

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA MEJORA OPERACIONAL EN DUCTOS
MEDIANTE ANÁLISIS DE PROGRAMA DE BOMBEO UTILIZANDO LA
FILOSOFÍA LEAN**

DIEGO ALEXANDER GUZMÁN CONEJO

UNIVERSIDAD EAN

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PROCESOS

BOGOTÁ

2017

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA MEJORA OPERACIONAL EN DUCTOS
MEDIANTE ANÁLISIS DE PROGRAMA DE BOMBEO UTILIZANDO LA
FILOSOFÍA LEAN**

DIEGO ALEXANDER GUZMÁN CONEJO.

Tesis Presentada Para Obtener El Título de Magister en Ingeniería de Procesos

Director

Profesor Jeffrey León Pulido

UNIVERSIDAD EAN

FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRIA EN INGENIERÍA DE PROCESOS

BOGOTÁ

2017

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, Octubre 2017

Dedicatoria

Esta tesis está dedicada a Dios, quien siempre estuvo a mi lado dándome fortaleza para culminar mis estudios.

Quiero dedicar esta tesis a mis padres Lucy y Omar (Q.E.P.D), porque gracias a que ellos estoy culminando otra etapa en mi vida. Gracias por sus consejos, por su apoyo y paciencia.

A mi hermano Omar quien no me dejó desfallecer en cada momento del desarrollo de esta tesis. Gracias por cada fuerza que me dio día a día.

A toda mi familia quienes siempre creyeron en mí y me apoyaron

Y mis amigos del alma Alejandro, Dario y Jorge quienes con la presión para que terminara... termine. Mil gracias.

Agradecimientos

El autor expresa su agradecimiento a:

El ingeniero Jeffrey León por su apoyo constante, asesoría y dedicación a lo largo en la elaboración de este documento.

El ingeniero Diego Carvajal por su desinteresada colaboración en brindarme su apoyo, aportes y conocimiento

A mis compañeros de la cohorte 3 de la maestría en ingeniería de procesos: Lorena Caquimbo, Iván Castaño, Camilo Neira, Leonel Barbosa, Jovanny Chaparro y Victor Zambrano. Un millón de gracias a ustedes por su apoyo y acompañamiento en toda la maestría.

Contenido

RESUMEN	13
ABSTRACT	14
ABREVIATURAS.....	15
NOMENCLATURA	17
INTRODUCCIÓN	21
1. DECLARACIONES Y NECESIDADES	22
2. OBJETIVOS	23
2.1 Objetivo General	23
2.2 Objetivos Específicos.....	23
3. METODOLOGÍA	24
3.1 Organización de la tesis	25
4. ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES.....	27
4.1 Introducción	27
4.2 Ductos	27
4.3 Lean Manufacturing	28
4.3.1 Orígenes del LEAN Manufacturing	30
4.4 Metodología LEAN y el Transporte de Hidrocarburos por Ductos.....	36
4.5 Modelos Matemáticos usados en transporte de Hidrocarburos por Ducto	40
4.6 Conclusiones del capítulo	42

5. MÉTODOS PARA EL MODELAMIENTO DE DUCTOS.....	43
5.1 Introducción	43
5.2 Métodos.....	43
5.2.1 Proceso de Jerarquía Analítica (AHP – The Analytical Hierarchy Process).....	43
5.2.2 Escala de Importancia Relativa.....	44
5.2.3 Consistencia Aleatoria	45
5.3 Variables Asociadas al Proceso	47
5.3.1 Variables Físicas	47
5.3.2 Variables de Proceso.....	52
5.3.3 Variables Externas	58
5.4 Programación y Bombeo.....	59
5.5 Criterios del Proceso	60
5.6 Evaluación de Criterios y Alternativas	61
5.7 Conclusiones del Capítulo.....	63
6. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL MODELAMIENTO DEL PROGRAMA DE BOMBEO	64
6.1 Introducción	64
6.2 Condiciones y Características	64
6.2.1 Dimensión del Ducto	64
6.2.2 Características de los fluidos	66

6.2.3 Demandas diarias	67
6.2.4 Capacidades de almacenamiento	69
6.2.5 Secuencia de transporte y tamaño de los lotes.....	69
6.3 Modelamiento Matemático de Ductos	71
6.3.1 Función Objetivo	71
6.3.2 Restricciones	74
6.4 Diferencias entre otras metodologías	75
6.5 Conclusiones del Capítulo	76
7. ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS	77
7.1 Introducción	77
7.2 Datos de Estudio	77
7.3 Análisis de Datos	79
7.4 Validación del Método.....	81
7.5 Análisis y resultados	86
7.6 Conclusiones del Capítulo	89
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FUTURAS	91
8.1 Conclusiones.....	91
8.2 Recomendaciones para la implementación	93
8.3 Recomendaciones futuras	94
BIBLIOGRAFÍA	96

ANEXO A..... 101

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Metodología de desarrollo.	24
<i>Figura 2.</i> Principios básicos filosofía Lean Manufacturing	32
<i>Figura 3.</i> La Casa del Lean (Womack, Jones & Roos, 1990)	33
<i>Figura 4:</i> Ejemplo de la perspectiva Lean en el transporte por ductos, (Wilson, 2009)	40
<i>Figura 5:</i> Caracterización del petróleo dependiendo de su número de carbonos (Speight, 1994)	49
<i>Figura 6:</i> Interfaz entre dos líquidos (Chintala, 2010)	54
<i>Figura 7:</i> Ciclo para el aseguramiento de la calidad de hidrocarburos	66
<i>Figura 8:</i> Resumen Condiciones y Características para la programación de ductos	70
<i>Figura 9:</i> Filtro de desperdicios mediante metodología Lean y modelamiento matemático	71
<i>Figura 10:</i> Poliducto Argentino a ser analizado	78
<i>Figura 11:</i> Ciclo del despacho de lotes	82
<i>Figura 12:</i> Diagrama de flujo para la programación de ductos	101

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 . Primero grupo de técnicas de la filosofía Lean.....	34
Tabla 2. Segundo grupo de técnicas de la filosofía Lean	35
Tabla 3. Tercer grupo de técnicas de la filosofía Lean	35
Tabla 4. Comparación de los desperdicios Lean de los procesos productivos vs el transporte por ductos.....	37
Tabla 5. Escala de importancia relativa	45
Tabla 6. Consistencia aleatoria	46
Tabla 7. Matriz normalizada A de los criterios.....	61
Tabla 8. Matriz pesos de los criterios	61
Tabla 9. Razón de inconsistencia.....	62
Tabla 10. Resumen de resultados de los criterios	62
Tabla 11. Resumen de alternativas	62
Tabla 12. Resultado de jerarquización de alternativas.....	63
Tabla 13. Velocidades y caídas de presión máximas permisibles en ductos	65
Tabla 14. Propiedades Físicoquímicas productos a transportar.....	78
Tabla 15. Disponibilidad de refinados en Luján de Cuyo	79
Tabla 16. Costos Unitarios de bombeo por producto	79
Tabla 17. Combinaciones posibles de interfaces entre productos	80
Tabla 18. Combinaciones definitivas de interfaces entre productos.....	80
Tabla 19. Volumen de interfaces entre productos	81
Tabla 20. Volúmenes totales por productos en el horizonte de tiempo.....	82
Tabla 21. Duración por cada lote y Duración por cada ciclo.....	83

Tabla 22. Tamaño lotes de cada producto a transportar	84
Tabla 23. Programa de bombeo propuesto	84
Tabla 24. Resultados finales del programa de bombeo planteado.....	85
Tabla 25. Resultados finales de tamaño de los planteados por (Cafaro V, Cafaro D,Méndez & Cerdá, 2015).....	86
Tabla 26. Comparación volúmenes obtenidos por el modelo matemático planteado vs modelo matemático (Cafaro V, Cafaro D,Méndez & Cerdá, 2015)	87
Tabla 27. Comparación costos de transporte modelo planteado vs modelo de (Cafaro V, Cafaro D,Méndez & Cerdá, 2015).....	87
Tabla 28. Comparación consumo energético de transporte modelo planteado vs modelo de (Cafaro V, Cafaro D,Méndez & Cerdá, 2015)	88
Tabla 29. Volúmenes arbitrarios de lotes	88
Tabla 30. Comprobación del modelo matemático	89

RESUMEN

Un ducto es una de las maneras más prácticas de transportar hidrocarburos de distintas especificaciones fisicoquímicas a refinerías o puertos de exportación con el fin de cumplir una demanda en un tiempo determinado. Por lo tanto, es necesaria la programación de bombeo de hidrocarburos líquidos, considerada una de las tareas más difíciles en el transporte por ductos debido al requerimiento de conocimientos logísticos, de calidades de productos, hidráulica de sistemas de bombeo y uno de los más complejos, lograr el cumplimiento de dicho programa por parte de los operadores de SCADA. El presente trabajo desarrolla alternativas para disminuir la complejidad de la desviación por incumplimiento del programa de bombeo, generada por el factor humano mediante la implementación de herramientas y técnicas de la metodología Lean, facilitando la identificación de aquellos “desperdicios” que generan un incremento en el consumo energético y como consecuencia mayores costos de transporte. La herramienta desarrollada en esta tesis, es soportada en un modelo matemático que describe la programación de un ducto real involucrando el transporte de cinco productos del destilado del petróleo en un horizonte de tiempo. La metodología desarrollada permite al programador interactuar y determinar las condiciones necesarias para la solución de situaciones del programa de bombeo consolidando acciones que disminuyen riesgos y costos en la operación en un 75% puesto que el planteamiento metodológico permite reducir hasta en 30 minutos el desfase del programa de bombeo vs lo ejecutado por el operador de cuarto de control.

Palabras Clave: Metodología Lean, programación de bombeo, sistemas hidráulicos, petróleo, transporte por ductos.

ABSTRACT

A pipeline is one of the most practical ways to transport hydrocarbons of different physicochemical specifications to refineries or export to other countries in order to meet a demand in a given time. For this, it is necessary to program pumping liquid hydrocarbons, considered one of the most difficult tasks in pipeline transportation due to the requirement of logistics knowledge, product quality, pumping system hydraulics and one of the most complex, to achieve the fulfillment of that program by the SCADA operators. This work aims to mitigate the complexity of the deviation due to non-compliance of the program generated by the human factor, through the implementation of tools and techniques of the Lean manufacturing methodology, which facilitate in the identification of those "waste" that generate an increase in the energy consumption and consequently higher transport costs. The tool developed in this thesis, will allow the programmer to interact directly with the operation and the operator to interact directly with the development of the pumping program 75% because the methodological approach allows to reduce up to 30 minutes the lag of the pumping program vs what is executed by the control room operator.

The mathematical model has successfully solved the scheduling of a real pipeline involving the transportation of five petroleum distillate products over a 10-day time horizon previously programmed by another mathematical model.

Keywords: Lean Methodology, Continuous Improvement, multiproducts, Pumping Schedule, Interfaces, Hydraulic Systems, Analytic Hierarchy Process, Oil, Pipeline Transport.

ABREVIATURAS

AHP	Análisis Jerárquico de Procesos
API	Instituto Americano del Petróleo
ASTM	Sociedad Americana de Pruebas y Materiales
BBL	Barril
BPH	Barriles Por Hora
BS&W	Sedimentos Básicos y Agua
CH	Relación Carbono/Hidrogeno
D.H	Desfase Horario
DRA	Agente Reductor de Fricción
GLP	Gas Licuado del Petróleo
HR	Hora
IC	Índice de Consistencia
JIT	Justo a Tiempo
MILP	Integración Lineal Múltiple
R.H	Relación Horaria
RI	Razón de Inconsistencia
RVP	Presión de Vapor Reid
SCADA	Supervisión, Control y Adquisición de Datos
SG	Gravedad Específica

SMED Cambio de Matriz en Menos de 10 Minutos

SUS Segundos Seybold

TPM Mantenimiento Productivo Total

NOMENCLATURA

A	Matriz de Importancia
A'	Matriz Normalizada
A_i, B_i	Constantes para la determinación de la presión de vapor
A_T	Área transversal de la tubería por donde transita la interfaz
atm	Presión atmosférica
$B_{i...n}^*$	Tamaño del lote hipotético
°C	Grados Celcius
C_i	Concentración del producto i
cSt	Centistokes
d_c	Duración horaria del ciclo de despacho de productos
d_i	Diámetro interno de la tubería de análisis
D	Diámetro de la tubería
D_c	Duración diaria del ciclo
$\frac{dM}{dt}$	Variación diferencial de la masa con respecto al tiempo
e	Rugosidad de la tubería
°F	Grados Fahrenheit
f_i	Factor de fricción en la tubería de análisis
Fk	Flujo de salida de un proceso

F_n	Flujo de entrada a un proceso
h_{fs}	Pérdidas por fricción en la succión de la bomba.
h_{fsd}	Pérdidas por fricción en la descarga de la bomba
H_n	Cabeza Dinámica Total
h_{std}	Cabeza estática en la descarga de la bomba
h_{sts}	Cabeza estática en la succión de la bomba
$Inv_{i...n}$	Inventario Actual del producto i
$Inv_{max\ i...n}$	Inventario máximo del producto i
$Inv_{min\ i...n}$	Inventario mínimo del producto i
$K(C_i)$	Coefficiente de dispersión axial
L	Longitud de la tubería
L_i	Longitud de la tubería de análisis
n	Tamaño de la Matriz
$P_{i...n}$	Volumen de producto recibido por mes
$p_{i...n}$	Volumen de producto recibido por día
P^{vap}	Presión de Vapor
	Psi/100ft Caída de presión en una tubería por cada 100 pies
$q_{lote\ i...n}$	Número de lotes de cada producto
Q_n	Flujo volumétrico manejado por la estación de bombeo
Re	Número de Reynolds

t	Tiempo de corte de la interfaz
T	Temperatura
t_f	Tiempo que tarda en llegar el punto final de la interfaz en el punto de medición
t_i	Tiempo que tarda en llegar el punto inicial de la interfaz en el punto de
$t_{lote\ i...n}$	Tiempo de duración del lote
U_z	Velocidad media del fluido
U_{zi}	Velocidad del fluido en la tubería de análisis
U_{zn}	Velocidad de la interfaz
$V_{interfaz}$	Volumen máximo de la interfaz
W	Matriz de Pesos Relativos
x	Longitud de la tubería donde se realiza el corte de la interfaz
ΔP	Caída de presión en tuberías
$\frac{\partial c_i}{\partial t}$	Variación diferencial de la concentración con respecto al tiempo
λ_{max}	Valor Característico Promedio
μ	Viscosidad dinámica
η_n	Eficiencia de la bomba. Especifica del equipo.
ρ	Densidad
ρ_i	Densidad del fluido en la tubería de análisis
ρ_n	Densidad del fluido que está siendo bombeado por la estación

ν Viscosidad cinemática

$\#_{ciclos}$ Número de ciclos al mes

INTRODUCCIÓN

El siguiente trabajo tiene como objetivo plantear una metodología a través de un modelo matemático que contribuya al mejoramiento operativo en ductos mediante el análisis y ejecución de la programación de bombeo teniendo como base la implementación de la metodología LEAN. Para ello, son consideradas las variables de proceso de la operación y las desviaciones que existen en la operación por actores externos. Posteriormente, son planteados indicadores para la mejora del proceso de transporte mediante la metodología de mejoramiento continuo LEAN. Por último, es presentado un modelo matemático que describa la operación y la metodología, además de la validación a través de un caso de estudio que permita realizar la comparación de la energía utilizada en el proceso, teniendo en cuenta los resultados en dos panoramas: sin la aplicación y con la aplicación de la metodología. Como resultado del análisis se concluye que para el cálculo de costo energético se presenta una sintonía del modelo matemático del 100% con lo planteado por (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015) realizando la comparación de las distintas variables de proceso.

Es importante tener en cuenta la determinación de las interfaces generadas en el transporte y las posibles combinaciones entre los productos. Lo anterior, con el fin de tener la menor interfaz para aquellos productos que por requerimiento el tamaño de sus lotes está por debajo del 2% del total del ciclo.

1. DECLARACIONES Y NECESIDADES

Según (CAMPETROL, 2015), las variaciones de volúmenes de producción de hidrocarburos han dejado ver la dificultad de contar con el tiempo suficiente para analizar las distintas variables operativas, presupuestales y de necesidad para ajustar a una correcta forma la operación de un ducto. Lo anterior se debe no solo a la fluctuación del precio del petróleo sino también a la producción de crudos más pesados y a la necesidad de transportar de una manera más eficiente y eficaz. La falta de tiempo para realizar dichos análisis, está ocasionando que distintas variables del proceso como flujos, calidades de crudos, programación de bombeo del ducto, consumo energético y de reductores de fricción se salgan de rango haciendo un transporte ineficiente generando gastos adicionales para la compañía.

