la hora de salida está en Parqueadero y hay demanda en el
    pozo más cercano Entonces
      Asignar camión k al pozo más cercano
      Asignar tiempos de espera para cargue
      Cargar la demanda del pozo al camión k
      Evaluar franja horaria
        Si hora de salida esta entre 5am y 6pm Entonces
          Asignar hora de salida 5am
        Sino
          Asignar hora finalización carga
          Asignar viaje a OCP
          Actualizar hora de llegada a OCP

    Mientras hora de llegada a OCP <= 5pm
      Asignar camión k al pozo más cercano
      Asignar tiempos de espera para cargue
      Cargar la demanda del pozo al camión k
      Evaluar franja horaria
        Si hora de salida esta entre 5am y 6pm Entonces
          Asignar hora de salida 5am
        Sino
          Asignar hora finalización carga
          Asignar viaje a OCP
          Asignar tiempos de espera para descargue
          Actualizar hora de llegada a OCP
          Asignar camión k a parqueadero

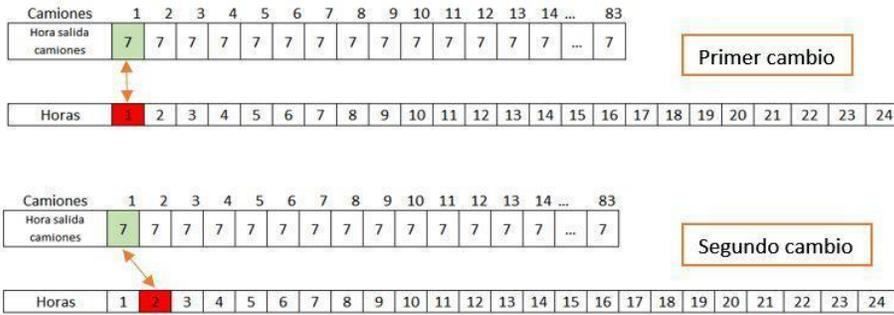
Siguiente camión
Siguiente día
  
```

Fuente: Propia

4.2.2. Metaheurística

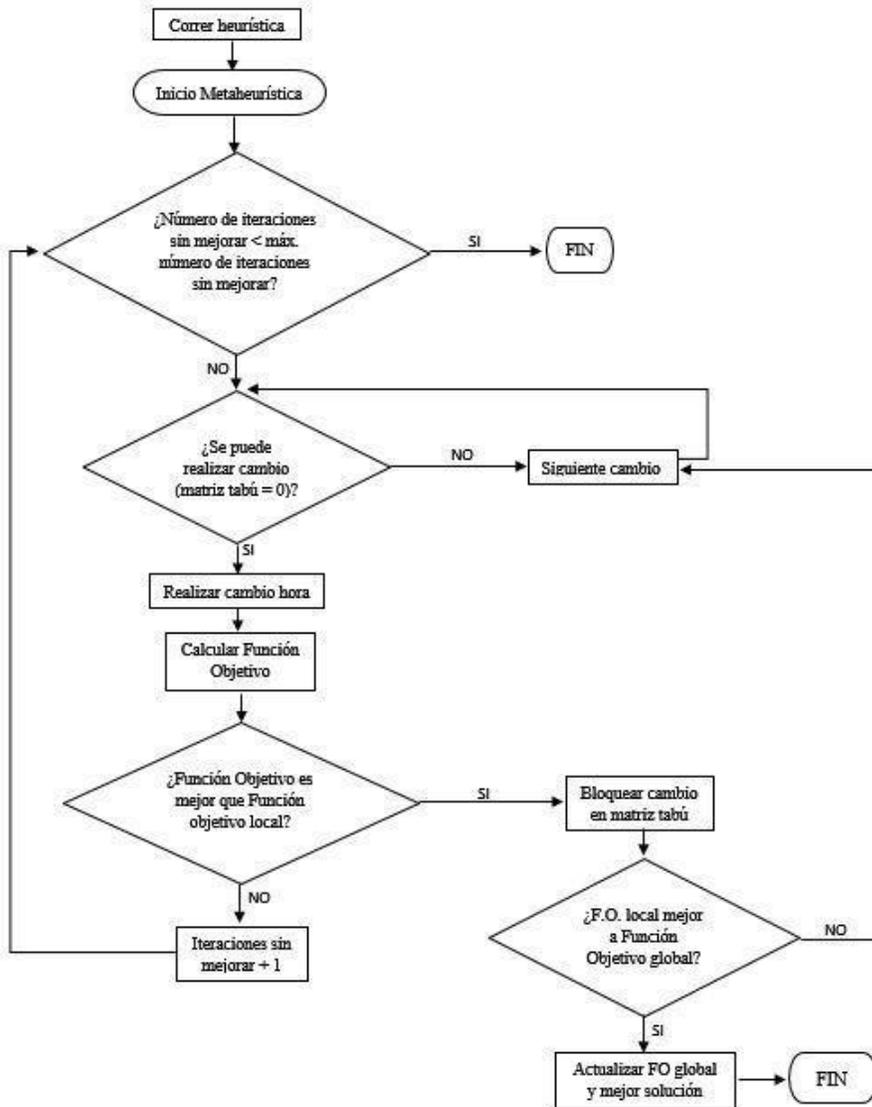
Para la selección de la metaheurística se tuvo en cuenta la literatura donde se evidencia que para la resolución de este tipo de problemas se pueden utilizar diferentes metodologías. De acuerdo con Glover y Laguna (1997) una de las mejores soluciones para los problemas combinatorios es el algoritmo Búsqueda Tabú, ya que es compatible con problemas NP-Hard y permite mejorar una solución aún más ya que no es poblacional sino trayectorial. Por otro lado, el Tabú se utiliza para dos objetivos, intensificación y diversificación. La primera busca encontrar una solución y mejorarla, mientras que la diversificación explora movimientos factibles dentro de espacios prometedores para no caer en óptimos locales. El vecindario dentro de la metaheurística se construyó a través de cambios en las horas de salida de cada vehículo. A continuación, se presenta de manera gráfica los movimientos y su respectivo diagrama de flujo:

Ilustración 5: Cambios algoritmo Búsqueda Tabú



Fuente: Propia

Diagrama 5: Diagrama de flujo metaheurística



Fuente: Propia

Adicionalmente, se presenta un pseudocódigo por medio del cual se brinda un resumen de las actividades que realiza el algoritmo Búsqueda Tabú para encontrar una mejor solución a la que se tiene actualmente.