De acuerdo a (Hernández & Vizán, 2013), la filosofía Lean Manufacturing es una filosofía de trabajo, basada en las personas, que define la forma de mejora y optimización de un sistema de producción focalizándose en identificar y eliminar todo tipo de “desperdicios”. Con lo anterior se plantea la necesidad de generar una propuesta de un modelo matemático que permita tener un mejoramiento operacional mediante los parámetros de la programación del bombeo en un ducto teniendo como base para una correcta operación.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Desarrollar una propuesta metodológica para la mejora operacional en ductos mediante análisis de programa de bombeo utilizando la filosofía LEAN

2.2 Objetivos Específicos

- Estudiar la metodología LEAN y su aplicación en el transporte de hidrocarburos por ductos.
- Identificar las variables de proceso, de operación, externas y su técnica de medición y análisis.
- Establecer las condiciones iniciales-base que caracterizan el proceso.
- Modelar matemáticamente la operación de bombeo en ductos teniendo en cuenta las variables y condiciones iniciales-base
- Desarrollar una propuesta metodológica para la potencialización de la función objetivo a través del consumo energético y conceptos LEAN.

3. METODOLOGÍA

El presente trabajo se soporta en modelos cuantitativos que describan la operación de transporte, de manera específica el programa de bombeo. A continuación, se muestra la metodología de desarrollo:

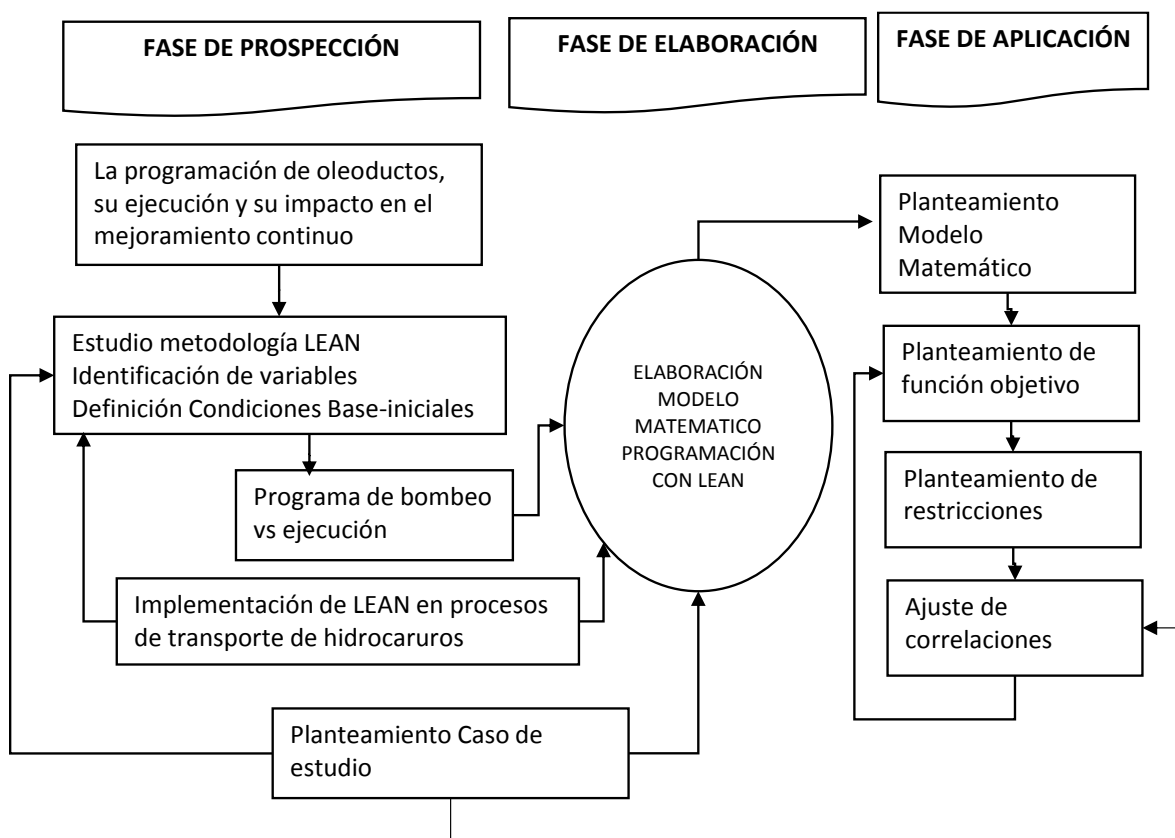


Figura 1. Metodología de desarrollo.

Fuente: Elaborado por el autor (2017)

3.1 Organización de la tesis

Como primer paso, fue desarrollada una etapa de revisión de la literatura en donde fueron establecidos los conceptos fundamentales de la filosofía LEAN y la operación, donde se describe los orígenes de la metodología, sus principios básicos y la manera de cómo materializar la implementación en cualquier proceso. Por otra parte, se menciona la relación que existe entre LEAN como filosofía y la programación de ductos mediante la utilización de herramientas para tal fin.

Posteriormente en el capítulo 2, son presentadas las variables de proceso para la programación de ductos, siendo descritas las variables físicas de los fluidos requeridas como densidad, viscosidad y presión de vapor. Adicionalmente, se describen las variables de proceso necesarias para la mejora continua de la programación y operación de ductos; entre ellas se encuentran: control de inventarios en tanques, control de interfaces y el dimensionamiento de los lotes a transportar.

Una vez identificadas las variables para la programación por ductos, se determinan las condiciones base-iniciales para el proceso importantes como lo son: el dimensionamiento del ducto, velocidades máximas permisibles, caídas de presión, la característica de los fluidos, las demandas diarias, la capacidad de almacenamiento, la secuencia y tamaño de los lotes.

En el capítulo 4 se define la elaboración de un modelo matemático para el mejoramiento continuo de la programación de ductos, se plantea una función objetivo que considera minimizar el consumo energético cumpliendo una serie de restricciones como la reducción del volumen de las interfaces generadas por el transporte en ductos, inventarios de tanques y el cumplimiento del programa de bombeo.

Finalmente, se plantea un caso de estudio de la metodología LEAN y la programación de ductos identificando los desperdicios planteados por la filosofía y realizando una comparación entre un proceso productivo y un programa de bombeo. Se genera una memoria de cálculo con el fin de mitigar los desperdicios planteados por la metodología, realizando un análisis y discusión de los resultados obtenidos.

4. ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES

4.1 Introducción

Este capítulo reúne y organiza la información relacionada con la descripción de un ducto, la metodología Lean Manufacturing y como se identifican los conceptos de estudio para el desarrollo del modelo. Además, de su aplicabilidad como metodología en el transporte de hidrocarburos por ductos. Se abordará conceptos claves como LEAN, transporte por ductos y modelos matemáticos usados en la programación.

4.2 Ductos

Según lo planteado por (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015), las dos formas más eficientes de transportar hidrocarburos en grandes volúmenes son los buques y las tuberías. En comparación con el transporte de agua, los ductos operan las 24 horas del día en todas las estaciones bajo casi todas las condiciones climáticas, a un determinado costo de operación. Los oleoductos conectan las áreas aisladas de producción de petróleo crudo con las refinerías o puertos de exportación, mientras que los poliductos son ductos que transportan productos refinados conectando estas instalaciones con las principales regiones pobladas, transportando grandes volúmenes de diferentes productos refinados. En Colombia existe una red de 8.500 kilómetros de poliductos y oleoductos, que van desde los centros de producción hasta las refinerías y puertos en los océanos Atlántico (Coveñas y Santa Marta) y Pacífico (Buenaventura y Tumaco). Se cuenta con 53 estaciones de bombeo las cuales aportan la energía suficiente para entregar el producto hidrocarburo a lo largo de la geografía colombiana (ECOPETROL, 2014)

En Colombia los principales ductos trabajan, en la actualidad a un 60% de su capacidad operativa con el fin de tener capacidad para nuevos descubrimientos (ECOPETROL, 2014). Desde un Cuarto de Control Central, los operadores de los ductos administran los flujos de producto,

arrancan y detienen las bombas, abren y cierran las válvulas y siguen los lotes a lo largo de la red de tuberías (Trench, 2001). Tales tareas deben planearse eficazmente para reducir el consumo de energía, siendo este último el mayor costo de operación de un ducto. Dado que los diferentes productos de hidrocarburos son bombeada espalda con espalda en la misma tubería (rara vez con dispositivos de separación), se produce cierta mezcla conocida como interfaz. De hecho, al tener los tamaños de lote más pequeños hacen que las pérdidas por interfaz sean más significativas, mientras que algunas secuencias de productos están prohibidas. La planeación de las operaciones implican varias decisiones como la secuencia de productos a inyectar en los nodos de origen, los tamaños de lotes, los tiempos de inicio / final de cada inyección y la secuencia de entregas del producto, entre otros. (Siswanto, Essam & Sarker, 2011). Plantea que, los problemas de programación de transporte se pueden dividir en sub-problemas que se resolverán secuencial o simultáneamente: selección de ruta, secuenciamiento de los lotes y procedimientos de actividades de bombeo.

4.3 Lean Manufacturing

De acuerdo a (Hernández & Vizán, 2013), el término “Lean Manufacturing” es una filosofía de trabajo, basada en las personas, que define la forma de mejora y optimización de un sistema de producción focalizándose en identificar y eliminar todo tipo de “desperdicios”, definidos éstos como aquellos procesos o actividades que usan más recursos de los estrictamente necesarios. Para lo anterior, se puede llegar a identificar distintos tipos de “desperdicios” dentro de una cadena de abastecimiento desde la planeación, el abastecimiento, la producción, transporte, y la logística inversa; los cuales no generan valor agregado ni al proceso ni al cliente.

Para alcanzar sus objetivos una metodología sistemática y habitual de un conjunto de técnicas que cubren la totalidad de las áreas de la cadena de abastecimiento que van desde la organización

del puesto de trabajo, la gestión de la calidad, flujo continuo de producción hasta el mantenimiento de equipos (Liker, 2004)

Conforme a la investigación (Rajadell & Sánchez, 2010), Lean Manufacturing no es un concepto estático, está en constante movimiento generando valor mediante la combinación de técnicas y aplicaciones de estudios al proceso a analizar apoyada por la dirección y apuntando a la necesidad de la compañía.

Así pues, el objetivo final de la metodología Lean Manufacturing es, generar una cultura en el mejoramiento continuo basada en la comunicación y en el trabajo en equipo (Hernández & Vizán, 2013), para ello es indispensable aplicar el método a cada caso específico y hacer partícipe a las personas que están contribuyendo en el proceso.

(Shalloway, Beaver & Trott, 2009) Presenta su punto de vista en el desarrollo de software de Lean el cual apunta a minimizar la complejidad y la reelaboración. (Puttonen, 2015) Se basa en lo planteado por (Shalloway, Beaver & Trott, 2009) mediante un proyecto con la implementación de la metodología Lean en un sistema de transporte por tubería. El proyecto comenzó con cuatro áreas piloto, que se hicieron una tras otra. Se generó un cambio de ritmo rápido, la primera versión del piloto se realizó por primera vez al cliente interno quienes luego realizaron comentarios y cambios. Todos estos cambios necesitaban ser probados y verificados antes de que pudieran ser liberados en el sistema. Además del entorno de producción, el cliente también quería tener sus propias pruebas.

El proyecto también necesitaba tener su propio entorno de pruebas interno. Por lo tanto, había cuatro entornos diferentes que debían funcionar de manera similar. Después de revisar los métodos, prácticas, las necesidades y el contexto del proyecto, se decidieron los requisitos para el

desarrollo del transporte por tubería. Para un mejoramiento de la tubería fue necesario para cumplir con los siguientes requisitos:

- Cada cambio debe ser revisado y las pruebas automatizadas deben ser ejecutadas
- El proceso de instalación y actualización debe estar automatizado

Se consideró que estos requisitos eran lo suficientemente pequeños como para ser implementados con los recursos disponibles, y cubrían las necesidades para el mejoramiento continuo de la tubería.

4.3.1 Orígenes del LEAN Manufacturing

El término Lean Manufacturing fue introducido por (Womack, Jones & Roos, 1990) en el libro “La Máquina que Cambio el Mundo” donde en una investigación de cinco años se midió el desempeño de la industria automotriz mundial. Aquí se analizó lo relacionado a la “producción pobre” (Womack, Jones & Roos, 1990).

Las metodologías Lean han sido implementadas desde la Segunda Guerra Mundial (Womack, Jones & Roos, 1990) El primer caso de implementación de la metodología Lean Manufacturing fue en el Sistema de producción de Toyota (Ohno, 1988). De acuerdo a (Morgan & Liker, 2006) , en el momento en que Toyota implementó la metodología se comenzó con el desarrollo de nuevos productos. Esta versión de Lean se llamó Sistema de Desarrollo de Producto Toyota.

El Sistema de Desarrollo de Producto Toyota comenzó como parte de una estrategia para sobrevivir en el mercado naciente de vehículos desarrollado por Taiichi Ohno vicepresidente de Toyota, como necesidad de conservar el capital, eliminar los desechos, reducir inventarios y

reducir los tiempos de producción y operativos incrementando la calidad del producto final en un menor tiempo.

(Liker, 2004) En su libro “The Toyota Way”, resumen la filosofía Lean Manufacturing en 14 principios básicos requeridos para el desarrollo de la metodología en cualquier industria:

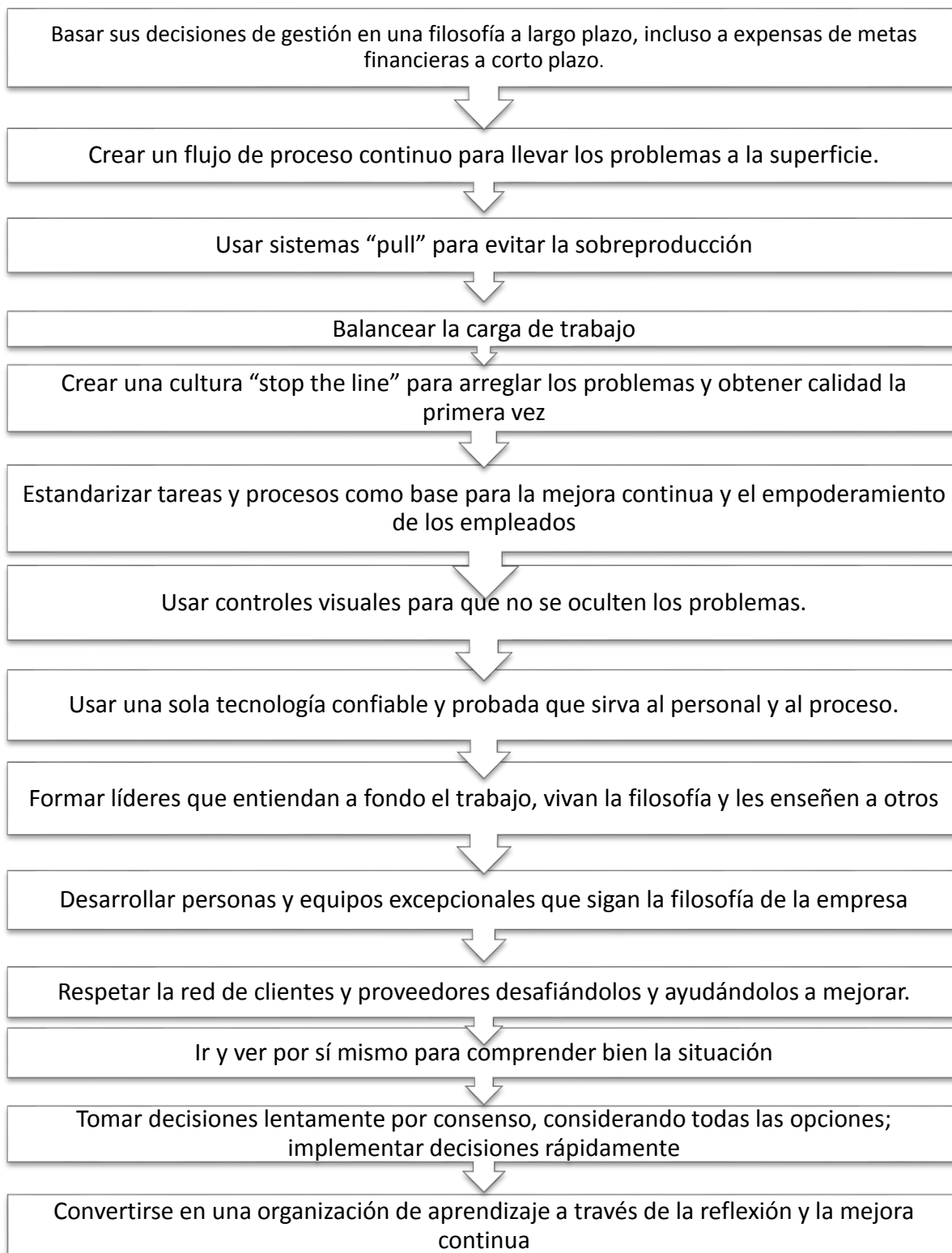


Figura 2. Principios básicos filosofía Lean Manufacturing
Fuente: Elabora por el autores (2017)

De acuerdo a lo planteado por (Hernández & Vizán, 2013), se genera de forma un esquema de sistema de producción para visualizar y analizar la filosofía Lean y las técnicas disponibles para su aplicación

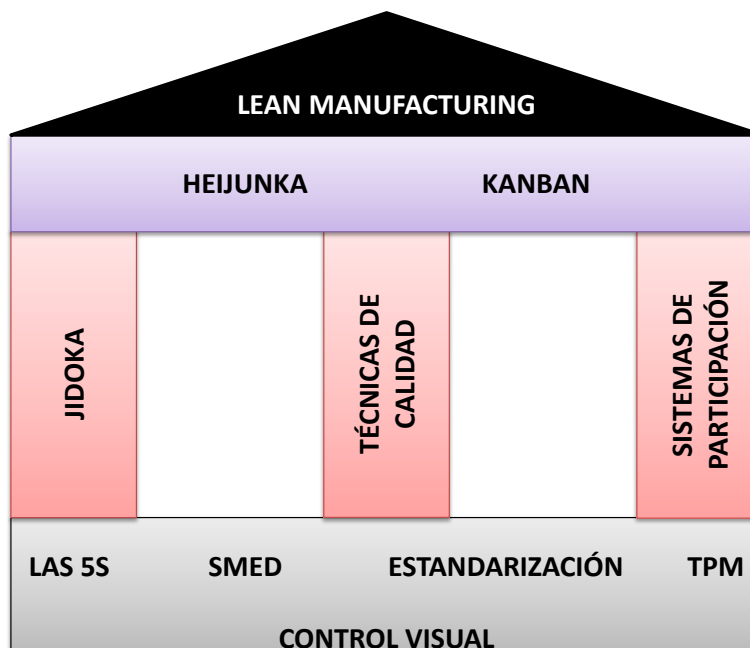


Figura 3. La Casa del Lean (Womack, Jones & Roos, 1990)

Para que la filosofía Lean se materialice es necesario la aplicación de las distintas técnicas ya sea de forma independiente o conjunta. Para lo anterior (Hernández & Vizán, 2013), agrupan las técnicas en tres grandes grupos. El primero grupo se caracterizan por ser técnicas claras, y con una alta posibilidad real de implementación. La base, o suelo de la casa, estaría constituida por una actitud de mejora continua y de eliminación sistemática de desperdicios, desarrolladas y asumidas a todos los niveles de la organización. Ellas son:

Tabla 1 . Primero grupo de técnicas de la filosofía Lean

<i>Las 5S</i> (Hernández & Vizán, 2013)	Mejoramiento de las condiciones del puesto de trabajo de la empresa mediante la organización, orden y limpieza.
<i>SMED</i> (Hernández & Vizán, 2013)	Técnica para la disminución de los tiempos de preparación.
<i>Estandarización</i> (Hernández & Vizán, 2013)	Técnica enfocada en la elaboración de instructivos escritos o gráficos los cuales sugieren la mejor manera de hacer las cosas.
<i>TPM</i> (Hernández & Vizán, 2013)	Técnica basada en el mantenimiento productivo total, busca eliminar las perdidas por tiempos muertos en las paradas de maquinaria.
<i>Control Visual</i> (Hernández & Vizán, 2013)	Técnica que por medio de una comunicación visual facilita a los empleados conocer el avance y estado de las acciones de mejora.

Fuente: (Hernández & Vizán, 2013). Adaptado por el autor 2017

(Hernández & Vizán, 2013)Plantean un segundo grupo de técnicas está formado por aquellas que requieren un mayor compromiso y asociado a ello, un cambio cultural de los empleados incluyendo a los directivos. La estabilidad en los procesos, equipos, estándares de trabajo o estrategias constituyen los cimientos sobre los que es posible construir la “Casa Lean”. Este segundo grupo está conformado por:

Tabla 2. Segundo grupo de técnicas de la filosofía Lean

<i>Jidoka</i> (Hernández & Vizán, 2013)	Esta técnica incluye en las maquinas dispositivos y sistemas que ayudan a detectar errores producidos en el proceso
<i>Técnicas de calidad</i> (Hernández & Vizán, 2013))	Técnicas basadas en sistemas de gestión de calidad buscando la disminución y eliminación de defectos.
<i>Sistemas de Participación del Personal</i> (Hernández & Vizán, 2013)	Técnica basada en la formación de grupos de trabajo los cuales canalizan y supervisan la mejora continua de la filosofía Lean.

Fuente: (Hernández & Vizán, 2013). Adaptado por el autor 2017

El último grupo de acuerdo a (Hernández & Vizán, 2013) se centra en la modificación de las técnicas de planear, programar y controlar los medios de producción y la cadena de logística. El tejado de la casa representa los objetivos que persigue la Metodología Lean: reducir los costes de producción, reducir los tiempos de entrega y aumentar los niveles de calidad, mejora continua de los procesos. Dichas técnicas están fundadas en técnicas de Justo a Tiempo.

Tabla 3. Tercer grupo de técnicas de la filosofía Lean

<i>Heijunka</i> (Hernández & Vizán, 2013)	Técnica que apoya la planeación y nivelación de la demanda de clientes, volumen y variedad llevando el proceso a un flujo continuo.
<i>Kanban</i> (Hernández & Vizán, 2013)	Técnica centrada en la sincronización de la producción mediante tarjetas.

Fuente: (Hernández & Vizán, 2013). Adaptado por el autor 2017

4.4 Metodología LEAN y el Transporte de Hidrocarburos por Ductos.

Los ductos se han usado en la industria petrolera durante los últimos 40 años para el transporte de petróleo crudo y de sus derivados (gasolinas, diésel, keroseno, naftas, etc). Para el transporte por ductos de los anteriores productos, durante los últimos 30 años se ha focalizado el desarrollo de herramientas para la programación relacionada en la distribución de productos generando altos costos anuales en el transporte de hidrocarburos (MirHassani & Ghorbanalizadeh, 2008)

(Liker, 2004) Propone la producción celular, este proceso de producción es basado en el Justo a Tiempo (JIT) y en la filosofía Lean enmarcado en un grupo tecnológico y de desarrollo de softwares. La meta de la producción celular es moverse lo más rápido posible, generando una gran cantidad de productos generando el menor desperdicio posible. Dicha producción usa múltiples “células” en una línea de producción. Cada una de las células está conformada por una o varias máquinas con una tarea específica. El producto se mueve de célula a célula, donde en cada estación se completa el proceso de manufactura.

De otro modo, la operación de distribución y transporte de productos del petróleo y sus derivados puede ser realizado utilizando carrotanques, buques, ferrocarriles y tuberías. Este último, es el usado comúnmente para enviar el petróleo crudo desde los pozos de perforación hacia las refinerías. El transporte por tubería es el medio más económico cuando se requieren bombear grandes volúmenes y distancias muy largas (Liker, 2004)

La tarea de transporte por tubería debe planearse y programarse de una manera eficaz con el fin de reducir el consumo de energía asociada al transporte (bombeo), el costo de operación de los ductos de hidrocarburos y el aprovechamientos de los recursos disponibles. Debido a que los diferentes productos del petróleo son bombeados uno tras de otro en la misma tubería, se generan las interfaces. Es importante tener en cuenta que si se tienen tamaños más pequeños de lotes se

generan pérdidas en las interfaces más grandes. Por otra parte, es importante la secuencia en la que son programados los lotes, ya que algunas de las secuencias están prohibidas debido a los frentes de contaminación que se pueden generar.

Según (Siswanto, Essam & Sarker, 2011) el planteamiento operativo para la programación de un ducto involucra el mejoramiento continuo de la secuencia de los lotes de los productos a bombear, los tamaños de los lotes, los tiempos de bombeo de cada lote, entre otros. La programación de ductos genera cuatro sub-problemas los cuales se pueden resolver secuencial o simultáneamente. Selección de rutas, procedimientos de actividades en la programación, carga y descarga del petróleo.

La metodología LEAN busca eliminar todo tipo de “desperdicios” en un proceso operativo o de producción (Hernández & Vizán, 2013). Existen 7 conceptos de “desperdicios” Lean en un proceso productivo que son similares en el transporte por ductos:

Tabla 4. Comparación de los desperdicios Lean de los procesos productivos vs el transporte por ductos.

DESPERDICIO	PROCESO PRODUCTIVO	TRANSPORTE POR DUCTOS
Sobreproducción	Producir más de lo demandado o producir algo antes de que sea necesario.	Aumento del bombeo por encima de las nominaciones programadas para las entregas en los puntos de destino
Defectos	Consumo de materiales, mano de obra para reprocesar y/o atender las quejas, puede provocar insatisfacción en el cliente.	Aumento de las interfaces entre lotes por mal secuenciamiento de los productos
Esperas	Espera de material, información, máquinas, herramientas, retrasos en el proceso de lote, averías, cuellos de botella	Retrasos en la entrega de productos en los puntos de destino
Transporte	Movimientos innecesarios de productos y materias primas, se trata de un desperdicio que no aporta valor añadido al producto.	Variabilidad en los flujos de bombeo. Cualquier movimiento innecesario del producto no genera un valor agregado y sí un consumo energético.
Procesos inapropiados	Un cambio en el producto sin que haya un cambio en el proceso.	Cambios en las nominaciones o manejo de contingencias que

DESPERDICIO	PROCESO PRODUCTIVO	TRANSPORTE POR DUCTOS
	Los requerimientos del cliente no son claros. Aprobaciones o supervisiones innecesarias.	cambie constantemente el proceso de transporte y por ende el programa de bombeo
Exceso de inventario	Stock acumulado por el sistema de producción y su movimiento dentro de la planta, que afecta tanto a los materiales, como piezas en proceso, como producto acabado.	Mala programación del despacho de los lotes y por ende afectación en los recibos de los clientes de acuerdo a los volúmenes nominados
Desperdicios al medio ambiente	Emisiones o energía desperdiciada que puede ser útil en otro proceso.	Aumento de consumo energético en el transporte de productos por ductos debido a la no ejecución del programa de bombeo

Fuente: Adaptado por el autor 2017

Existen varias herramientas para realizar la programación de ductos: Programación matemática, heurística entre otras. De acuerdo a (Ball, Dickerson & Hertel, 2011) la programación de ductos en el mundo real se basa a menudo en hojas de trabajo simples que asumen un caudal fijo a lo largo de la tubería, con el fin de realizar un seguimiento fácil a los lotes en movimiento.

La programación de bombeo de ductos ha estudiado sistemas estructurados de redes de gasoductos y ductos conectando refinерías, estaciones de distribución, terminales costa afuera (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015) Para lo anterior, se plantean indicadores claves de rendimiento los cuales apoyan la determinación del mejor horario de transporte que satisfaga todos los requisitos de flujo mínimo de bombeo, interfaces entre productos de diferentes calidades, capacidad de transporte ociosa y los costos asociados a los inventarios (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015) Existen varias alternativas para transportar un lote de petróleo crudo de una estación de entrada hasta el destino asignado.

La programación correcta de un ducto que maneja productos de distintas calidades, es una clave para evitar los problemas de altos inventarios tanto de las estaciones de distribución como en los terminales, reducción de costos de bombeo asociados a los altos consumos energéticos, el

incremento de las interfaces entre productos (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015) Usando un Problema de Integración Lineal Múltiple (MILP) donde se formule el tamaño del lote, la secuencia de los productos, los flujos de bombeo, se puede llegar a determinar cuál de los productos almacenados puede estar en continuo control (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015).

De acuerdo a (Choudhury, Jain & Shah, 2008), el control de proceso o de una operación es posible solo si existe algún tipo de retroalimentación sobre el rendimiento los resultados. Dicho control se debe dar mediante la medición de la salida real y compararla con la salida deseada y así determinar el rendimiento del proceso o de la operación. Los datos obtenidos de dicha comparación son un cálculo denominado Indicadores Clave de Rendimiento y pueden servir al mejoramiento continuo de las operaciones. El uso de los Indicadores de Clave de Rendimiento ayuda a mantener una calidad del trabajo, pero se debe tener en cuenta que dichos indicadores varían de ducto a ducto.

Los datos relacionados con los Indicadores Clave de Rendimiento ayudan a guiar el debate y la toma de decisiones estratégicas sobre la producción Lean. Oil Coys en Nigeria se centra en indicadores de rendimiento como el retorno total de los accionistas, producción disponible para la venta, así como la disponibilidad de equipos. Los procesos Lean son identificados para llevar a cabo acciones, ya que el desempeño se relaciona con la calidad del servicio y la satisfacción del cliente (Uzochukwu & Ossai, 2016).

De acuerdo a (Wilson, 2009) la implementación de la filosofía Lean en el sector petrolero genera una transformación cultural la cual tiene el potencial para generar un valor significativo en cualquier operación y poder establecer un ambiente de trabajo más seguro. Al implementar la filosofía Lean en una refinería se logró:

- Reducción de las fallas en la puesta en marcha de los equipos de un 3.5% a un 1%

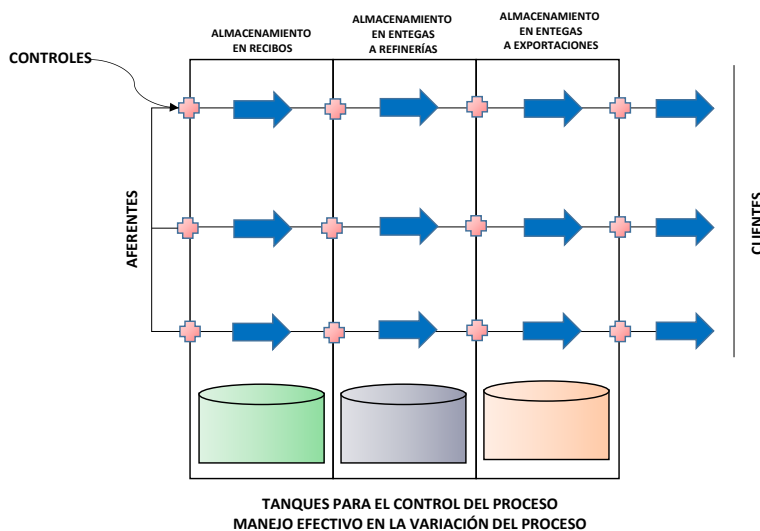


Figura 4: Ejemplo de la perspectiva Lean en el transporte por ductos, (Wilson, 2009)

4.5 Modelos Matemáticos usados en transporte de Hidrocarburos por Ducto

A continuación, se presentan los principales modelos desarrollados para la programación de ductos. Los modelos describen conceptos que permiten representar situaciones y factores fundamentales para la toma de decisiones importantes.

(Hane & Ratliff , 1995), Plantean un modelo MILP (Programación Lineal Entera Mixta por sus siglas en ingles) el cual consistente en programar envíos de paquetes de productos ordenados de mejor a peor calidad. De esta manera, el producto contaminado siempre queda en el tanque de producto de menor calidad. Uno de los posibles tratamientos del problema del ducto de topología lineal, consiste en considerar el tiempo como una variable discreta.

(Rejowski & Pinto, 2003)Al igual que (Hane & Ratliff , 1995) plantean un modelo MILP cuya función objetivo es la suma de los costos asociados al bombeo, almacenamiento y a la formación de interfaces. En el modelo, los lotes que se envían desde la estación de inicio deben ser múltiplos de una determinada cantidad. La aplicación práctica de la formulación se realiza para ductos con

una refinería y cinco terminales en un horizonte de tiempo de 75 horas dividido en 15 periodos de 5 horas cada uno de ellos.

(Magatão, Arruda & Neves, 2004) Propone una metodología de programación lineal entera para un problema con una refinería, una tubería y un puerto. La función objetivo planteada por (Magatão, Arruda & Neves, 2004) es minimizar los costos totales asociados al transporte por ductos. Dentro de dichos costos están: costos asociados a la separación de productos y al bombeo. El modelo se plantea para un horizonte de tiempo de 25 horas.

(Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015) Al igual que (Rejowski & Pinto, 2003) proponen la minimización de los costos asociados al bombeo, a almacenamiento y de formación de interfaces para un ducto lineal sin hacer ninguna salvedad en el tamaño de los lotes (puede ser un valor cualquiera). Dentro del modelo se permite la posibilidad que existan secuencias de productos no permitas.

(Sasikumar, Prakash, Patil, & Ramani, 1997) plantea un modelo basado en inteligencia artificial, mediante un método heurístico e iterativo para encontrar una solución factible.

(Camacho, Ridao, Ternero, & Rodriguez, 1990) Estudia ductos con varios terminales y con distintas ramificaciones. El objetivo en este caso no es programar el ducto, sino obtener la forma de operación adecuada de los diferentes equipos de bombeo para minimizar el costo energético. Como metodología de cálculo se requiere como dato de entrada: la secuencia de productos (cantidad y destino). Las ventajas que tienen los modelos continuos versus los modelos discretos es que se puede formular un número menor de variables binarias y por lo tanto un modelo matemático menos complejo.

4.6 Conclusiones del capítulo

La metodología LEAN es aplicable 100% al proceso de transporte de hidrocarburos por ductos gracias a la identificación clara de los desperdicios generados en la programación errónea. Para lo anterior, se debe tener claro cuáles son aquellos desperdicios que generan el mayor impacto en el transporte, y mediante técnicas de identificación propuestas por la filosofía generar herramientas de mejora que ayuden a mitigar los problemas y optimizar la función objetivo planteada por cualquier modelo matemático.

Por otra parte, se puede observar dentro de los modelos matemáticos analizados, que dentro de lo más importante es el ordenamiento de los productos para reducir los frentes de contaminación. Es importante para cada una de las metodologías tener claro que se debe contar con condiciones operativas estables, lo cual aporta a la reducción de los desperdicios planteados por Lean. Es importante tener claro todos aquellos requerimientos para la correcta programación de bombeo teórica del ducto como lo son las nominaciones, los flujos a bombear, los inventarios de cada producto, las restricciones de orden de los lotes, entre otras condiciones.

5. MÉTODOS PARA EL MODELAMIENTO DE DUCTOS

5.1 Introducción

En el siguiente capítulo son identificadas las distintas variables para el modelamiento de ductos. Se plantea como metodología de selección de alternativas el Proceso Jerárquico Analítico teniendo como base los modelos matemáticos planteados en el capítulo anterior. Se definirá el método AHP, escala de importancia relativa y consistencia aleatoria. Se definirán las variables para el desarrollo de las matrices de los criterios de selección.

5.2 Métodos

5.2.1 Proceso de Jerarquía Analítica (AHP – The Analytical Hierarchy Process)

El Proceso de Análisis Jerárquico fue desarrollado por (Saaty, 1980) con el fin de resolver problemas complejos de criterios múltiples. En el proceso se requiere que quién tome las decisiones realice evaluaciones subjetivas respecto a la importancia relativa de cada uno de los criterios y que, posteriormente, se especifique su preferencia con respecto a cada una de las alternativas de decisión para cada criterio.

El Análisis Jerárquico permite organizar eficiente y gráficamente la información respecto a un problema con el fin de posteriormente descomponer dicha información y poder ver los efectos a cualquier nivel. De acuerdo a (Saaty, 1980) el AHP se fundamenta en disgregar un problema y luego unir todas las soluciones de los distintos problemas en una conclusión. Como causas para plantear la metodología se tiene:

- Representación del problema mediante identificación de meta, criterios, subcriterios y alternativas.
- Priorización de elementos
- Comparaciones binarias entre elementos.
- Evaluación de los elementos mediante la asignación de un peso
- Clasificación de las alternativas de acuerdo al peso dado
- Síntesis
- Análisis de sensibilidad.

5.2.2 Escala de Importancia Relativa

(Saaty, 1980) Propuso para el método de AHP una Escala de Importancia Relativa. Con ella se designan las calificaciones para la comparación entre matrices no solo para los criterios de selección sino también para las matrices de selección de alternativas. Se debe tener en cuenta la importancia de un criterio contra otro, mediante la valoración en las que se incorporen las preferencias del decisor a través de la emisión de juicios en comparaciones pareadas medidos en la escala de intensidad de la importancia propuesta por (Saaty, 1980), generando así lo que se denomina la matriz normalizada.

Tabla 5. Escala de importancia relativa

Intensidad de la importancia	Definición	Explicación
1	Igual importancia	Dos actividades contribuyen igualmente al objetivo
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio están moderadamente a favor de una actividad sobre la otra
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio están fuertemente a favor de una actividad sobre la otra
7	Importancia muy fuerte	Una actividad está muy fuertemente favorecida y su dominio ha sido demostrado en la práctica
9	Importancia extrema	Es máxima la importancia de una actividad sobre la otra
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre los dos juicios contiguos	Cuando un término medio es necesario
Recíproco de los número de arriba	Si al el elemento i le fue asignado uno de los elementos de arriba al compararse con el elemento j, entonces j tiene el valor recíproco cuando se compara con el elemento i	

Fuente: Adaptado por el autor 2017

5.2.3 Consistencia Aleatoria

Adicionalmente, (Saaty, 1980) estableció una tabla mediante la cual se propone un valor de la Consistencia Aleatoria, de acuerdo al número de alternativas a ser analizadas y por la cual se puede obtener la estimación de la matriz generada. La Consistencia Aleatoria permite evaluar la inconsistencia del decisor al emitir los juicios correspondientes a la matriz recíproca de comparaciones pareadas generadas al azar (Aguaron & Moreno, 2003). La Consistencia Aleatoria de una matriz de comparaciones pareadas $m \times m$, en la que se han realizado las comparaciones de

forma aleatoria. El valor del índice varía según el número de elementos que se comparan. Esta medida puede utilizarse para mejorar la consistencia de los juicios si se compara con el número Apropiado de la siguiente tabla (Saaty, 1980).

Tabla 6. Consistencia aleatoria

Tamaño de la Matriz (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Consistencia Aleatoria	0,00	0,00	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fuente: Adaptado por el autor

Con lo anterior se plantea la evaluación de criterios y de alternativas mediante las siguientes correlaciones planteadas por (Saaty, 1980):

Primero se realiza la evaluación de los criterios mediante la generación de la matriz normalizada

A

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Posteriormente se determina la matriz A' mediante el siguiente calculo

$$A' = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{\sum a_{i1}} & \frac{a_{12}}{\sum a_{i2}} & \frac{a_{13}}{\sum a_{i3}} \\ \frac{a_{21}}{\sum a_{i1}} & \frac{a_{22}}{\sum a_{i2}} & \frac{a_{23}}{\sum a_{i3}} \\ \frac{a_{31}}{\sum a_{i1}} & \frac{a_{32}}{\sum a_{i2}} & \frac{a_{33}}{\sum a_{i3}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Seguidamente se realiza el cálculo de las componentes de la matriz W que representa los pesos relativos de los criterios.

$$W = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{\sum a_{i1}} & \frac{a_{12}}{\sum a_{i2}} & \frac{a_{13}}{\sum a_{i3}} \\ \frac{a_{21}}{\sum a_{i1}} & \frac{a_{22}}{\sum a_{i2}} & \frac{a_{23}}{\sum a_{i3}} \\ \frac{a_{31}}{\sum a_{i1}} & \frac{a_{32}}{\sum a_{i2}} & \frac{a_{33}}{\sum a_{i3}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Una vez se determina la matriz W es requerido calcular la Razón de Inconsistencia (RI) lo cual se describe como una estimación del grado de inconsistencia que se tiene al momento de asignar las calificaciones. Para que la matriz normalizada sea aceptada como válida, el valor de la Razón de Inconsistencia debe ser menor al 10% calculado mediante la siguiente ecuación:

$$RI = \frac{IC}{CA} \quad (4)$$

Donde el Índice de Consistencia (IC) se determina,

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

Por otra parte, λ_{max} se calcula mediante la multiplicación de las matrices A y W

5.3 Variables Asociadas al Proceso

En el transporte de hidrocarburos existen diferentes variables de proceso a tener en cuenta para la correcta programación de distintos productos, no solo su calidad como se pueden llegar a clasificar según el capítulo 2, sino también variables de proceso y operativas como lo son el control de inventarios en tanques, control de interfaces, el dimensionamiento de los lotes, y las variables externas a la operación como el cambio de las nominaciones. A continuación se mencionan las requeridas para realizar un seguimiento en la mejora operacional en ductos.

5.3.1 Variables Físicas

Las propiedades físicas de los fluidos más importantes para el transporte de hidrocarburos son la gravedad específica, la viscosidad y la presión de vapor. Sin embargo, la temperatura de operación dentro de la tubería es crucial para evitar la vaporización de los hidrocarburos más livianos (Rejowski & Pinto, 2003). Para la determinación de los frentes de contaminación en un capítulo posterior, se asumirá en el modelo un proceso isotérmico.

5.3.1.1 Gravedad Específica.

La densidad es definida como la masa por unidad de volumen de un fluido. La densidad es una función de estado y para compuestos puros depende tanto de la temperatura como de la presión. La densidad de los líquidos decrece a medida que la temperatura incrementa, mientras que, la variación de la presión en un líquido es casi despreciable. Desde que la industria del petróleo adoptó las condiciones estándar de 60°F (15.5°C) y 1 atm, la gravedad específica de los hidrocarburos líquidos son normalmente reportados a estas condiciones. A la temperatura de referencia la densidad del agua es 0.999 g/cm³. De esta manera, la gravedad específica de un hidrocarburo líquido es (Riazi, 2005)

$$SG(60^{\circ}F/60^{\circ}F) = \frac{\text{Densidad del hidrocarburo @ } 60^{\circ}F \left(\frac{g}{cm^3}\right)}{0.999 \frac{g}{cm^3}} \quad (6)$$

A los comienzos de la industria del petróleo, el Instituto Americano del Petróleo (API por sus siglas en ingles), definió la Gravedad API (°API) para cuantificar la calidad de los productos del petróleo por medio del método ASTM 287. La gravedad API se define como (Hoffman, Crump & Hocott, 1953)

$$API = \frac{141.5}{SG(60^{\circ}F)} - 131.5 \quad (7)$$

La calidad del petróleo crudo se evalúa basado en el mayor valor de gravedad API (menor gravedad específica). Crudos con mayor API por lo general contienen un mayor grado de parafinas, menor relación peso a peso de CH, menor contenido de azufre y metales, y tienen menor cantidad de carbón residual y por ende menor viscosidad. Por esta razón, la gravedad API es usada como el parámetro principal para cuantificar la calidad de un crudo. La gravedad API de un crudo varía entre 10 y 50. Sin embargo, la mayoría de los crudos tienen una gravedad API entre 20 y 45 (Gary & Handwerk, 1994)

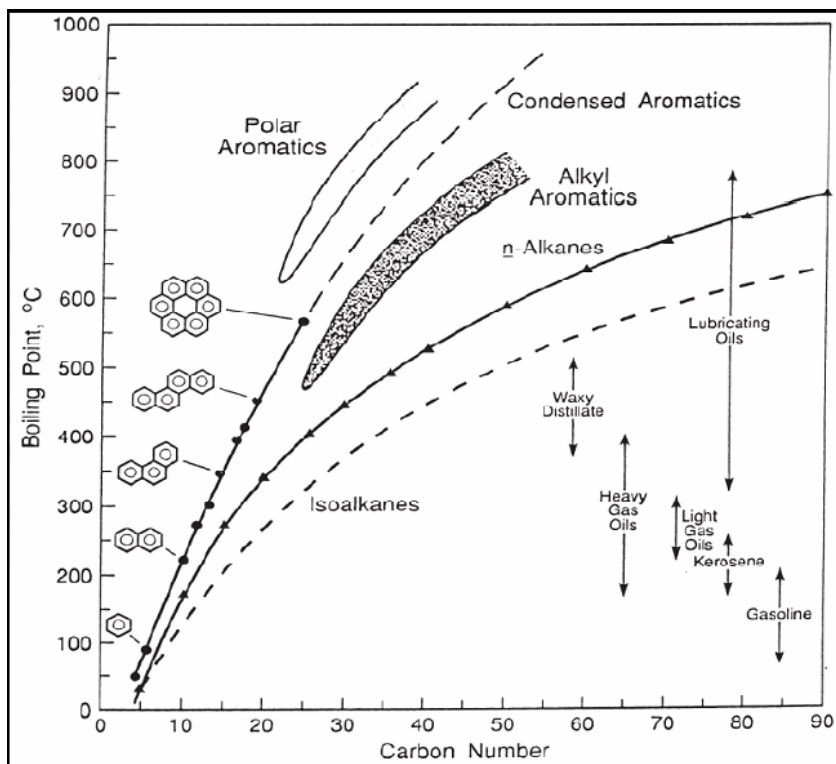


Figura 5: Caracterización del petróleo dependiendo de su número de carbonos (Speight, 1994)

De acuerdo a (Gary & Handwerk, 1994) un crudo con una gravedad API por encima de 40 es considerado como un crudo liviano, mientras que un crudo con una gravedad API por debajo de 20 es considerado como un crudo pesado. Los crudos con gravedad API entre 20 y 40 son llamados crudos intermedios.

La gravedad API como densidad, tiene gran aplicabilidad en el diseño del transporte y almacenamiento de hidrocarburos. Dicha variable está muy relacionada en el dimensionamiento de tuberías, válvulas, tanques de almacenamiento y requerimientos de energía para el bombeo (Gary & Handwerk, 1994).

5.3.1.2 Viscosidad.

La viscosidad es otra propiedad importante en la producción, refinación y transporte de petróleo. Es requerida en el cálculo de los requerimientos de energía para el transporte de hidrocarburos en el diseño de bombas, determinar la caída de presión en tuberías.

La viscosidad cinemática se define como la relación entre la viscosidad dinámica y la densidad medida a la misma temperatura:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (8)$$

La viscosidad cinemática se expresa en cSt (centiStokes) o SUS (Segundos Seybold). Los valores de la viscosidad cinemática para los hidrocarburos por lo general son medidos y reportados a dos temperaturas de referencia: 38°C (100°F) y a 99°C (210°F).

El método para la determinación de la viscosidad cinemática es el ASTM D-445, medido a temperaturas desde los 15°C hasta los 100°C. En este método la repetibilidad es del .035% y la reproducibilidad es del 0.7%. Los métodos para la predicción de la viscosidad en fracciones líquidas del petróleo pueden llegar a presentar errores entre el 20% y el 50% (Riazi, 2005)

A continuación se presenta una correlación basada en curvas reológicas de crudos que van desde una gravedad API de 16 hasta los 50 y temperaturas desde los 10°C hasta los 100°C presentando un error del 3% para los crudos en estudio (Riazi, 2005)

$$\nu = e^{\left(58.093 - \frac{87.255}{API} - 14.015 \cdot \ln(API)\right)} * \left(1.671 * \frac{0.3415}{API} * API^{(-0.0362T)} * \left(T^{(-2.486 + 0.018 * API + 0.000515 * API^2)}\right)\right) \quad (9)$$

5.3.1.3 Presión de Vapor

La presión de vapor es la medida de la volatilidad de un hidrocarburo líquido. Esta propiedad se usa para calcular la pérdida de hidrocarburos en el almacenamiento de petróleo. Se puede definir como la presión en donde la fase líquido y la fase gaseosa de un fluido se encuentran en equilibrio. Esta propiedad se incrementa con la temperatura y el mayor valor de presión de vapor de un fluido es su presión crítica. Cuando un líquido está a condiciones atmosféricas, a una temperatura T_{en} donde la presión de vapor del líquido es P^{vap} , el porcentaje de volumen que se evapora se determina (Riazi, 2005).

$$vol\% = 100 * \left(\frac{P^{vap}}{P_a} \right) \quad (10)$$

Donde P_a es la presión atmosférica.

Es una propiedad muy importante relacionada con cálculos de seguridad como de diseño de equipos de proceso (tanques, bombas, separadores, etc). Para el petróleo existe una metodología mediante un nomograma el cual permite determinar la Presión de Vapor Verdadera o TVP (por sus siglas en inglés), mediante la medición de la Presión de Vapor Reid (RVP). La Presión de Vapor Reid es una medición por el método ASTM D-323 y es aproximadamente la presión de vapor del fluido medida a una temperatura de 38°C (100°F) (Riazi, 2005).