Ilustración 6: Pseudocódigo metaheurística

```

Mejor solución = solución actual
F.O_optima = F.O_actual
Hacer
    Cambio hora de salida camión k
    Calcular F.O local
    Si función objetivo < que F.O_actual Entonces
        F.O local = función objetivo
        Bloquear mejor cambio
        Si función objetivo < función optima Entonces
            F.O_optima = F.O_actual
            Solución óptima = solución actual
Mientras
    Numero de iteraciones < máx. número de iteraciones sin mejorar.

```

Fuente: Propia

Finalmente, la búsqueda de la mejor función objetivo corresponde a aquella en la que se reduzca los costos asociados a la operación.

4.3 Comparación de resultados

Para la comparación de la situación actual de la empresa contra los resultados obtenidos por los dos modelos aplicados, se consideraron los siguientes indicadores: inequidad, reprocesos, horas de espera y función objetivo.

- **Inequidad:** Este indicador se calculó de la siguiente manera

$$\text{Media de viajes} = \# \text{ total de viajes} / \# \text{ número de camiones}$$

$$\% \text{ inequidad} = \# \text{ de camiones por encima y por debajo de la media} / \# \text{ número de camiones}$$

La inequidad representa el porcentaje de camiones que no cumplen con la media de los viajes. Sin embargo, existen otros indicadores de medida de desigualdad como por ejemplo el coeficiente de Gini. Según Jancewicz (2019) es de los más populares del mundo, aunque muy criticado, brinda un panorama de la desigualdad en una población. Este indicador resulta de la Curva de Lorenz y tiene una escala de 0 a 1 sino 1 la mayor desigualdad.

- **Reprocesos:** Este indicador refleja el valor de las pérdidas en términos monetarios de lo que deja de percibir los ingresos a causa de la inhabilidad de los camiones por falta de mantenimiento.
- **Horas de espera:** En la programación de los camiones se contemplan tres tipos de espera: espera por franja horaria, espera por cargue y espera por descargue. Una vez impreso el resultado de la heurística y metaheurística se suman las horas de cada tipo por día.
- **Función Objetivo:** La función objetivo se calculó de la siguiente manera.

$$\text{Funcion_Objetivo} = (0.1 * ((a \text{ NumViaticos} * \text{Viaticos}) + (b \text{ Km_Total_Recorrido} * \text{Rendimiento} * \text{PrecioGalon}) + (c \text{ NumMantAce} * \text{CostManAceite}) + (d \text{ NumMantCamb} * \text{CostManLlantas}))) + (e \text{ 0.2} * \text{Camiones50} * \text{Ingreso}) + (f \text{ 0.25} * \text{ProporcionTotal}) + (0.45 * (g \text{ CostoHoraEspera} * \text{EsperasCargue}) + (h \text{ CostoHoraEspera} * \text{EsperasDescargue}) + (i \text{ CostoHoraEspera} * \text{EsperasFranja}))$$

- a) Costo total de viáticos

- b) Total de consumo de gasolina
- c) Costo mantenimiento aceite
- d) Costo mantenimiento llantas
- e) Penalización camiones que transportan menos del 50% de su capacidad. Este rubro contempla el ingreso que deja de percibir el camión por no viajar con su capacidad máxima.
- f) Equidad en viajes para los socios.
- g) Costo por horas de espera para cargue
- h) Costo de horas por espera de descargue
- i) Costo de horas por esperas de la franja horaria.

Los pesos que se le asignaron a cada factor de la función objetivo se definieron en conjunto con el gerente de Cootranskilili, con base en sus necesidades. Siendo los factores: g, h, e i los que más afectan a la función objetivo, esto debido a que pueden ser 0, por eso se deben establecer estrategias para la disminución de los mismos.

4.4 Diagnóstico Tecnológico

El diagnóstico tecnológico es una herramienta que permite analizar la madurez tecnológica de la empresa para proponer iniciativas que apoyen la toma de decisiones a nivel, tanto interno, como externo de la empresa Cootranskilili, y mejorar así la competitividad de esta. Para desarrollar el diagnóstico se utilizó la guía de autodiagnóstico para pymes en la utilización de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TICs), creado por la Sociedad para la Promoción y Reconversión Industrial (SPRI). Esto con el fin de proponer el uso y la implementación de herramientas tecnológicas para lograr un enlace entre la solución digital desarrollada y la toma de decisiones entre los agentes de la empresa. Se escogió este modelo de diagnóstico debido a su amplio alcance, su facilidad de análisis e implementación. Esto, puesto que, es una guía que permite explorar cómo las TICs pueden apoyar la competitividad de la empresa, identificar iniciativas de uso que mejor se adapten a las necesidades del negocio y planificar su implantación futura. Adicionalmente, brinda la posibilidad de comprender el significado de las TICs y las ventajas que estas le pueden aportar a la empresa, además de conocer el grado de utilización actual de las mismas en su organización. Adicionalmente, permite identificar oportunidades para avanzar en el uso de las tecnologías y reflexionar sobre las condiciones que se deben presentar o desarrollar en la empresa (capacitaciones, cultura, infraestructura, etc.) para que dichas tecnologías sean utilizadas adecuada y oportunamente. A continuación se presenta el desarrollo de las cinco fases de la guía.

4.4.1. Cuestionario de diagnóstico

El cuestionario que se llevó a cabo para el desarrollo del diagnóstico consta de tres bloques. El primer bloque es acerca de la disponibilidad de infraestructura de las TICs en la empresa. El segundo bloque es sobre el grado de preparación de la empresa para el uso de las TICs, es decir, determina si existe la formación requerida por parte de la empresa para el uso de la tecnología. Finalmente, el tercer bloque tiene como propósito analizar la utilización que la empresa hace de las TICs en las relaciones que mantiene con sus clientes, proveedores y otros agentes. Esta encuesta se realizó en la empresa Cootranskilili, específicamente a: Gerente General, Coordinador de operaciones, contador, auxiliar administrativo y tres socios. En el anexo 5 se encuentran las encuestas realizadas.

4.4.2. Posicionamiento de la empresa en el uso de las TICs

Para determinar el posicionamiento de la empresa Cootranskilili frente al uso de las TICs, se realiza la sumatoria de las respuestas afirmativas del tercer bloque, el cual hace referencia al análisis

de la utilización de las TICs dentro de la empresa con respecto a la relación con terceros. Existen cinco niveles en el uso de las TICs, los cuales son:

Ilustración 7: Niveles en el uso de las TICs



Fuente: SPRI Sociedad para la Promoción y Reconversión Industrial

Dependiendo del resultado de la sumatoria obtenida en el bloque 3, se posiciona a la empresa en los niveles presentados anteriormente. Una vez posicionada la empresa en el nivel se prosigue a priorizar ciertos criterios que vayan de la mano con los objetivos de la empresa.

4.4.3. Selección de criterios de priorización

En esta fase se busca priorizar aspectos en la empresa con el fin de cubrir los objetivos que se tiene para los siguientes años. Para esto se tienen en cuenta dos criterios: el enfoque o estrategia de negocio y los principales agentes (clientes, proveedores, empleados y otros) cuya relación con la empresa se desea fortalecer. Dicha selección se lleva a cabo por medio de unas preguntas relacionadas con los criterios anteriormente mencionados que se les realiza a la comitiva de la empresa, en donde ellos seleccionan los criterios que más se ajusten a sus necesidades. Una vez seleccionados dichos criterios se procede a la presentación de iniciativas.

4.4.4. Presentación y priorización de iniciativas

La presentación y priorización de iniciativas de uso de las TICs se realizan dependiendo del nivel de escala donde se encuentra situada la empresa. Con el fin de priorizar las iniciativas, se tuvieron en cuenta los criterios de negocio y de relación que la empresa seleccionó en la fase anterior y con ayuda de un listado de iniciativas que brinda la guía de autodiagnóstico para pymes en la utilización de las TICs, en donde cada iniciativa tiene su enfoque de negocio y su enfoque de relación. Se seleccionaron las iniciativas que se encuentren relacionadas con el enfoque de negocio y el enfoque de relación que escogió la empresa para el cumplimiento de sus objetivos.

4.4.5. Planificación

La planificación se realiza con respecto a las iniciativas identificadas en la fase anterior, las cuales son las más adecuadas y aplicables para el cumplimiento de los objetivos de la empresa. Por lo tanto, es necesario llevar cierta planificación de cada iniciativa con el fin de conocer los costos asociados, la duración y la persona responsable de cada iniciativa. A continuación se presenta la planificación.

Tabla 2: Planificación de las iniciativas

Iniciativa	Coste	Objetivo	Inicio	Duración	Responsable
Optimizar el proceso de logística mediante la utilización de un sistema que automatice las órdenes de demanda brindadas por los clientes y la programación de los vehículos para satisfacer dicha demanda.	\$1.800.000	Mejorar la relación con los clientes, evitar incumplimientos y incorporar herramientas que automatizen los procesos internos.	feb-21	9 meses	Área Logística
Optimizar y flexibilizar los procesos de venta (pedidos) incorporando un sistema de gestión comercial.	\$1.200.000	Satisfacer las necesidades de los clientes y aumentar la participación en el mercado.	may-21	7 meses	Área comercial
Compartir información con los clientes independientemente de su ubicación a través de proveedores de soluciones de almacenamiento de la información (Hosting).	\$ 800.000	Incorporar diferentes sistemas de información que permita tener los datos consolidados en una herramienta tecnológica (internet).	sept-21	4 meses	Área Administrativa

Fuente: Propia

5. Componente de Diseño en ingeniería

A continuación se presentan detalles del aplicativo desarrollado para la programación de asignación de vehículos para Cootranskilili.

5.1 Declaración de Diseño

Se realizó el diseño de un programa de optimización, por medio del cual se llevó a cabo la programación semanal para la asignación de vehículos en una empresa de transporte de hidrocarburos. El aplicativo toma como datos de entrada los pronósticos de la demanda, información de los camiones, costos de mantenimiento, costos fijos (viáticos y mantenimientos), costos variables (rendimiento y precio de gasolina) y tiempos de cargue y descargue en los pozos. Como datos de salida, el programa imprime la ruta que debe realizar cada camión en los días específicos del horizonte de planeación (Anexo 6 Aplicativo).

5.2 Proceso de Diseño

El desarrollo del programa digital se realizó por medio de la herramienta Excel, con la implementación del lenguaje de programación Visual Basic for Application (VBA). Para la ejecución del programa, esta fue dividida en tres fases: datos de entrada, procesamiento del modelo matemático y datos de salida. Con el fin de ejecutar cada fase, se desarrolló una interfaz con diferentes opcionales que dirigen al usuario a la ventanilla deseada.

Ilustración 8: Interfaz del aplicativo



Fuente: Propia

Es indispensable que antes de ejecutar el opcional “programación de tractocamiones semanal”, se debe dirigir a los opcionales “actualizar demanda semanal”, “actualizar información de camiones” y “actualizar parámetros de entrada”. Una vez documentados los datos que desea que se tengan en cuenta para la programación, se debe ejecutar el primer opcional para conocer la ruta semanal de los vehículos. A continuación se presenta la interfaz de cada llamado.

A. Datos de entrada

Los datos de entrada para el funcionamiento de la herramienta deben ser ingresados por el operario en las celdas verdes, para que este posteriormente arroje los resultados óptimos de la planeación de vehículos de la empresa.

→ Demanda

Ilustración 9: Actualizar demanda

	Cumplidor	Cohembí	Santana	Quinde	Quillacinga	Nancy
lunes						
martes						
miércoles						
jueves						
viernes						
sábado						
domingo						

Actualizar Demandas

Regresar menú principal

Fuente: Propia

→ Costos e Información de Vehículos

Ilustración 10: Actualizar parámetros

Destino	OCF	Parqueadero	Cumplidor	Cohembí	Santana	Quinde	Quillacinga	Nancy
OCF	0	150.3	122.37	118.4	111.3	106.2	112.4	92.4
Parqueadero	10000	0	0	48.27	1	29.9	16.27	18.1
Cumplidor	122.37	10000	0	10000	10000	10000	10000	10000
Cohembí	118.4	10000	10000	0	10000	10000	10000	10000
Santana	111.3	10000	10000	10000	0	10000	10000	10000
Quinde	106.2	10000	10000	10000	10000	0	10000	10000
Quillacinga	112.4	10000	10000	10000	10000	10000	0	10000
Nancy	92.4	10000	10000	10000	10000	10000	10000	0

Costos	Unidades
Reemplazo	0.12
Previa agua	1.50
Varitas	121.000
Regreso	12.000

Elaboración de mantenimiento	Para	Costo
Acción a tomar	1	1.000
Mantenimiento	2	1.300
Cambio de motor	3	8.000

Parámetro	OCF	Parqueadero	Cumplidor	Cohembí	Santana	Quinde	Quillacinga	Nancy
OCF	0	4	1	1	4	1	4	1
Parqueadero	250	0	1	1	1	1	1	1
Cumplidor	4	250	0	250	250	250	250	250
Cohembí	1	250	250	0	250	250	250	250
Santana	4	250	250	250	0	250	250	250
Quinde	1	250	250	250	250	0	250	250
Quillacinga	4	250	250	250	250	250	0	250
Nancy	1	250	250	250	250	250	250	0

OCF	0
Parqueadero	1
Cumplidor	1
Cohembí	1
Santana	1
Quinde	1
Quillacinga	1
Nancy	1

Costo hora espera	45	24.000
Unidad Varas	45	128.125

Regresar menú principal

Fuente: Propia

Ilustración 11: Actualizar Información Vehículos

ID Camión	Socios	Tipo	Capacidad	Nacional	Km Recorridos	Numero Viajes	Placa	Conductor
1	Socio 1	2 Ejes	250	0	0	0		
2	Socio 1	3 Ejes	280	0	0	0		
3	Socio 1	3 Ejes	280	0	0	0		
4	Socio 1	2 Ejes	250	0	0	0		
5	Socio 1	2 Ejes	250	0	0	0		
6	Socio 1	3 Ejes	280	0	0	0		
7	Socio 1	2 Ejes	250	0	0	0		
8	Socio 1	3 Ejes	280	0	0	0		
9	Socio 1	2 Ejes	250	0	0	0		
10	Socio 1	2 Ejes	250	0	0	0		
11	Socio 1	2 Ejes	250	0	0	0		
12	Socio 1	3 Ejes	280	0	0	0		
13	Socio 1	3 Ejes	280	0	0	0		
14	Socio 1	3 Ejes	280	0	0	0		
15	Socio 1	3 Ejes	280	0	0	0		
16	Socio 1	2 Ejes	250	0	0	0		
17	Socio 1	3 Ejes	280	0	0	0		
18	Socio 1	3 Ejes	280	0	0	0		
19	Socio 2	2 Ejes	250	0	0	0		

Fuente: Propia

B. Procesamiento del modelo matemático

Una vez se realice la documentación de los datos de entrada, se debe realizar el procesamiento de la programación semanal mediante el botón de la interfaz “Programación de tractocamiones semanal,” como se observa en la ilustración 8.