(Daubert & Danner, 1997) desarrollaron una correlación para determinar la presión de vapor verdadera (TVP) de los crudos dependiendo de la RVP del fluido medida.

$$\ln(P^{vap}) = A_1 + A_2 \ln(RVP) + A_3 (RVP) + A_4 T + \frac{[B_1 + B_2 \ln(RVP) + B_3 (RVP)^4]}{T} \quad (11)$$

Donde la P^{vap} y la RVP están expresadas en psia y la temperatura en Rankine (R). Los rangos de aplicación son entre $0^\circ\text{F} < T(^{\circ}\text{F}) < 140^\circ\text{F}$ y $2 \text{ psi} < \text{RVP} < 15 \text{ psi}$. Los coeficientes para la correlación son:

$$A_1 = 7.78511307$$

$$A_2 = -1.08100387$$

$$A_3 = 0.05319502$$

$$A_4 = 0.00451316$$

$$B_1 = -5756.8562305$$

$$B_2 = 1104.4128797$$

$$B_3 = -0.00068023$$

5.3.2 Variables de Proceso

En el transporte de hidrocarburos existen diferentes variables de proceso a tener en cuenta para la correcta programación de distintos productos, no solo sus propiedades intensivas como se mencionaron anteriormente, como lo son su gravedad API, viscosidad, presión de vapor, entre otras, sino también variables extensivas de proceso y operativas como lo son los inventarios de los tanques, el tamaño de los baches y las interfaces que se generan entre lotes. A continuación se mencionan las requeridas para realizar un seguimiento en la mejora operacional en ductos.

5.3.2.1 Control de inventarios en tanques

El control de inventarios se da debido a la necesidad de no generar ninguna afectación a los productores y a su vez, poder generar una flexibilidad en el despacho de los distintos productos que requieren ser transportados por un ducto. Así pues, se tiene como objetivo corroborar la disponibilidad del producto y también el volumen disponible en los tanques no solo desde el punto inicial sino también a los terminales a los cuales debe ser entregado el producto (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015).

El inventario disponible de cualquier producto al final de un día, se puede determinar mediante un balance de materia.

$$\frac{dM}{dt} = \sum_{i=0}^n F_n - \sum_{a=0}^k F_k \quad (12)$$

Donde se puede determinar la variación del volumen del tanque con respecto al tiempo teniendo en cuenta las corrientes de entrada (F_n) y las corrientes de salida (F_k). Es importante que el nivel del inventario de cualquier producto debe mantenerse dentro de un rango el cual depende de la capacidad mínima y máxima del tanque (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015)

Con el fin de simular inventarios finales que presenten un perfil a las demandas futuras, dentro del balance se deberán incorporar los incumplimientos o recibos adicionales dentro del mismo horizonte de tiempo, variable conocida como las detenciones imprevistas (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015). Lo anterior, se obtiene comparando los inventarios proyectados con la futura demanda y así minimizar la posibilidad de incumplimientos ya sea a los productores en los recibos como a los clientes en los despachos.

5.3.2.2 Control de Interfaces

En el transporte por ductos, la programación por ciclos de lotes es la técnica más empleada. Se fundamente en dividir la demanda mensual de cada punto de entrega en el número de ciclos de bombeo que se deseen efectuar durante el mes (Sheppard, 1984). No obstante, el realizar el transporte de los distintos productos por ductos implica la generación de un frente de contaminación debido a la transferencia de masa que se da entre lote y lote conocido como interfaz. Dichos frentes de contaminación o interfaz se van incrementando a medida que transcurre el tiempo y avanza el lote a lo largo de la tubería (Freitas & de Araujo, 2007)

El transporte por lotes se da mediante el bombeo de 2 o más productos secuencialmente desde los tanques de almacenamiento hasta el punto de destino como se muestra en la Figura. En el paso de los productos a lo largo de la tubería, se genera una zona de mezcla en la frontera de cada uno de los fluidos. La presencia de dicha mezcla se da debido a la difusión convectiva formada en gran parte por el cambio de velocidades que se presenta en la interfaz de los dos fluidos (Levenspiel, 1958)

A medida que el frente de contaminación avanza a lo largo de la tubería, se presenta el siguiente perfil de la interfaz

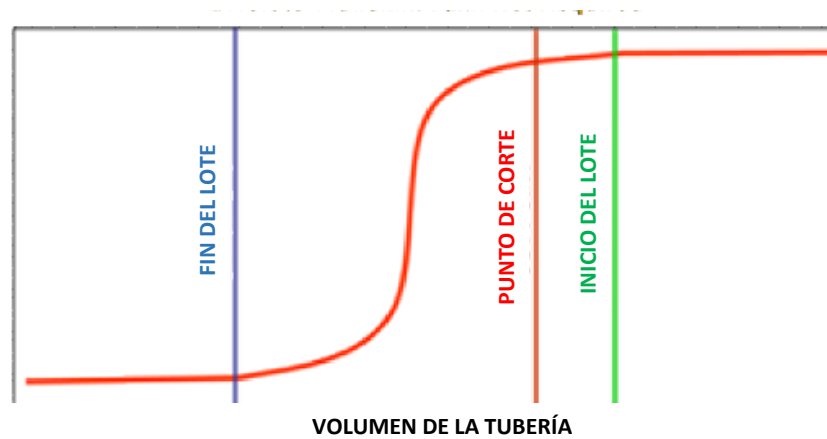


Figura 6: Interfaz entre dos líquidos (Chintala, 2010)

Para la determinación de la interfaz se requiere realizar un balance de masa de los dos fluidos a lo largo de la tubería. Lo anterior aplica en la industria del transporte de fluidos por ductos para determinar el mejor punto de corte y así reducir la contaminación del fluido más delicado (Freitas & de Araujo, 2007)

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + U_z \frac{\partial c_i}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(C_i) \frac{\partial c_i}{\partial x} \right] \quad (13)$$

Donde;

C_i es la concentración del producto i

t es el tiempo de corte de la interfaz (segundos)

U_z es a velocidad media del fluido (m/s)

x es la longitud de la tubería donde se realiza el corte de la interfaz (m)

$K(C_i)$ es el coeficiente de dispersión axial (m^2/s) la cual determina la dispersión de una sustancia en otra bajo la acción de la difusión molecular y la velocidad de un fluido en su área transversal.

De acuerdo a lo expuesto por (Alvarez J, Alvarez F., González A, EscobarJ, FerreiraC, Montes J & Chinchilla, 2011), tomando como punto de partida la zona media del volumen de mezclado, la solución a la ecuación diferencial se da por la siguiente expresión:

$$\frac{C_b}{C_{bo}} = 0.5 * \left(1 - erf \left[\frac{x - U_z * t}{\sqrt{4 * K * t}} \right] \right) \quad (14)$$

Donde el coeficiente de dispersión axial está dado por la correlación de Sjenitzer (1958),

$$K = \frac{D}{2} * U_z * 2592 * Re^{-0.9} * \left(\frac{2L}{D} \right)^{0.141} \quad (15)$$

Donde,

L = es la longitud de la tubería

D = es el diámetro de la tubería

5.3.2.3 Dimensionamiento de los lotes

Un lote de producto hidrocarburo es un volumen perfectamente identificable (gracias a sus propiedades físicas), el cual se transporta por una tubería como un bloque a una velocidad tal que se dé un flujo turbulento y así reducir los frentes de contaminación anteriormente explicados.

(Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015) plantea que el transporte secuencial de lotes de distintos productos hace que se puedan atender los distintos requerimientos de los clientes ya sea en las refinerías o en los puntos de exportación. Con el fin de mejorar los tiempos de entrega, gestionar la administración de los inventarios de los tanques tanto en el terminal de despacho como de recibo y reducir los frentes de contaminación el programador de ducto deberá establecer una secuencia de productos y el tamaño adecuado el cual mejore la hidráulica del ducto.

La secuencia de lotes deberá tener claro que se presenten interfaces (lotes del mismo producto pero distinta gravedad API lo cual generará una degradación del producto) y no que se presenten *Transmix* (lotes de diferentes productos los cuales deberán ser tratados para su separación o reducción del frente de contaminación).

De acuerdo a (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015) la secuencia y dimensionamiento de lotes están sujetos a dos tipos de operación:

- *Operación por lotes*: El mismo volumen aceptado en el recibo deberá ser el mismo volumen entregado en el punto de destino. Esta operación genera gran cantidad de lotes y por ende una gran cantidad de interfaces
- *Operación consolidada*: Los productos estándar de diferentes productos se consolidan en un lote simple. Esta operación genera menos número de lotes y por ende menor cantidad de interfaces.

Para el dimensionamiento de los lotes se plantea el siguiente procedimiento para cada producto de i hasta n :

- *Recibos de cada producto por mes*

$$P_{i...n} = p_{i...n} * \# \text{ días mes} \quad (16)$$

Donde,

$P_{i...n}$ Volumen de producto recibido por mes

$p_{i...n}$ Volumen de producto recibido por día.

- *Duración del ciclo*

$$d_c = \sum_{i=1}^n q_{lote\ i...n} * t_{lote\ i...n} \quad (17)$$

$$D_c = \frac{d_c}{24} \quad (18)$$

$$\#_{ciclos} = \frac{Dias\ mes}{D_c} \quad (19)$$

$$Q_{lotes\ mes\ i...n} = q_{lote\ i...n} * \#_{ciclos} \quad (20)$$

Donde,

d_c Duración horaria del ciclo de despacho de productos

$q_{lote\ i...n}$ Número de lotes de cada producto,

$t_{lote\ i...n}$ Tiempo de duración del lote

D_c Duración diaria del ciclo

$\#_{ciclos}$ Número de ciclos al mes

- *Tamaño de los lotes de productos*

De manera iterativa se calcula el tamaño del lote mejorando la distribución de los productos para su transporte. Es importante tener en cuenta que el menor número de lotes por producto genera el menor número de frentes de contaminación.

$$t_{lote\ i...n} = \frac{B_{i...n}^*}{\dot{v}} \quad (21)$$

$$B_{i...n}^{**} = \frac{P_{i...n}}{Q_{lotes\ mes\ i...n}} \quad (22)$$

$$B_{i...n}^* = B_{i...n}^{**} \quad (23)$$

Donde,

$B_{i...n}^*$ Tamaño del lote (hipotético)

5.3.3 Variables Externas

Según (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015) las variables externas también son las variables denominadas “backorders” u órdenes incumplidas que no solo no se han dejado de entregar sino que también se han dejado de recibir. Para lo anterior el nivel de inventario de cualquier producto desde i hasta n debe estar dentro de los rangos mínimos y máximos dependiendo de la capacidad de los tanques.

$$Inv_{\min\ i...n} \leq Inv_{i...n} \leq Inv_{\max\ i...n} \quad (24)$$

De esta manera es posible proyectar la capacidad de almacenamiento de cada uno de los productos en un horizonte de tiempo mensual, evitando llegar hasta los niveles máximos de cada tanque con el fin de poder asumir los incumplimientos o recibos adicionales en el proceso. De esta manera, los tanques operarán como amortiguadores asumiendo un cualquier tipo de variabilidad permitiendo que el proceso se mantenga en lo posible lo más estable (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015) Con lo anterior, el balance de materia debe contemplar posibles entradas y salidas adicionales y así prever mediante una programación hipotética el nuevo escenario:

$$\frac{dM}{dt} = \sum_{i=0}^n F_n - \sum_{a=0}^k F_k \pm \sum_{j=0}^l F_l \quad (25)$$

Donde,

$\frac{dM}{dt}$ Variación del volumen de almacenamiento con respecto al tiempo

$\sum_{i=0}^n F_n$ Sumatoria de todos los flujos volumétricos del producto i que entran a almacenamiento

$\sum_{a=0}^k F_k$ Sumatoria de todos los flujos volumétricos del producto i que salen del almacenamiento

$\sum_{j=0}^l F_l$ Sumatoria de los todos los flujos volumétricos del producto i que entran y/o salen del almacenamiento que no están contemplados en el inicio de la nominación.

5.4 Programación y Bombeo

De acuerdo a lo planteado por (Rabinow, 2004) una vez se desarrolla el programa de bombeo este se entrega a los operadores quienes son los ejecutantes de dicho programa, que, mediante un proceso operativo reciben, transportan y entregan los lotes de forma remota y totalmente automatizada mediante un sistema de Supervisor de Control y Adquisición de Datos (SCADA) el cual estima el instante de arribo del lote al punto de entrega, realiza seguimiento de los niveles de los tanques, verifica los volúmenes recibidos en los puntos de entrada. De esta manera se monitorea constantemente el comportamiento del ducto con el fin de tomar decisiones operativas.

Con lo anterior, el operador o ejecutor del programa debe cumplir con lo recomendado por el programador del ducto y realizar una validación de lo ejecutado versus lo programado. Se debe realizar los ajustes necesarios tanto a la operación como al programa para que se tenga la menor distorsión del proceso.

Se plante el siguiente procedimiento para el seguimiento de los lotes y el desfase horario entre lo programado y lo ejecutado.

$$\text{Relación Horaria } (\overline{R.H}) = \frac{\frac{\sum_i^n \text{Volumen lote programado } i / \text{Flujo programado ducto}}{\sum_i^n \text{Volumen lote real ejecutado } i / \text{Flujo real ducto ejecutado}}}{\text{Número de lotes por día}} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \text{Desfase Horario } (D.H) = \\ \left[\left(\frac{\sum_{i=0}^n \text{Volumen lote programado } i / \text{Flujo programado ducto}}{\text{Volumen lote real ejecutado } i / \text{Flujo real ducto ejecutado}} \right) * (\overline{R.H}) \right] * \text{No días} \end{aligned} \quad (27)$$

Donde,

- Sí el D.H arroja un valor de 0, el cumplimiento del programa estará en el 100%
- Sí el D.H < 0 indica que el tamaño del lote real es de mayor volumen al programado y que el flujo real es mayor al programado
- Sí el D.H > 0 indica que el tamaño del lote real es de menor volumen al programado y que el flujo real es mayor programado
- Sí el D.H se aleja de cero (por encima o por debajo) la ejecución del programa no se estaría dando

5.5 Criterios del Proceso

Basado en los desperdicios planteados por la metodología LEAN y descritos en el capítulo 2 y teniendo en cuenta las restricciones planteadas en el modelo matemático, se plantean los siguientes criterios requeridos para la elaboración del Proceso de Análisis Jerárquico:

C1: Restricción por volumen máximo de interfaz

C2: Inventarios mínimos y máximos

C3: Cumplimiento del programa de bombeo.

5.6 Evaluación de Criterios y Alternativas

Una vez identificados los criterios del proceso y mediante la implementación del Proceso de Análisis Jerárquico se procede a realizar la evaluación de los criterios del proceso planteados en el punto anterior teniendo como base los criterios de la intensidad de la importancia mediante la construcción de una matriz A, a partir de la comparación de los diferentes criterios teniendo en cuenta:

Tabla 7. Matriz normalizada A de los criterios

Matris normalizada A			
Comparación de Criterios	C1	C2	C3
C1	1	2	1/5
C2	1/2	1	1/5
C3	5	5	1

Fuente: Adaptado por el autor 2017

En la matriz A' se puede notar la importancia del cumplimiento del programa de bombeo sobre los otros dos criterios de selección. Una vez calculada la matriz A' se obtiene la matriz de los pesos relativos o eigenvector, mediante los promedios de cada renglón de la matriz A'

Tabla 8. Matriz pesos de los criterios

W (PESOS)	0.182
	0.115
	0.703

Fuente: Adaptado por el autor 2017

Como se muestra en la matriz W, el criterio del cumplimiento del programa tiene un alto impacto en la selección de las alternativas.

Tabla 9. Razón de inconsistencia

RAZÓN DE INCONSISTENCIA (RI)	0.04672589
-------------------------------------	------------

Fuente: Adaptado por el autor 2017

Debido a que la razón de inconsistencia es considerablemente menor a un 10%, se aceptan los valores de la matriz como consistente, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 10. Resumen de resultados de los criterios

Comparación Criterios	C1	C2	C3	peso W
C1	1	2	1/5	0.182
C2	1/2	1	1/5	0.115
C3	5	5	1	0.703
RI	4.67%			

Fuente: Adaptado por el autor 2017

Una vez obtenida la comparación de los criterios, se realiza la comparación de las alternativas de acuerdo a los modelos matemáticos planteados en el numeral .5 como base para analizar el caso de estudio.

Tabla 11. Resumen de alternativas

ALTERNATIVAS	
A1	Hane y Ratliff
A2	Rejowski y Pinto
A3	Magatao
A4	Cafaro y Cerdá
A5	Sasikumar
A6	Camacho

Fuente: Adaptado por el autor 2017

Finalmente, para conocer qué alternativa es la más importante de acuerdo a los criterios establecidos, se selecciona aquella alternativa la cual presente el mayor peso. En este caso, se tiene

como mejor alternativa para seguir su modelo matemático lo planteado por (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015).