C. Datos de salida

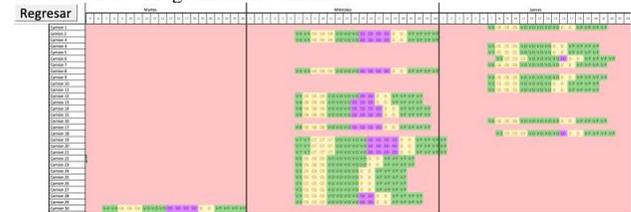
Al realizar la ejecución del programa, el aplicativo presenta la solución de dos formas: el reporte final y la programación semanal donde se especifica el estado que presenta cada camión durante las horas de la semana.

Ilustración 12: Reporte Final

GESTIÓN DE TRANSPORTE DE CRUDO Y SUS DERIVADOS									
Programación para transporte de crudo									
ID Camión	Socio	Type Camión	Plaza	Día	Origen	Destino	Cantidad	Conductor	
59	Socia 18	3 Eje	0	Lunes	Complator	DCP-Ecuador	236	0	
70	Socia 18	3 Eje	0	Lunes	Complator	DCP-Ecuador	250	0	
77	Socia 36	3 Eje	0	Lunes	Complator	DCP-Ecuador	250	0	
78	Socia 37	3 Eje	0	Lunes	Complator	DCP-Ecuador	237	0	
78	Socia 17	3 Eje	0	Lunes	Complator	DCP-Ecuador	280	0	
83	Socia 18	2 Eje	0	Lunes	Complator	DCP-Ecuador	230	0	
12	Socia 9	3 Eje	0	Martes	Complator	DCP-Ecuador	192	0	
45	Socia 9	3 Eje	0	Martes	Complator	DCP-Ecuador	280	0	

Fuente: Propia

Ilustración 13: Programación Semanal



Fuente: Propia

En el anexo 7 se encuentra el instructivo para el uso de la solución digital para la programación de asignación de vehículos donde se encuentra detalladamente el significado de cada columna, fila, color y estado de los vehículos.

5.3 Requerimientos de desempeño

Se construyó un modelo matemático mediante la utilización de una heurística y metaheurística para la resolución del problema, en un tiempo de procesamiento menor a 15 minutos y para un horizonte de planeación y programación de una semana. Adicionalmente, el programa es amigable con el usuario para no tener inconvenientes al momento de ser utilizado. Tiene como salida turnos para cada camión, en donde se especifica los diferentes estados que un camión puede presentar en cada hora, estos son: parqueadero, viajando a pozos, cargando en pozos, esperas (carga, descarga y franja horaria), viajando a OCP, descargando y mantenimientos, así como, el día, el origen, la hora de salida, el destino y la hora de llegada. Esto permite que los directivos de la organización puedan realizar la toma de decisiones de manera adecuada y tener la información clara y precisa de los camiones en una hora específica.

5.4 Pruebas de rendimiento

Con el objetivo de garantizar que la solución digital propuesta cumpla con los requerimientos de desempeño, se realizaron diferentes pruebas modificando los parámetros de entrada, tales como demanda, tiempo estimado para cargue y descargue y kilometraje de los camiones. Esto con el fin de verificar que el modelo propuesto funcione de manera correcta en diferentes situaciones que se puedan presentar. Adicionalmente, se realizó la ejecución de la metaheurística Tabú en diferentes instancias modificando el número de cambios válidos con el fin de garantizar que este algoritmo hallará mejores soluciones que la heurística.

5.5 Restricciones

El diseño de la herramienta digital se desarrolló teniendo en cuenta que todos los pozos se encuentren en funcionamiento y que los tiempos de espera para cargue y descargue sean determinísticos, ya que sólo se contemplan los camiones de la empresa Cootranskilili. Se establecieron cuatro bahías en los pozos de cargue y ocho bahías para en el descargue (OCP). La herramienta no tendrá en cuenta cambios en la tendencia de la demanda para el cálculo de los pronósticos. Además, no se considerarán imprevistos en las vías de comunicación entre cada par de nodos, posibles alteraciones en el orden público o incrementos en el flujo de automotores. Por lo tanto, se estimó una velocidad constante durante todo el recorrido. Adicionalmente, los costos asociados al proceso se obtuvieron mediante datos brindados por la empresa. Finalmente, se estableció que la hora de salida para la heurística fuera la hora que actualmente la empresa utiliza (7am).

5.6 Cumplimiento del estándar

El desarrollo del programa digital se realizó mediante los estándares de calidad establecidos por Information Technology-Software Product Evaluation-Quality Characteristics and Guidelines for Their Use, también conocido como, ISO 9126. Esta norma se basa en 6 estándares; funcionalidad, confiabilidad, usabilidad, eficiencia, mantenibilidad, y portabilidad. El primer estándar se aplica en el diseño del modelo matemático en el momento de relacionar el conjunto de datos y sus funciones. Es decir, cumplir con las necesidades de la empresa de manera segura y exacta. La confiabilidad se presenta en el modelo, ya que durante el tiempo de uso se mantiene un nivel de rendimiento elevado.

El estándar de usabilidad es implementado en el modelo matemático porque es fácil y amigable con el usuario, el operario encargado del área de logística. Teniendo en cuenta que el programa desarrolla la programación en menos de 15 minutos, se está cumpliendo el estándar de eficiencia ya que el tiempo de ejecución es rápido. El estándar de mantenibilidad corresponde al aspecto de verificación y modificación del programa en caso de tener fallas. Por lo tanto, se diseñó una herramienta que facilita realizar los cambios pertinentes. Finalmente, el estándar de portabilidad se aplica en el programa debido a su facilidad de implementación y puede ser utilizado en otras áreas o en diferentes empresas que tengan la misma funcionalidad de Cootranskilili.

6. Resultados

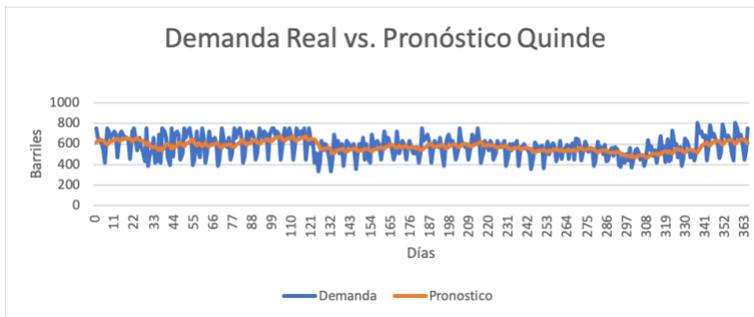
Se desarrolló una solución digital para la programación de asignación de vehículos para Cootranskilili, una empresa que realiza el transporte de hidrocarburos desde seis diferentes pozos en Colombia (Cohembi, Quinde, Cumplidor, Nancy, Quillacinga y Santana) hasta el Oleoducto de Crudos Pesados (OCP) en Ecuador. La idea surgió de la necesidad que presentaba la empresa con respecto a la reducción de costos asociados a sus procesos logísticos.

La solución que brinda el aplicativo es lograr una programación de asignación de los vehículos en un horizonte de planeación de una semana para mejorar los factores que afectaban a la empresa. Es una solución integrada debido a que un cambio en cualquier parámetro tiene incidencia en los demás. Por ejemplo, al cambiar el kilometraje de los tractocamiones automáticamente la solución del aplicativo es modificada, así como el cambio en las demandas. A continuación se presentan los resultados obtenidos de la metodología:

- **Fase 1: Pronósticos**

La macro de los pronósticos se realizó teniendo en cuenta el comportamiento de las demandas históricas de cada pozo. Se evidenció que el comportamiento de las demandas en todos los pozos era con tendencia, siendo el modelo Suavización Exponencial Doble (Holt) el que se ajusta a las características de esta. En la gráfica 1 se observa la demanda vs. el pronóstico del pozo Quinde, seleccionando como modelo de pronóstico Holt y un MAPE de 15.6%.

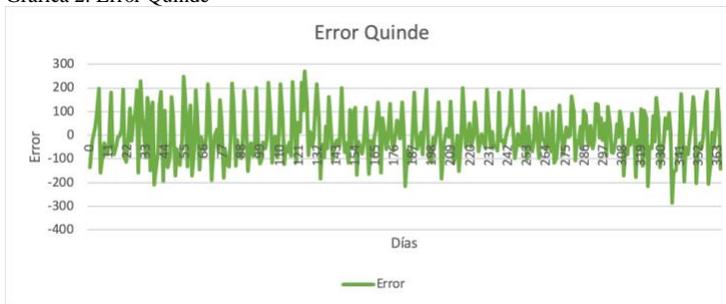
Gráfica 1: Demanda real Vs Pronóstico Quinde



Fuente: Propia

Con el fin de verificar que los modelos seleccionados se ajustarán al comportamiento de la demanda real, se estableció como criterio de selección el error porcentual absoluto (MAPE). Para esto se tomó un pronóstico aceptable con un valor del MAPE de menos de 20%. De acuerdo con las gráficas del error, se observa que estas tienen un comportamiento aleatorio alrededor de cero, siendo un pronóstico adecuado. En la gráfica 2 se observa el error de la estimación de la demanda para el pozo Quinde.

Gráfica 2: Error Quinde



Fuente: Propia

Teniendo en cuenta que el programa permite el ingreso de nuevas demandas, se programa adicionalmente el modelo de Suavización Exponencial Simple (SES) en caso de que dicho modelo se ajuste mejor de acuerdo con el comportamiento de la demanda. Basado en la información de la empresa, las demandas no presentan un comportamiento estacional, motivo por el cual no se tuvo en cuenta el modelo de pronósticos Suavización Exponencial Triple (Winters). El programa selecciona el modelo con el mejor MAPE para estimar los pronósticos de la demanda y posteriormente ser usados en la programación de la asignación de vehículos. En el anexo 8 se encuentran las gráficas de demanda vs pronósticos y gráficas de error de los pozos restantes, así como las gráficas para el modelo de pronósticos SES de cada pozo.

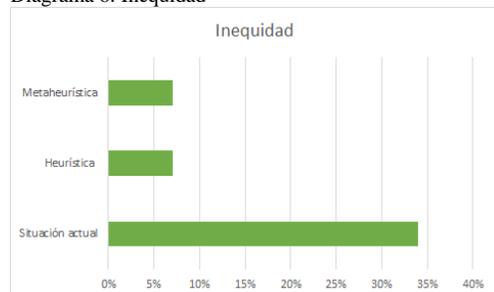
- **Fase 2: Modelo Matemático y Fase 3: Comparación de resultados**

Con el fin de medir la calidad de resultados obtenidos, tanto de la heurística, como de la metaheurística se desarrolló un validador por medio del cual se verificó que se cumplan las restricciones y que las soluciones obtenidas sean factibles. Adicionalmente, se realizó una serie de comparaciones en los resultados obtenidos de la heurística como de la metaheurística, con el fin de conocer las mejoras obtenidas en los diferentes indicadores evaluados. A continuación se presentan la comparación de los indicadores.

Inequidad:

Este indicador mide el porcentaje de vehículos que se encuentran desfasados de la media, permitiendo evidenciar si la asignación de viajes fue equitativa entre sí.

Diagrama 6: Inequidad



Fuente: Propia

Como se puede evidenciar en la gráfica, con 311 viajes y un horizonte de planeación de una semana, el 34% de los camiones se encuentran por encima o por debajo de la media de viajes por vehículo (media de viajes = 4). Mientras que en la heurística y metaheurística presentan un 7%, esto se debe a que en la programación de estos dos algoritmos se implementó una heurística de ordenamiento (Anexo 4).