Tabla 12. Resultado de jerarquización de alternativas

Jerarquización Alternativas		
A1	0.23255	
A2	0.09526	
A3	0.19432	
A4	0.38835	Mejor Alternativa
A5	0.03932	
A6	0.05020	

Fuente: Adaptado por el autor 2017

5.7 Conclusiones del Capítulo

Como mejor alternativa se tomará como base lo planteado por (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015) presentando un peso del 38.8%. El modelo que contempla como restricciones dentro de su modelo matemático las restricciones de la secuencia y tamaño de los lotes dependiendo de la demanda diaria, la reducción de las interfaces y los inventarios de cada producto. Es importante tener en cuenta que en el modelo planteado se introduce una restricción alineada a la metodología LEAN la cual hace referencia al cumplimiento de la programación de bombeo por parte de los operadores de cuarto de control.

6. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL MODELAMIENTO DEL PROGRAMA DE BOMBEO

6.1 Introducción

En este capítulo se establecerán las condiciones iniciales-base que caracterizan el proceso de transporte de fluidos por ductos como lo son el dimensión del ducto (longitudes, diámetros, perfil topográfico, máximas y mínimas capacidades de bombeo), las características de los fluidos (fase a transportar, calidades máximas y mínimas permisibles), las demandas diarias a ser recibidas, transportadas y entregadas a los clientes, las capacidades de almacenamiento tanto en los terminales de entrada al sistema como de salida asignado para cada tipo de producto. Almacenamiento inicial de cada tipo de producto tanto en los terminales de entrada como de salida del sistema. Por otra parte, es importante dimensionar adecuadamente los tamaños máximos y mínimos de los lotes, número máximo de los lotes a transportar en el horizonte de tiempo programado. Finalmente, se requiere calcular la secuencia de transporte de productos debido a la prohibición por incompatibilidad de calidades.

6.2 Condiciones y Características

6.2.1 Dimensión del Ducto

Para los distintos cálculos en la programación de ductos es necesario definir las características de la línea o tubería por donde se realizará el transporte, capacidades hidráulicas máximas y mínimas de bombeo.

El fluido se mueve mediante una serie de estaciones de bombeo construidas en puntos estratégicos del ducto. Es importante que el fluido se mantenga a una velocidad entre 1 y 6 m/s (3.28 – 19.7 ft/s). Las características físicas de una tubería definen como un fluido se comporta

dentro de un ducto. Existen tres parámetros importantes que se deben tener en cuenta para analizar cualquier tipo de ducto:

- *Longitud de la tubería (L)*: La longitud de tubería es un segmento de un ducto que afecta la caída de presión directamente proporcional. Entre más sea el segmento entre estación y estación de bombeo, mayor será la caída de presión.
- *Diámetro interno de la tubería (Di)*: Está relacionado inversamente con la pérdida de presión por fricción. A medida que el diámetro interno disminuye, la caída de presión aumenta considerablemente.
- *Rugosidad de la pared interna de la tubería (e)*: La rugosidad de una tubería depende del tipo de material en la que está construida el ducto. La rugosidad es fundamental para el cálculo hidráulico de un ducto y es directamente proporcional a la caída de presión. Entre mayor sea la rugosidad de una tubería mayor será la caída de presión.

Con lo anterior, es importante tener como datos de entrada las siguientes condiciones iniciales-base para el correcto transporte por ductos para la condición más crítica que sería un fluido de alta viscosidad:

Tabla 13. Velocidades y caídas de presión máximas permisibles en ductos

Diámetro Tubería (in)	Flujo (Barriles/Hora)	Velocidad (ft/s)	Caída de Presión (psi/100ft)
12	1500 - 2500	3 - 5	0.78 – 1.3
16	2500 - 5700	3 - 7	0.5 -1.15
20	3900 - 10500	3 - 8	0.3 – 1.27
24	5700 - 16700	3 – 8.8	0.21 - 1.15
30	8900 - 31000	3 – 10.5	0.13 – 1.15
42	17800 - 80700	3 – 13.6	0.07 – 1.15

Fuente: Elaborado por el autor 2017

Es importante que en el transporte de los productos por lotes, se procure tener un número de Reynolds en régimen turbulento ($Re \geq 2000$) con el fin de reducir los frentes de contaminación pero sin dejar a un lado la caída de presión del ducto ya que de presentarse altas caídas de presión se verá un incremento en el consumo energético.

6.2.2 Características de los fluidos

Para asegurar el cumplimiento y las condiciones iniciales-base de los requisitos de calidad de los productos que se reciben y/o se entregan se tienen distintos métodos para garantizar que el producto que se transporta siempre este dentro de especificaciones:



Figura 7: Ciclo para el aseguramiento de la calidad de hidrocarburos

Fuente: Elaborado por el autor (2017)

Uno de los métodos es conocido es el Interlaboratorio, el cual consiste en la realización de un ejercicio estadístico entre los laboratorios que analizan los productos tanto de entrada como de salida del sistema.

Además de la anterior metodología anualmente se deberá realizar una auditoría a los laboratorios que despachan los distintos productos así con en aquellas estaciones donde se recibe. Estas auditorías ayudan a gestionar la mejora no solo de los laboratorios sino también de las prácticas para la realización de muestreos y análisis de los crudos que se transportan.

Por otra parte, trimestralmente se deberá realizar una línea base de los productos que se transportan. Esta línea base es la calidad que se utiliza para los distintos requerimientos y cálculos de las otras áreas como por ejemplo hidráulica, integridad entre otras.

Adicionalmente, en un ducto anualmente se deberá realizar un monitoreo de las interfaces que se generan por el transporte en lotes de los distintos productos.

Dentro del control de calidad se realiza un seguimiento de propiedades (API, viscosidad, BS&W y RVP) con el fin de garantizar que se está cumpliendo los requerimientos mínimos de transporte y así garantizar una correcta operación del ducto y sus terminales ya descritas en el capítulo anterior.

6.2.3 Demandas diarias

La demanda diaria se da en un proceso denominado Nominación de Transporte. Es la solicitud para transportar el producto en el mes de operación correspondiente y formulada en un mes específico, se realiza con el fin de establecer los volúmenes a transportar por el sistema, el punto de entrada, el punto de salida, las indicaciones de calidades del producto. Es el dato de entrada para dar inicio con la programación del ducto.

Las demandas diarias son las que le dan mayor variabilidad al proceso de programación. Son aquellas variables externas que pueden llegar a modificar el tamaño de los lotes, la secuencia, los inventarios en los terminales de entrada o salida, entre otras condiciones operacionales.

El conocimiento de la demanda diaria sirve no solo para realizar una programación adecuada sino también para gestionar los recursos requeridos para el transporte por ductos como la cantidad de unidades de bombeo requeridas por cada estación, la necesidad de uso de reductores de fricción al generar cambios en la secuencia de los lotes, la disponibilidad de almacenamiento y gestión de entregas a refinerías o a terminales de exportación entre otros.

Como condiciones iniciales-base se deberá plantear dos escenarios:

- A) Escenario donde se da cumplimiento por parte de los clientes en las entregas y salidas de la demanda diaria. Con lo anterior se tendrá como balance de materia la siguiente ecuación donde lo recibido es lo despachado:

$$\frac{dM}{dt} = \sum_{i=0}^n F_n - \sum_{a=0}^k F_k \quad (12)$$

- B) Escenario donde no se da cumplimiento por parte de los clientes y pueden generar mayores o menores entregas y/o mayores o menores salidas del sistema. Para este escenario se plantea la ecuación 25.

$$\frac{dM}{dt} = \sum_{i=0}^n F_n - \sum_{a=0}^k F_k \pm \sum_{j=0}^l F_l \quad (25)$$

Donde, para ambos casos, la variación de la masa con respecto al tiempo $\frac{dM}{dt}$ hace referencia a la acumulación en los respectivos tanques de almacenamiento de cada producto.

6.2.4 Capacidades de almacenamiento

De acuerdo a (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015) las capacidades de almacenamiento de los tanques de cada uno de los productos son importantes como condiciones iniciales-base. Dependiendo de los inventarios en el momento cero al iniciar la programación, se debe determinar los flujos a los que se debe transportar por el ducto, el tamaño de los lotes, la secuencia a ser despachada. Con lo anterior, si se presentan bajos inventarios de cada uno de los productos, se deberá realizar el transporte por el ducto a bajos flujos, los cuales garanticen unos volúmenes almacenados adecuados para mantener un transporte constante sin variaciones en el proceso, generando los menores consumos energéticos a lo largo del ducto.

Por otra parte, si se llegan a presentar altos inventarios en el momento cero de la programación del ducto, es necesario incrementar los flujos de transporte, generar una secuencia de los lotes de tal manera que se despachen aquellos productos con mayor criticidad de almacenaje. Lo anterior, si bien es cierto se verá reflejado en un incremento de consumo energético, los costos asociados se verán compensados con los mayores volúmenes recibidos al sistema.

Es importante que al iniciar la programación del ducto los volúmenes mínimos o máximos de los tanques serán aquellos que por diseño no podrán ser sobrepasados, es decir, no llegar niveles por debajo de las alarmas de mínimo nivel por protección del tanque y que no podrán llegar a niveles por encima de las alarmas de alto nivel las cuales evitan rebose de los mismos. Con lo anterior,

$$Inv_{\min i...n} \leq Inv_{i...n} \leq Inv_{\max i...n} \quad (24)$$

6.2.5 Secuencia de transporte y tamaño de los lotes

De acuerdo a (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015) para generar la secuencia y tamaño de los lotes es importante tener como condición inicial-base conocer los puntos anteriormente

mencionados, como lo son: las nominaciones, los inventarios en los tanques tanto en los terminales de entrada como de salida, cuál de los productos está siendo entregado en menor o mayor proporción, requerimientos de los clientes, calidades, cuidado de ciertos productos para que se generen los menores frentes de contaminación entre otras condiciones. Es importante que los volúmenes de los lotes sean mayor a los volúmenes de las interfaces que se pueden generar, lo anterior con el fin de garantizar un porcentaje de producto puro a los clientes. Por otra parte, es mandatorio tener en cuenta que para aquellos productos con altas viscosidades la restricción del tamaño de su lote es la que genere la menor restricción hidráulica (menores perdidas por fricción) pero a su vez no deben ser tamaño de lotes tan pequeños que se pierdan en las interfaces.

$$Q_{lotes\ mes\ i...n} = q_{lote\ i...n} * \#_{ciclos} \quad (20)$$

$$B_{i...n}^* = B_{i...n}^{**} \quad (23)$$



Figura 8: Resumen Condiciones y Características para la programación de ductos

6.3 Modelamiento Matemático de Ductos

A continuación se desarrollará el modelamiento matemático de la programación en ductos teniendo en cuenta una función objetivo la cual minimice el consumo energético del proceso teniendo en cuenta una serie de restricciones y las condiciones iniciales-base.

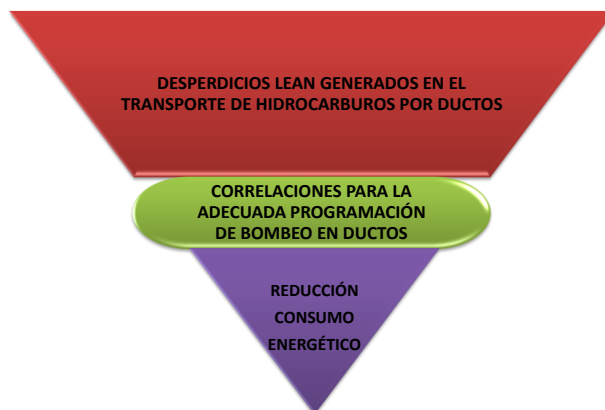


Figura 9: Filtro de desperdicios mediante metodología Lean y modelamiento matemático

Fuente: Elaborado por el autor (2017)

A continuación se plantea un modelo lineal múltiple, el cual presenta el comportamiento de una variable continua (en este caso la energía), mediante su relación lineal con los valores de otras variables explicativas que pueden influirla como lo son: los inventarios, el tamaño de los lotes y el cumplimiento del secuenciamiento por reducción de interfaces.

6.3.1 Función Objetivo

De acuerdo a (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015) un ducto puede comunicar diferentes fuentes de entrada con diferentes puntos de llegada o entrega. Una operación normal de un ducto se da cuando a lo largo de la tubería en su área transversal permanece completamente llena de producto. Los productos fluyen dentro de dicha tubería propulsados por bombas ya sean de tipo centrifugas o de desplazamiento positivo las cuales aportan la energía necesaria para vencer las diferencias de nivel y/o las pérdidas por fricción a lo largo del ducto. Dependiendo de la topografía

del ducto, las estaciones de bombeo son ubicadas con el fin de mantener un flujo continuo y permanente.

El modelo que se plantea a continuación considera un consumo de energía continuo ya que supone entradas continuas al sistema y salidas continuas del mismo. El objetivo del siguiente modelo matemático busca reducir el consumo energético cumpliendo las siguientes restricciones:

- Reducir del volumen de las interfaces generadas por el transporte de ductos
- Mantener un inventario adecuado tal que se conserve un flujo continuo a lo largo del ducto sin llegar a los límites mínimos y máximos de los tanques de almacenamiento teniendo en cuenta los recibos de producto.
- Cumplir el programa de bombeo, realizando una comparación entre lo programado y lo real ejecutado por el operador de SCADA

Para el cumplimiento de la última restricción es mandatorio la implementación de la metodología Lean como herramienta de mejoramiento continuo de los procesos en el transporte de fluidos por ductos. Como se mencionó en el capítulo uno, es poder generar la cultura de mejoramiento continuo basada en la comunicación y en el trabajo en equipo, haciendo partícipes a las personas que están contribuyendo en el proceso.

$$\min \varepsilon = 0.134 \sum_{s=1}^n \frac{Q_n * \rho_n * H_n}{\eta_n} \quad (28)$$

Donde,

Q_n Flujo volumétrico manejado por la estación de bombeo

ρ_n Densidad del fluido que está siendo bombeado por la estación

η_n Eficiencia de la bomba. Especifica del equipo.

H_n Cabeza Dinámica Total, definida por la ecuación:

$$H_n = h_{sts} + h_{f_{sd}} + h_{std} + h_{f_s} \quad (29)$$

Donde,

h_{sts} Cabeza estática en la succión de la bomba

$h_{f_{sd}}$ Pérdidas por fricción en la descarga de la bomba

h_{std} Cabeza estática en la descarga de la bomba

h_{f_s} Pérdidas por fricción en la succión de la bomba.

Las pérdidas por fricción están dadas por la siguiente correlación:

$$\Delta P = \frac{0.5 * f_i * \rho_i * U_{zi} * L_i}{100.000 * d_i} \quad (30)$$

Donde,

f_i Factor de fricción en la tubería de análisis

ρ_i Densidad del fluido en la tubería de análisis

U_{zi} Velocidad del fluido en la tubería de análisis

L_i Longitud de la tubería de análisis

d_i Diámetro interno de la tubería de análisis

Cabe aclarar, que si se llega a presentar dos o más productos dentro de la misma longitud de análisis de tubería, se deberá proceder al cálculo segmento por segmento y posteriormente realizar la suma de las caídas de presión para determinar el diferencial total.

6.3.2 Restricciones

6.3.2.1 Reducción del volumen de las interfaces generadas por el transporte de ductos

El volumen máximo permitido degradado por la interfaz formada entre productos será definido por la compañía y será calculado por la siguiente ecuación:

$$A_T * U_{zn} * (t_f - t_i) \leq V_{interfaz} \quad (31)$$

Donde,

A_T Área transversal de la tubería por donde transita la interfaz

U_{zn} Velocidad de la interfaz

t_f Tiempo que tarda en llegar el punto final de la interfaz en el punto de medición

t_i Tiempo que tarda en llegar el punto inicial de la interfaz en el punto de medición

$V_{interfaz}$ Volumen máximo de la interfaz

Para el anterior cálculo se deberá generar un proceso iterativo en el que se debe tener en cuenta el cálculo de la concentración de la mezcla de la interfaz en el punto de medición, la cual se calcula con el tiempo que tarda la mitad de la interfaz en llegar al punto de medición.

$$\frac{c_b}{c_{bo}} = 0.5 * \left(1 - \operatorname{erf} \left[\frac{x - U_z * t}{\sqrt{4 * K * t}} \right] \right) \quad (14)$$

$$t_m = \frac{b}{\overline{U_z}} \quad (32)$$

Donde,

b Punto donde se realiza la medición

$\overline{U_z}$ Velocidad media del fluido.

6.3.2.2 Inventarios

Otra de las restricciones para conservar un flujo continuo a lo largo del ducto sin llegar a los límites mínimos y máximos de los tanques de almacenamiento teniendo en cuenta los recibos de producto es la de mantener los inventarios en los niveles adecuados garantizando la seguridad y la operación del proceso.