Reprocesos

Los reprocesos en Cootranskilili generan pérdidas de \$19.000.000 de pesos, esto debido a que no se ha implementado un control de mantenimientos preventivos que permitan que todos los camiones cumplan con los estándares exigidos por los pozos. La herramienta digital propuesta reduce estas pérdidas a cero, ya que al momento en que los camiones cumplan con un kilometraje establecido, el próximo día quedará inhabilitado, permitiendo así que se realice su respectivo control.

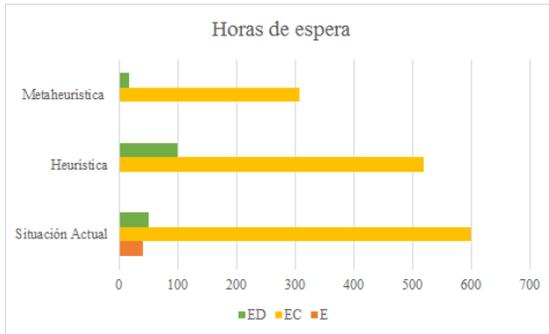
Horas de espera

Franjas horarias (E): Los tractocamiones pueden salir del pozo siempre y cuando carguen antes de las 5:00 PM, de lo contrario saldrán a las 6:00 AM del día siguiente. Durante este periodo se realizará el cargue y se contarán como horas de espera.

Espera carga (EC) y Espera descargue (ED): Al momento en que los camiones llegan a los pozos a realizar el cargue se pueden presentar tiempos de espera para los camiones debido a la congestión en las bahías de cargue. Por lo tanto, este tiempo depende de la hora en la que llegue el tractocamión, el número de camiones que lleguen antes de él y la disponibilidad de los 4 servidores en pozos de cargue y 8 servidores en OCP.

Una vez realizado el modelo heurístico y metaheurístico se calcularon las horas de espera con 311 viajes y un horizonte de planeación de una semana. La siguiente gráfica muestra las horas resultantes.

Gráfica 3: Horas de espera



Fuente: Propia

Los tres tipos de espera en el modelo heurístico y metaheurístico representan la siguiente mejora con respecto a la situación actual.

Tabla 3: Cambio de horas de espera.

Modelo	Horas de espera		
	E	EC	ED
Heurística	100%	14%	-98%
Metaheurística	100%	49%	64%

Fuente: Propia

Función Objetivo

En el cálculo de la función objetivo se tuvieron en cuenta los factores anteriormente descritos y se realizó una comparación entre los dos modelos desarrollados.

Ilustración 14: Función Objetivo.

F.O. Metaheurística	\$ 58.133.828	F.O. Heurística	\$ 69.512.009
Porcentaje Mejora :		-16,37%	

Fuente: propia.

Se evidenció una reducción de 16,37% de la función objetivo resultante de la metaheurística con respecto a la heurística.

- **Fase 4: Diagnóstico Tecnológico**

Se realizó un diagnóstico de madurez tecnológica con el fin de proponer que nuevas tecnologías se implementen de manera continua en Cootranskilili con el objetivo de que estas iniciativas mejoren y apoyen la toma de decisiones, logrando así el cumplimiento de los objetivos.

Para realizar el diagnóstico se llevaron a cabo una serie de encuestas, de las cuales se obtuvieron entre 14 y 22 respuestas afirmativas con respecto a la importancia del uso y conocimiento de las TICs, posicionando a la empresa Cootranskilili en el nivel de interacción, el cual es un nivel medio en el uso de las TICs. [Este nivel hace referencia al uso del internet para entablar un diálogo con los clientes, proveedores y otros agentes.](#) Su principal medio de comunicación con clientes y otros agentes es a través de internet (correo electrónico). [Por otro lado, el intercambio de información \(compra-venta\) se sigue realizando por el canal tradicional, es decir, directamente entre el comprador y vendedor.](#) Adicionalmente, la empresa avanza en la automatización de los procesos operativos y

administrativos incorporando algunos sistemas de información. Sin embargo, aún no están integradas entre sí, por lo tanto, se realiza un cierto tratamiento manual de la información corriendo el riesgo de perder dicha información. Entre estos sistemas de información se encuentran dos bases de datos, una de clientes y la otra de los camiones y sus especificaciones.

Una vez posicionada la empresa en el nivel de interacción, se prosiguió a priorizar criterios: el enfoque o estrategia de negocio y los principales agentes (clientes, proveedores, empleados y otros) cuya relación con la empresa se desea fortalecer. Esto se llevó a cabo por medio de unas preguntas relacionadas a ambos criterios anteriormente mencionados, la comitiva de la empresa escogió cual es el enfoque de negocio y el enfoque de relación (principales agentes) que más se ajustan a dichos objetivos. Una vez realizado el análisis de dichas preguntas por parte del gerente general y la asamblea de socios, se llegó a la concesión de que en el enfoque de negocio lo más importante para el cumplimiento de estos es la reducción de costos, ya que los objetivos que la empresa tiene para los años siguientes son reducir los costos del proceso actual y reducir el tiempo de dicho proceso. Con respecto a los principales agentes, la relación que la empresa desea fortalecer es la relación con sus clientes, debido a que se cuenta con una alta oferta. Por lo tanto, es importante tener una buena relación y un intercambio de información adecuado para así cumplir con las necesidades de los clientes. Después de seleccionar los criterios se realiza la presentación de iniciativas, en donde se tuvo en cuenta los criterios anteriormente mencionados y el nivel de escala en el que se encuentra situada la empresa. Las iniciativas escogidas fueron las siguientes:

1. Optimizar el proceso de logística mediante la utilización de un sistema que automatice las órdenes de demanda brindadas por los clientes y la programación de los vehículos para satisfacer dicha demanda.
2. Optimizar y flexibilizar los procesos de venta (pedidos) incorporando un sistema de gestión comercial.
3. Compartir información con los clientes independientemente de su ubicación a través de proveedores de soluciones de almacenamiento de la información (Hosting).

Adicionalmente se presenta una serie de recomendaciones de tecnología, tales como:

1. Crear una red que permite compartir periféricos (impresoras, scanners, etc.), información o aplicaciones, conectando los PC a los recursos.
2. Adquirir o alquilar softwares (sistema de gestión de compras, logística, ventas o etc.) que sean necesarios para la realización de operaciones y procesos internos.
3. Asegurar el mantenimiento de la red. Se deberá disponer de personas que tengan los conocimientos necesarios para asegurar un soporte interno o contratar a un proveedor externo para que realice esas tareas.
4. Configurar diferentes niveles de acceso a la información (interna y externa), asegurando el acceso restringido a la información confidencial.