Para esta restricción se plantea la siguiente correlación:

$$Inv_{mini} \leq Inv_{oi} + P_i - B_i \leq Inv_{maxi} \quad (24)$$

O

$$Inv_{mini} \leq Inv_{oi} + P_i - B_i \quad (33)$$

$$Inv_{oi} + P_i - B_i \leq Inv_{maxi} \quad (34)$$

6.3.2.3 Cumplimiento del programa de bombeo

Para el cumplimiento de esta restricción es necesaria la comparación entre lo programado vs lo ejecutado por el operador de SCADA. En este punto, se analiza el cumplimiento del programa y las afectaciones en la función objetivo.

$$\left(\frac{B_i}{F_i} - \frac{B_{ireal}}{F_{ireal}} \right) * \overline{RH} * \#días \approx 0 \quad (35)$$

6.4 Diferencias entre otras metodologías

De acuerdo a lo mencionado en el numeral 4.5, los modelos matemáticos base para el transporte de hidrocarburos por ductos y el planteado en este trabajo cuentan con funciones objetivo las cuales apuntan a la reducción energética y a los costos por tratamiento de interfaces de productos generadas entre lotes. La metodología planteada en este documento no solo apunta al

cumplimiento de dichas funciones objetivo y sus respectivas restricciones sino también, mediante la implementación de la metodología Lean generar una conciencia dentro de los operadores de SCADA para dar cumplimiento al programa de bombeo, generando como KPI base el planteado en el numeral 6.3.2.3 de este documento.

Por lo anterior, a los modelos planteados por otros autores se les dará un alcance mayor, no solo para la programación de bombeo sino para el cumplimiento del mismo realizando una comparación entre el modelo planteado por (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015) como datos de SCADA vs lo planteado como metodología Lean en este documento.

6.5 Conclusiones del Capítulo

Una vez identificadas las condiciones y características del ducto, de los fluidos y de la operación, fue posible identificar los desperdicios presentados en el capítulo 2 y a su vez, como poder mitigarlos gracias a las correlaciones planteadas dentro del modelo matemático. Se aclara que en el modelo matemático planteado también se tiene en cuenta la relación directa del personal de operaciones como ejecutores del programa de bombeo y como base fundamental del cumplimiento del mismo. Son parte importante en el cumplimiento del proceso de bombeo por el ducto y que se logre el objetivo; la reducción del consumo energético.

7. ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS

7.1 Introducción

De acuerdo a lo mencionado en el primer capítulo, la metodología LEAN busca eliminar todo tipo de “desperdicios” en un proceso operativo o de producción. Basado en los “desperdicios” identificados que pueden generar la mala programación de un ducto y teniendo presente la implementación de la metodología LEAN para el mejoramiento continuo de procesos; apoyado en el modelamiento matemático para la programación de ductos, se generó un secuenciamiento de cálculo el cual permite reducir cada uno de los “desperdicios” y tener como objetivo principal la reducción del consumo energético cumpliendo cada una de las restricciones planteadas en el capítulo anterior. En el siguiente capítulo se realizará un caso de estudio, comprobando el modelo matemático de (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015) con el fin de analizar los datos obtenidos y la validación del método planteado.

7.2 Datos de Estudio

Para el caso de estudio, como primera premisa se tuvo como base referencial los resultados obtenidos en el numeral 5.6 “evaluación de criterios y alternativas, donde se toma como única base el planteamiento matemático de (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015). Por otra parte, se tuvo en cuenta un caso de dimensiones reales planteado por (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015) el cual involucra un poliducto Argentino. Dentro de análisis se aborda el transporte por un ducto desde un nodo de entrada a un nodo de entrega a través de una tubería unidireccional operada por la empresa Repsol TPF (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015)



Figura 10: Poliducto Argentino a ser analizado

Fuente: Elaborado por el autor (2017)

De acuerdo a lo descrito por (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015) el poliducto de estudio transporta productos refinados desde la refinería de Luján de Cuyo hasta un centro de almacenamiento en Villa Mercedes. El ducto fue diseñado con un diámetro de 14” y 338 km de longitud. Desde la refinería de Luján de Cuyo se transportan 5 productos derivados del petróleo: Nafta C (P1), Gasoil (P2), GLP - Gas Licuado del Petróleo (P3), Jet Fuel (P4) y Nafta V (P5) con las siguientes propiedades fisicoquímicas requeridas para determinar los frentes de contaminación y el perfil hidráulico del sistema:

Tabla 14. Propiedades Fisicoquímicas productos a transportar

PRODUCTO	GRAVEDAD API	VISCOSIDAD @ 30°C (cSt)
Nafta C (P1)	84.3	0.36
Gasoil (P2)	25.6	7.29
GLP (P3)	110	0.23
Jet Fuel (P4)	30	2
Nafta V (P5)	52	0.73

Fuente: Adaptado por el autor 2017

Para cada uno de los productos se cuenta con una disponibilidad para un horizonte de tiempo de 10 días los cuales deberán ser transportados y distribuidos en una demanda diaria requerida como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 15. Disponibilidad de refinados en Luján de Cuyo

PRODUCTO	DEMANDA DIARIA (BBL)	DEMANDA TOTAL (BBL)	PORCENTAJE DE PRODUCCIÓN (%)
Nafta C (P1)	16,281	162,805	11.3
Gasoil (P2)	105,525	1'055,254	73.3
GLP (P3)	3,344	33,437	2.3
Jet Fuel (P4)	5,955	59,552	4.1
Nafta V (P5)	12,914	129,142	9
TOTAL	144,019	1'440,190	100

Fuente: Adaptado por el autor 2017

Para este caso de estudio, se tomará un caudal de 6001 Barriles/hora independiente del refinado a transportar. Lo anterior con el fin de despachar en un día la demanda de cada producto. Los costos de bombeo unitarios por producto se presentan a continuación (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015):

Tabla 16. Costos Unitarios de bombeo por producto

PRODUCTO	USD/ BBL
Nafta C (P1)	1.294
Gasoil (P2)	1.509
GLP (P3)	1.617
Jet Fuel (P4)	1.401
Nafta V (P5)	1.401

Fuente: Adaptado por el autor 2017

7.3 Análisis de Datos

Para realizar la validación del método primero es necesario analizar los datos de entrada al modelo matemático. Como primera medida se deberán verificar aquellos datos que harán parte del cálculo de las interfaces entre productos y las posibles combinaciones para el despacho entre productos.

De lo anterior, se cuentan el número de elementos x (cabeza de lote i y espalda del lote j) en un conjunto n de elementos (cantidad de productos).

$$C_n^x = \frac{n!}{x!(n-x)!} = \frac{5!}{2!(5-2)!} = 10 \quad (36)$$

Tabla 17. Combinaciones posibles de interfaces entre productos

MATRIZ DE INTERFACES (KBBL)					
	P1	P2	P3	P4	P5
P1	X	1	2	3	4
P2	1	X	5	6	7
P3	2	5	X	8	9
P4	3	6	8	X	10
P5	4	7	9	10	X

Fuente: Elaborado por el autor (2017)

De acuerdo a (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015), el GLP en particular por su incompatibilidad, no puede transportarse ni antes ni después del Gasoil ni del Jet Fuel. Por lo anterior, la matriz de interfaces quedaría con 8 posibles combinaciones como se muestra a continuación:

Tabla 18. Combinaciones definitivas de interfaces entre productos

MATRIZ DE INTERFACES (KBBL)					
	P1	P2	P3	P4	P5
P1	X	1	2	3	4
P2	1	X		5	6
P3	2		X		7
P4	3	5		X	8
P5	4	6	7	8	X

Fuente: Elaborado por el autor (2017)

Para el análisis del cálculo de interfaces e hidráulico, se toma como criterio un sistema isotérmico, es decir que la temperatura a lo largo del proceso es constante. Por lo anterior, se tomará una temperatura de 30°C constante la cual está dentro del rango establecido por la ASTM

D-445 mencionado en el capítulo 3 y con la cual fueron determinadas las propiedades de densidad y viscosidad requeridas para los distintos cálculos.

Por otra parte, debido a que no se tenía el detalle del material y topografía de la tubería del ducto, se tomó como un Schedule Estándar con el fin de determinar su diámetro interno requerido para el cálculo del volumen de las interfaces y el cálculo hidráulico. Adicionalmente, se genera la simulación del ciclo de los lotes suponiendo una topografía plana del ducto.

7.4 Validación del Método

Para la validación del modelo, se tomaron los datos planteados por (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015) del poliducto desde Luján de Cuyo hasta el centro de almacenamiento en Villa Mercedes. Como primera medida, se determinó la secuencia de lotes teniendo en cuenta las combinaciones que generaran las menores interfaces y que por su compatibilidad pueden mezclarse dentro del ducto. Lo anterior se logra mediante la correlación:

$$\frac{c_b}{c_{bo}} = 0.5 * \left(1 - \operatorname{erf} \left[\frac{x - U_z * t}{\sqrt{4 * K * t}} \right] \right) \quad (14)$$

Teniendo en cuenta la anterior premisa, se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 19. Volumen de interfaces entre productos

MATRIZ DE INTERFACES (BBL)					
	P1	P2	P3	P4	P5
P1	X	397	155	266	203
P2	397	X	-	512	436
P3	155	-	X	-	186
P4	266	512	-	X	301
P5	203	436	186	301	X

Fuente: Elaborado por el autor (2017)

Como se puede observar en la Tabla 19, debido a que el producto P3 no puede generar interfaces con los productos P2 y P4 (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015) es necesario reubicarlo en el ciclo de despacho de lotes. Debido a que los menores volúmenes de interfaz que genera el producto P3 son con P1 y con P5, se puede deducir que su nueva ubicación será entre ellos. De esta manera, el ciclo de despacho de los 5 productos quedaría de la siguiente manera:



Figura 11: Ciclo del despacho de lotes

Fuente: Elaborado por el autor (2017)

Una vez determinada la secuencia de los lotes, se procede a determinar el volumen y la cantidad de los lotes, teniendo presente: el horizonte de tiempo, el flujo horario al que se transportarán los productos y el volumen disponible para transportar por día de cada uno de los productos.

De acuerdo a la secuencia de cálculo, primero se determina el volumen total por producto en el horizonte de tiempo basado en la nominación diaria mencionada en la Tabla 20:

$$P_{i...n} = p_{i...n} * \# \text{ días mes} \quad (16)$$

Tabla 20. Volúmenes totales por productos en el horizonte de tiempo

<i>TIPO DE PRODUCTO</i>	<i>VOLUMEN MES BBL</i>
P1	162805
P2	1055254
P3	33437
P4	59552
P5	129142

Fuente: Elaborado por el autor (2017)

Una vez determinados los volúmenes totales en el horizonte de tiempo, se procede a determinar la duración y número de ciclos para el caso de estudio:

$$d_c = \sum_{i=1}^n q_{lote\ i..n} * t_{lote\ i..n} \quad (17)$$

$$D_c = \frac{d_c}{24} \quad (18)$$

$$\#_{ciclos} = \frac{Días\ mes}{D_c} \quad (19)$$

Tabla 21. Duración por cada lote y Duración por cada ciclo

TIPO DE PRODUCTO	HORA/LOTE	No LOTES TOTAL
	HR	-
P1	3	8
P2	16	11
P3	1	17
P4	1	13
P5	3	7

TOTAL CICLO	24.0	HORAS
DURACION CICLO	1.0	DÍAS
No CICLOS	10	-

Fuente: Elaborado por el autor (2017)

De manera iterativa se calcula el tamaño del lote mejorando la distribución de los productos para su transporte para cada uno de los 5 productos a transportar:

$$t_{lote\ i..n} = \frac{B_{i..n}^*}{\dot{v}} \quad (21)$$

$$B_{i..n}^{**} = \frac{P_{i..n}}{Q_{lotes\ mes\ i..n}} \quad (22)$$

$$B_{i..n}^* = B_{i..n}^{**} \quad (23)$$

Tabla 22. Tamaño lotes de cada producto a transportar

TIPO DE PRODUCTO	TAMAÑO DEL LOTE i
	BBL
P1	20625
P2	98455
P3	1931
P4	4480
P5	18528

Fuente: Elaborado por el autor (2017)

Como se observa en la Tabla 22 el producto P4 es el que tiene el menor número de lotes de todo el ciclo, por lo cual se deduce que, debido a que cada ciclo dura un día el ciclo de bache hasta el sexto día será el mismo. De la misma manera pasa con los productos P1 y P3 los cuales presentan 8 lotes cada uno. Con la anterior información, se procede a determinar el ciclo de despacho durante el horizonte de tiempo de 10 días y el costo de transportar cada lote:

Tabla 23. Programa de bombeo propuesto

DÍA	1-10				
PRODUCTO	P3	P1	P2	P4	P5
VOL (BBL)	1931	20625	98455	4480	18528
Dc	0,32	3	16	1	3
USD/BBL	1,62	1,29	1,51	1,40	1,40
COSTO (USD)	3.122	26.679	148.580	6.277	25.964

Fuente: Elaborado por el autor (2017)

En la Tabla 23 se muestra el ciclo de los lotes durante los 10 días. Los volúmenes calculados cumplen el requerimiento de minimizar el consumo de energía en el horizonte de tiempo. Adicionalmente, los volúmenes a transportar por el ducto son los requeridos para mantener los inventarios de producto en sus mínimos, es decir, lo que está entrando al sistema está saliendo de él.

Tabla 24. Resultados finales del programa de bombeo planteado

TOTAL /DÍA	
VOL (BBL)	144,019
Dc	24
COSTO (USD)	210,622

Fuente: Elaborado por el autor (2017)

Para el anterior modelo se realizó una comparación con lo planteado por (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015), datos mostrados en la Tabla 25 referentes a los volúmenes programados en el horizonte de tiempo. Con base en los mismos costos de transporte y usando el procedimiento para el seguimiento de los lotes y el desfase horario entre lo programado y lo ejecutado como metodología Lean.

$$Relación Horaria (\overline{R.H}) = \frac{\frac{\sum_i^n \text{Volumen lote programado } i / \text{Flujo programado ducto}}{\sum_i^n \text{Volumen lote real ejecutado } i / \text{Flujo real ducto ejecutado}}}{\text{Número de lotes por día}} \quad (26)$$

$$Desfase Horario (D.H) = \left[\left(\frac{\sum_{i=0}^n \text{Volumen lote programado } i / \text{Flujo programado ducto}}{\text{Volumen lote real ejecutado } i / \text{Flujo real ducto ejecutado}} \right) * (\overline{R.H}) \right] * \text{No días} \quad (27)$$

Tabla 25. Resultados finales de tamaño de los planteados por (Cafaro V, Cafaro D,Méndez & Cerdá, 2015)

TIPO DE PRODUCTO	VOL PROGRAMADO	VOL REAL	HORAS PROG	HORAS REALES	HORAS DESFASADAS	RELACIÓN HORARIA	DEFASE HORARIO
	BBL	BBL	HR	HR	HR	-	HR
P1	20625	16281	3	3	1	1,27	0,0
P2	98455	105525	16	18	-1	0,93	
P3	1931	3344	0	1	0	0,58	
P4	4480	5955	1	1	0	0,75	
P5	18528	12914	3	2	1	1,43	

COSTO TOTAL DE TRANSPORTE / DÍA (REAL)	
212157	USD

Fuente: Elaborado por el autor (2017)

En el siguiente numeral se muestra el análisis de los resultados obtenidos de la metodología propuesta y lo planteado por (Cafaro V, Cafaro D,Méndez & Cerdá, 2015)

7.5 Análisis y resultados

De acuerdo a los resultados obtenidos en el numeral anterior, realizando una comparación entre los ciclos de los lotes presentados en la Tabla 25 vs los ciclos de los lotes presentados por (Cafaro V, Cafaro D,Méndez & Cerdá, 2015)presentados en la Tabla 16, se puede observar una diferente distribución de los lotes. Sin embargo, el costo energético por día es el mismo y adicionalmente se da cumplimiento a las entregas de las demandas por el punto de destino puesto que se está despachando lo nominado por parte de la refinería de Luján de Cuyo. Como metodología Lean, se plantea que los datos presentados por (Cafaro V, Cafaro D,Méndez & Cerdá, 2015)son datos obtenidos de SCADA y los cuales fueron bombeados por el ducto. En anterior análisis se realiza con el fin de poder comparar un sistema de programación vs el actual planteado:

Tabla 26. Comparación volúmenes obtenidos por el modelo matemático planteado vs modelo matemático (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015)

TIPO DE PRODUCTO	VOL PROGRAMADO	VOL REAL	DESFASE HORARIO
	BBL	BBL	HR
P1	20625	16281	0.0
P2	98455	105525	
P3	1931	3344	
P4	4480	5955	
P5	18528	12914	

Fuente: Elaborado por el autor (2017)

Por otra parte, se puede observar que los costos de transporte por el ducto están por debajo 0.73% determinados por el ciclo de lotes del modelo planteado en el presente trabajo y los obtenidos por (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015).