5. Incorporar tecnologías para la realización de copias de seguridad.

A continuación se muestra una serie de recomendaciones de organización, es decir, sobre las condiciones que se deben dar en la empresa para que las TICs desplieguen todo su potencial de mejora.

1. Sensibilizar a las personas responsables de la organización para que conozcan y apoyen la utilización de las nuevas TICs.
2. Garantizar que la implantación de las TICs sea realizada por equipos mixtos, integrados por personas que conocen el negocio.
3. Proporcionar la formación adecuada a las personas que vayan a utilizar las TICs como herramientas de trabajo.

Finalmente, es necesario que la empresa cuente con la tecnología y el conocimiento necesario por parte de los trabajadores y de los directivos con respecto al uso y la implementación de esta, para poder desarrollar de manera eficaz y correctamente sus labores diarias. Además, es de vital importancia lograr la integración de la tecnología para la toma de decisiones.

6.1 Medición del Impacto

Los impactos resultantes del aplicativo desarrollado presentan una mejora financiera de los costos para la empresa Cootranskilili, como también impactos sociales y operativos. De acuerdo con los datos obtenidos por la solución digital, se logran minimizar los costos de reprocesos, ya que se implementó un control de los mantenimientos que se le deben realizar a la flota de camiones de la empresa. Adicionalmente, la herramienta busca maximizar la capacidad de utilización de los camiones, con el fin de lograr satisfacer la demanda con la menor cantidad de estos, reduciendo los costos de viáticos y asociados.

Los resultados obtenidos demuestran impactos sociales en la estructura de un modelo de asignación de vehículos equitativo, en cuanto al número de viajes que realizan los camiones dentro de la empresa. Lo anterior se logró utilizando las capacidades de los camiones y brindando un valor significativo a cada uno de los socios en el momento de realizar la asignación de los vehículos.

Finalmente, el impacto operacional recae en el diagnóstico del uso de las TICs realizado a la empresa, con el fin de implementar procesos operacionales y administrativos automatizados. Lo anterior facilita el proceso de asignación de camiones y permite alinear cada uno de los procesos con los objetivos empresariales.

7. Conclusiones y recomendaciones

- Existían factores que afectaban la utilidad de la empresa, como la inequidad en la asignación de carrotaques, reprocesos por tractocamiones en mal estado y un mal manejo en el control de los mantenimientos asociados a cada uno de estos. Con la herramienta desarrollada se estructuró un modelo de equidad en la asignación de carrotaques y un control de los mantenimientos reduciendo los costos de estos.
- Debido a la complejidad del problema fue necesario la utilización de una metaheurística (algoritmo de Búsqueda Tabú) para la construcción y mejora del modelo matemático inicial propuesto (heurística).
- Aplicando el algoritmo de búsqueda local se redujo en un 16,37% la función objetivo resultante de la heurística.
- La suma de las horas de espera en el modelo actual se redujeron en un 13% y 54% aproximadamente, aplicando el modelo heurístico y metaheurístico.
- Es importante tener en cuenta que el programa desarrollado es un modelo que cumple con un horizonte de planeación semanal, realizando mejoras diarias en la utilización de los camiones, permitiendo establecer una planeación estratégica apoyando la toma de decisiones de la empresa.
- La implementación de dicha propuesta es el primer paso de la empresa para comenzar una transformación industrial incorporando procesos automatizados y conectividad entre áreas, personas y agentes externos. La empresa está en la capacidad de implementar diferentes tecnologías para apoyar el crecimiento y la toma de decisiones.

- La restricción más representativa sobre la función objetivo es horas de espera para cargar, esto se debe a que cada pozo sólo cuenta con 4 bahías de despacho y la oferta de vehículos es muy grande. Por lo tanto, para que esta penalización disminuya, es necesario que los pozos establezcan más bahías de cargue, ya que a más servidores, menos tiempo en el sistema.

Se recomienda a la empresa Cootranskilili considerar los siguientes ítems:

- Implementar un sistema de recolección de información a través de una base de datos con el objetivo de integrar la información y tener trazabilidad de esta.
- Crear espacios para realizar capacitaciones al personal de la empresa acerca de la implementación y el uso de las tecnologías que se vayan incorporando a la organización.
- Implementar un sistema de control de mantenimientos para cada vehículo. Por ejemplo, llevar un registro de los mantenimientos realizados y los pendientes de cada vehículo, en donde se especifique fecha, hora y tipo de mantenimiento.
- Los pronósticos presentados se llevaron a cabo por medio de los modelos Suavización Exponencial Simple y Suavización Exponencial Doble, con la información brindada por la empresa de las demandas del año 2018 de cada uno de los pozos. Sin embargo, para más precisión en los pronósticos futuros es necesario tener en cuenta un modelo de curva de producción de los pozos. Un ejemplo de ello es el modelo de curva de declinación, este modelo se utiliza para predecir producciones futuras y tiene en cuenta el rendimiento, la tasa de declinación y el tipo de yacimiento, garantizando de esta manera pronósticos más confiables. Además, permite conocer en qué punto de la curva se encuentra el yacimiento y la duración del mismo, evitando pérdidas, malas predicciones y una programación ineficiente a largo plazo.
- Para que el aplicativo desarrollado sea dinámico, es decir, que permita realizar cambios que se consideren necesarios en un instante determinado, es importante utilizar programación reactiva. De acuerdo con Costa (2016), este tipo de programación se basa en la propagación del cambio lo cual significa, que cuando hay un cambio de estado en un objeto de una variable los otros objetos que dependen de este son notificados y actualizados acorde a la nueva información. Lo anterior es conocido como un patrón de diseño o “observer”. Los eventos se realizan de forma asíncrona para que los observadores puedan procesarlos. Se recomienda usar la programación reactiva cuando el programa necesita revisar muchas reglas antes de ejecutar una operación o si se desea combinar diferentes patrones en uno solo, ya que se usan menos hilos y el procesamiento es más eficiente.

Referencias

- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2008). Cadena productiva de los Hidrocarburos. Recuperado de: <http://www.anh.gov.co/Ninos/Cartillas/cadenaProductivaHidrocarburos.pdf>
- Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2018). ANH en Datos. Cifras y Estadísticas: a 2018. Recuperado de: <http://www.anh.gov.co/ANH-en-Datos/Paginas/Cifras-y-Estad%C3%ADsticas.aspx>
- Asociación Colombiana del Petróleo. (2015). ACP Hidrocarburos. Recuperado de: <https://acp.com.co/web2017/images/pdf/salaprensa/revista/ACP%20ED14.pdf>
- Asociación Colombiana del Petróleo. (2018). Informe Económico No. 1. Recuperado de: <https://acp.com.co/web2017/es/asustos/economicos/199-costos-de-operacion-del-sector-petrolero-en-colombia-en-2017/file>

- Benavent, E., Landete, M., Mota, E., & Tirado, G. (2015). The multiple vehicle pickup and delivery problem with LIFO constraints. *European Journal of Operational Research*, 243(3), 752–762. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.12.029>
- Cootranskilili Transporte Nacional e Internacional de Hidrocarburos y Carga. (2018). Nuestra Empresa. Recuperado de: <http://cootranskilili.com/empresa/>
- Cordeau, J. F., Laporte, G., Savelsbergh, M. W. P., & Vigo, D. (2007). Chapter 6 Vehicle Routing. *Handbooks in Operations Research and Management Science*. [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(06\)14006-2](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(06)14006-2)
- Costa, C. (2016). *Reactive Programming with Swift*. Birmingham, UK: Packt Publishing. Retrieved from <https://search.ebscohost.com.ezproxy.javeriana.edu.co/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=1228517&lang=es&site=eds-live>
- DANE. (2018). Boletín Técnico, Exportaciones (EXPO). Recuperado de: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/exportaciones/bol_exp_dic18.pdf
- Edelkamp, S., & Schrödl, S. (2011). *Heuristic Search: Theory and Applications*. Amsterdam: Morgan Kaufmann. Recuperado de: <http://ezproxy.javeriana.edu.co:2048/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=369933&lang=es&site=eds-live>.
- Glover, F. y Laguna, M. (1997). Tabu Search. Kluwer Academic Publishers, Boston, Hardbound.
- Han, J., Lee, C., & Park, S. (2013). A Robust Scenario Approach for the Vehicle Routing Problem with Uncertain Travel Times. *Transportation Science*, 48(3), 373–390. <https://doi.org/10.1287/trsc.2013.0476>
- Hydrocarbons Exploration and Production. (2010). Colombia: The Perfect Environment. Recuperado de : [http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Cuencas%20Sedimentarias%20de%20Colombia%20\(PDF\).pdf](http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Estudios-Integrados-y-Modelamientos/Presentaciones%20y%20Poster%20Tcnicos/Cuencas%20Sedimentarias%20de%20Colombia%20(PDF).pdf)
- Khodr, H. M. (2012). *Scheduling Problems and Solutions*. New York: Nova Science Publishers, Inc. Recuperado de: <http://ezproxy.javeriana.edu.co:2048/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=e000xww&AN=540233&lang=es&site=eds-live>.
- La República (2019). Ecopetrol opera 54 de cada 100 barriles de petróleo producidos en el país. Recuperado de: <https://www.larepublica.co/empresas/ecopetrol-opera-54-de-cada-100-barriles-de-petroleo-producidos-en-el-pais-2887159>
- Li, B., Xuan, H., Yang, X., & Wang, X. (2018). A novel parameterised approximation approach based on bi-level programming for integration transport scheduling problem. *Journal of the Operational Research Society*, 5682, 1–14. <https://doi.org/10.1080/01605682.2017.1421856>
- Li, B., Xu, W., Xuan, H., & Xu, C. (2017). Dynamic Vehicle Scheduling for Working Service Network with Dual Demands. *Journal of Advanced Transportation*, 2017, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2017/7217309>
- López, R. B. (14 de 07 de 2017). *La metaheurística de Búsqueda Tabú aplicada al problema de Enrutamiento de Vehículos*. Obtenido de Universidad de Valladolid: Recuperado de: <http://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/26070/TFG-I-739.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Malagón, Jonathan. (2016). La Competitividad del sector de hidrocarburos en las diferentes regiones de Colombia. Recuperado de: <http://www.co.undp.org/content/dam/colombia/docs/MedioAmbiente/undp-co-La%20competitividad%20del%20sector%20de%20hidrocarburos%20en%20las%20diferentes%20regiones%20de%20Colombia-2016.pdf>

- Ministerio de Minas y Energía. (2013). Hidrocarburos. Recuperado de: <https://www.minminas.gov.co/documents/10180/614096/2-Hidrocarburos.pdf/75855d82-def9-4ccb-9fe4-2d4ee97f9123>
- Ministerio de Minas y Energía. (2012). MINAS. Recuperado de: <https://www.minminas.gov.co/documents/10180/614096/4-CapituloMinas.pdf/fbd3bdeb-7d06-4817-9af0-6c43136fef18>
- Ministerio de Minas y Energía. (2018). Reservas. Recuperado de: <https://www.minenergia.gov.co/reservas>
- Mora García, L. A. (2008). *Gestión logística integral: las mejores prácticas en la cadena de abastecimientos* (Vol. 1a ed). Bogotá: Ecoe editions. Retrieved from <http://ezproxy.javeriana.edu.co:2048/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=478470&lang=es&site=eds-live>
- Rodríguez-Salvador, M., & Mancilla-de-la-Cruz, J. (2018). Presencia de la Industria 4.0 en la fabricación aditiva: análisis de tendencias tecnológicas. *DYNA - Ingeniería e Industria*, 93(6), 597–601. Recuperado de: <https://doi-org.ezproxy.javeriana.edu.co/10.6036/8815>
- Secretaría Distrital De Gobierno. (2016). Planeación Institucional. Planeación táctica. Recuperado de: <http://www.gobiernobogota.gov.co/transparencia/organizacion/modelo-de-planeacion/planeacion-tactica>
- Siarry, P. (2013). *Heuristics: Theory and Applications*. Hauppauge, New York: Nova Science Publishers, Inc. Recuperado de: <http://ezproxy.javeriana.edu.co:2048/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=564185&lang=es&site=ehost-live>.
- Superintendencia de Sociedades. (2017). Desempeño del sector de Hidrocarburos Informe. Recuperado de: <https://incp.org.co/Site/publicaciones/info/archivos/Hidrocarburos.pdf>
- Unidad de Planeación Minero-Energética. (2015). Evaluación de la contribución económica del sector de hidrocarburos colombiano frente a diversos escenarios de producción. Recuperado de: http://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/Estudios%202014-2016/resumen_fedesarrollo_mme_final.pdf
- U.S Energy Information Administration. (2019). Country Analysis Executive Summary: Colombia. Recuperado de: https://www.eia.gov/beta/international/analysis_includes/countries_long/Colombia/pdf/colombia_exe.pdf
- U.S Energy Information Administration. (2019). Country Analysis Brief: Colombia. Recuperado de: https://www.eia.gov/beta/international/analysis_includes/countries_long/Colombia/colombia.pdf
- Youssef, S. M. (1999). *Iterative Computer Algorithms with applications in engineering*. EEUU: Los Alamitos.
- Jancewicz, B. (2019). People's Evaluations of Income Inequality and the Gini Coefficient : Different in Details , Similar in Patterns, 3. <https://doi.org/10.26412/psr207.03>