Tabla 27. Comparación costos de transporte modelo planteado vs modelo de (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015).

COSTO TOTAL DE TRANSPORTE / DÍA (PROGRAMADO)		COSTO TOTAL DE TRANSPORTE / DÍA (CAFARO)	
210622	USD	212157	USD

Fuente: Elaborado por el autor (2017)

Adicionalmente, realizó una comparación del consumo energético generado por cada modelo matemático mediante el cálculo hidráulico. Para el modelo matemático se tomó un lleno de línea de acuerdo a la secuencia de los lotes obtenidas y las nominaciones por día planteadas por (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015)

Tabla 28. Comparación consumo energético de transporte modelo planteado vs modelo de
(Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015)

ENERGÍA REQUERIDA POR EL SISTEMA / DÍA		ENERGÍA REQUERIDA POR EL SISTEMA REAL / DÍA	
16.04	MW	16.42	MW

Fuente: Elaborado por el autor (2017)

Como se observa en la Tabla 28, el consumo promedio día de energía para el transporte de los 5 productos desde la refinería de Luján de Cuyo hasta el centro de almacenamiento en Villa Mercedes, es de 16.04 MW, 2.3% menos que el modelo de (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015).

Por otra parte, con el fin de verificar el modelo matemático planteado y con el fin de verificar la importancia del operador de SCADA en la ejecución del programa de bombeo mediante la metodología Lean, se tomaron tamaños de lotes arbitrarios con el fin de verificar el comportamiento del sistema en cuanto a su consumo energético y al costo del transporte pero suponiendo la misma nominación para los 10 días de horizonte de tiempo. Para dicha simulación se supuso un flujo horario de 7000 BPH con los siguientes tamaños de lotes:

Tabla 29. Volúmenes arbitrarios de lotes

VOL REAL
BBL
18991
123097
3900
6947
15065

Fuente: Elaborado por el autor (2017)

En la anterior tabla se tuvo en cuenta los porcentajes de participación de cada uno de los productos en el ciclo planteados en la Tabla 16. Con dichos datos de entrada se determinó el consumo energético y costo de transportar los 5 productos.

Tabla 30. Comprobación del modelo matemático

ENERGÍA REQUERIDA POR EL SISTEMA REAL / DÍA		COSTO TOTAL DE TRANSPORTE / DÍA (REAL)	
25.49	MW	247484	USD

Fuente: Elaborado por el autor (2017)

Como se puede observar, al no dar cumplimiento del programa de bombeo y tomar tamaños diferentes a los programados, se genera un mayor consumo de energía y por ende un mayor costo de la misma, incrementando los desperdicios de Lean planteados en la Tabla 4.

7.6 Conclusiones del Capítulo

Como resultado del análisis se concluye que para el cálculo de costo energético presenta una convergencia en el 100% comprado entre el modelo matemático planteado en este documento y lo planteado por (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015). Por otra parte, se pudo observar que el consumo energético para ambos modelos es el mismo, comprobando así la sintonización del modelo planteado. Se realiza la comparación de las 5 variables de proceso requeridas para los cálculos tanto hidráulicos como energéticos.

Es importante tener en cuenta la determinación de las interfaces generadas en el transporte y las posibles combinaciones entre los productos. Lo anterior, con el fin de tener la menor interfaz para aquellos productos que por requerimiento el tamaño de sus lotes está por debajo del 2% del total del ciclo. Con el uso de los cálculos para las interfaces, se pudo concluir la importancia de generar

un ciclo lógico y cumpliendo las necesidades del programador del ducto, reduciendo la contaminación entre lotes y por ende la reducción de los costos de su tratamiento.

En este último capítulo se logró verificar la aplicación de la metodología Lean en el transporte de hidrocarburos, identificando las variables de proceso operativas y externas y sus respectivas técnicas de medición y análisis. Dicha verificación se dio al establecer las condiciones iniciales base que caracterizan el proceso del transporte por ductos. Se generó el modelamiento matemático de la operación del bombeo en ductos la cual potencializa la función objetivo en la reducción del consumo energético mediante la aplicación de los conceptos Lean.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES FUTURAS

8.1 Conclusiones

Los resultados logrados en esta tesis y su respectivo análisis permiten obtener las siguientes conclusiones respecto a la programación de bombeo en ductos para el transporte de petróleo crudo e hidrocarburos derivados:

- Con el modelo matemático planteado, se puede observar una reducción en el consumo de energía del 2.3% comparado por lo planteado por (Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá, 2015). Lo anterior se da debido a la distribución mejorada de los lotes y al cumplimiento del programa de bombeo por SCADA.
- Existen pocos modelos matemáticos para la programación de ductos y que a su vez, manejen en su simulación el transporte de varios productos. Por lo anterior, esta tesis plantea un modelo eficiente y direccionado a la reducción del consumo energético del sistema.
- Al tratarse de un sistema logístico de recibo y entrega de distintos productos es necesario identificar las distintas variables de proceso con el fin de poder asociar cuál de ellas son consideradas “desperdicios” de acuerdo a la metodología Lean. El acotar dichas variables permite reducir los tiempos de cálculo y poder realizar distintas iteraciones con el fin de determinar la mejor solución al sistema de ecuaciones planteadas.
- El modelo planteado está restringido a ductos con un solo punto de origen y a un solo punto de entrega. Sin embargo, es aplicable para usarse por nodos en sistemas como varios puntos de origen y varios puntos de entrega.

- Mediante la implementación de la metodología Lean es claramente identificable la importancia que ocupa solo el programador del ducto sino los operadores de SCADA como ejecutores de dicho programa. En la medida que el operador realice cambios en los ciclos de los lotes no programados, se verán incrementados desperdicios identificados.
- Es indispensable capacitar y familiarizar a todo el personal involucrado en la operación de transporte por ductos y hacerlos partícipes con el fin que se apropien del proceso y de la metodología, mostrando las ventajas en ahorros energéticos por el cumplimiento del programa de bombeo mediante la implementación de la metodología Lean.
- La herramienta de cálculo permite que el programador se asegure del correcto secuenciamiento de los productos teniendo como criterio de selección los menores volúmenes generados por interfaces entre ellos. Lo anterior permite al personal mitigar uno de los desperdicios identificados en la metodología Lean en la programación de ductos.
- El modelo matemático planteado permite al programador tener un horizonte de tiempo extendido a un mes con el fin de poder realizar un análisis presupuestal y de mantenimiento a los equipos de bombeo de ser requeridos.
- Se plantea la reducción de los almacenamientos en los puntos de origen puesto que la metodología plantea un sistema “pull” (jalar) y no push “empujar”, es decir, todo lo que se recibe se despacha manteniendo las variables operativas constantes y los inventarios de los tanques en mínimos reduciendo sus costos de mantenimiento.
- La nueva herramienta está en la capacidad de simular programas de bombeo teniendo en cuenta posibles reductores de fricción (DRA) que mejoren aún más los consumos energéticos del ducto. Dentro de los resultados obtenidos no se realizó un análisis de esta

parte de la herramienta debido a falta de información en la literatura para la comprobación del método.

- Es posible controlar la concentración máxima aceptables de las interfaces generadas entre los productos. Está opción permite al programador del ducto poder reducir las interfaces de requerirlo aumentando dichas concentraciones o viceversa.
- Debido a que la metodología va más direccionada al cumplimiento del programa de bombeo por parte de los operadores de SCADA, el modelo matemático se basó en correlaciones fundamentales para el transporte de fluidos por tuberías y balances de materia. Lo anterior supone que no fue necesaria la implementación de modelos complejos de formulación matemática mixta-entera no-lineal (MILP).

8.2 Recomendaciones para la implementación

- Para el modelo matemático planteado en esta tesis se recomienda usarlo en ductos con una topografía plana. Se debe tener presente que los cálculos hidráulicos de la herramienta no cuenta con variables como diferencias de alturas. Es importante tener presente que si se cuentan con estaciones de rebombeo intermedias, se debe realizar un ajuste en los diferenciales de presión de cada estación para así determinar el consumo energético aproximado del sistema.
- Para el uso de la herramienta computacional se propone el uso de datos iniciales de cálculo acordes con la nominación del producto y el tiempo estimado que tarda en llegar la interfaz en el punto final del ducto. Estos datos de entrada ayudarán al modelo a ejecutarse con menos iteraciones en un menor tiempo y adicionalmente arrojaría datos más confiables en cuando a los tamaños de los lotes.

- Se propone socializar la herramienta de cálculo no solo con el programador del ducto sino también con los ejecutores, en este caso con los operadores de SCADA, lo anterior beneficiaría el proceso de la correcta programación y adicionalmente se cumpliría una de las reglas de oro de la metodología Lean, el cual es hacer partícipes a todos aquellos que están asociados al proceso de transporte.
- Se recomienda tener una base de datos de todos los productos a transportar por el ducto. Se deberá contar con curvas reológicas dependiendo de la temperatura promedio del ducto, así se tendrá un resultado más cercano tanto del tamaño de las interfaces como de los perfiles hidráulicos del sistema.

8.3 Recomendaciones futuras

- Para la herramienta de cálculo desarrollada en este trabajo, se recomienda implementar la programación con varios puntos de origen y varios puntos de entrega. Plantear lo requerido para diseñar redes de ductos.
- Se propone para estudios futuros contemplar ductos donde se incorpore la topografía del ducto, la cual no solo modifica los cálculos hidráulicos sino también los cálculos de las interfaces de los productos, haciendo más riguroso el cálculo.
- El mejoramiento continuo de la herramienta de cálculo deberá contar con la posibilidad de manejar flujos variables en el horizonte de tiempo. Lo anterior con el fin de manejar paradas no programadas del ducto. Tener presente costos de arranque y parada del ducto, los cuales están asociados a pérdida de carga de las unidades de bombeo, aumento de mantenimientos correctivos y la confiabilidad del equipo.

- Se recomienda que mediante la metodología Lean se identifiquen posibles nuevos desperdicios en la programación de ductos y plasmarlos como nuevas restricciones para la minimización del consumo energético y costos energéticos.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguaron & Moreno. (2003). The geometric consistency index: Approximated thresholds. *European journal of operational research*. 147(1), 137-145.
- Alvarez J, Alvarez F., González A, EscobarJ, FerreiraC, Montes J & Chinchilla. (2011). ANÁLISIS ESTADÍSTICO EN LA PREDICCIÓN DEL VOLUMEN DE CONTAMINACIÓN GENERADO EN EL TRANSPORTE DE LOTES SUCESIVOS DE HID.
- Ball, Dickerson & Hertel. (2011). Configurable tools for the pipeline scheduler. In PSIG Annual Meeting. Pipeline Simulation Interest Group. 23(8), 455-460.
- Cafaro V, Cafaro D, Méndez & Cerdá. (2015). MINLP model for the detailed scheduling of refined products pipelines with flow rate dependent pumping costs. *Computers & Chemical Engineering*, 72, 210-221.
- Camacho, Ridao, Ternero, & Rodriguez. (1990). Optimal operation of pipeline transportation systems. *IFAC Proceedings*.
- CAMPETROL. (2015). Sector Minero y Petrolero en Colombia. Bogotá DC. *Cámara Colombiana de Servicios Petroleros* .
- Chintala. (2010). A computational study of interfacial mixing in pipeines, logistics and diverse models to predict the interface length. .
- Choudhury, Jain & Shah. (2008). Stiction–definition, modelling, detection and quantification. *Journal of Process control*, 18(3), 232-243.
- Daubert & Danner. (1997). Data Compilation of Pure Compound Properties. *Technical Database Services*.

- ECOPETROL. (2014). *Energía para el futuro*. . Obtenido de Quienes somos: <http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/quienes-somos/lo-que-hacemos/transporte>
- Freitas & de Araujo. (2007). Sensitivity curve of volume balance leak detection systems for batched pipelines.
- Gary & Handwerk. (1994). Petroleum Refining Crude Oil. *Petroleum Refining, Technology and Economics Fourth Edition*.
- Hane & Ratliff . (1995). Sequencing inputs to multi-commodity pipelines. *Annals of Operations Research*, 57(1), 73-101.
- Hernández & Vizán. (2013). *Lean Manufacturing: Conceptos, Técnicas e Implantación*. Madrid: Escuela de Organización Industrial.
- Hoffman, Crump & Hocott. (1953). Equilibrium constants for a gas-condensate system. . *Journal of Petroleum Technology*, 5(01), 1-10.
- Hou, Y., Wu, N., Zhou, M., & Li, Z. (2017). Pareto-optimization for scheduling of crude oil operations in refinery via genetic algorithm. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 47(3), 517-530.
- Levenspiel, O. (1958). Longitudinal mixing of fluids flowing in circular pipes. *Industrial & Engineering Chemistry*,, 50(3), 343-346.
- Liker, J. (2004). *Becoming lean: Inside stories of US manufacturers*. CRC Press.
- Magatão, Arruda & Neves. (2004). A mixed integer programming approach for scheduling commodities in a pipeline. *Computers & chemical engineering*, 28(1), 171-185.

- MirHassani & Ghorbanalizadeh. (2008). The multi-product pipeline scheduling system. *Computers & Mathematics with Applicatio*, 56(4), 891-897.
- Morgan & Liker. (2006). The Toyota product development system. New York: Productivity Press.
- Mostafaei, H., Castro, P. M., & Ghaffari-Hadigheh, A. (2015). A novel monolithic MILP framework for lot-sizing and scheduling of multiproduct treelike pipeline networks. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54(37), 9202-9221.
- Ohno, T. (1988). Toyota production system: beyond large-scale production. crc Press.
- Puttonen, J. (2015). Case Espoo Verkkoneuvontapalvelu. . *Building Lean Development Pipeline*.
- Rabinow, R. A. (2004). The liquid pipeline industry in the United States: Where it's been, where it's going. . *Washington: Association of Oil Pipe Lines (AOPL)*.
- Rajadell & Sánchez. (2010). *Lean Manufacturing: La evidencia de una necesidad*. Madrid: Díaz de Santos.
- Rejowski & Pinto. (2003). Scheduling of a multiproduct pipeline system. *Computers & Chemical Engineering*, ., 27(8), 1229-1246.
- Riazi, M. (2005). *Characterization and properties of petroleum fractions* . ASTM international.
- Saaty. (1980). *Marketing applications of the analytic hierarchy process*. 26(7), 641-658.
- Sasikumar, Prakash,Patil, & Ramani. (1997). PIPES: A heuristic search model for pipeline schedule generation. *Knowledge-Based Systems*, 10(3), 169-175.
- Shalloway,Beaver & Trott. (2009). *Lean-agile software development: achieving enterprise agility*. Pearson Education.
- Sheppard. (1984). Introduction to the oil pipeline industry. *Petroleum Extension Service*.

- Siswanto, Essam & Sarker. (2011). Multi-heuristics based genetic algorithm for solving maritime inventory routing problem. *In Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*.
- Speight. (1994). . Chemical and physical studies of petroleum asphaltenes. *Developments in petroleum science*, 40, 7-65.
- Trench, C. (2001). How Pipelines Make the Oil Market Work – Allegro Energy Group, Association of Oil Pipelines, Nueva York, EE.UU., 1-20. *Their Networks, Operation, and Regulation.*, 1-20.
- Uzochukwu & Ossai. (2016). Lean Production: A Frontier for Improving Performance of Oil and Gas Companies in Nigeria.
- Wilson, L. (2009). *How to implement lean manufacturing*. McGraw Hill Professional.
- Wind, Y., & Saaty, T. (1980). Marketing applications of the analytic hierarchy process. *Management science*, 26(7), 641-658.
- Womack, Jones & Roos. (1990). *The Machine That Changed the World: The Story of Lean Production: How Japan's Secret Weapon in the Global Auto Wars Will Revolutionize Western Industry*. New York: Rawson Associates.
- Wu, N., Zhou, M., & Li, Z. (2015). Short-term scheduling of crude-oil operations: enhancement of crude-oil operations scheduling using a Petri net-based control-theoretic approach. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 22(2), 64-76.
- Zhang, H., Liang, Y., Liao, Q., Wu, M., & Yan, X. (2017). A hybrid computational approach for detailed scheduling of products in a pipeline with multiple pump stations. *Energy*, 119, 612-628.

Zlotnik, A., Roald, L., Backhaus, S., Chertkov, M., & Andersson, G. (2017). Coordinated scheduling for interdependent electric power and natural gas infrastructures. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(1), 600-610.

ANEXO A

Metodología de cálculo programación de ductos mediante la implementación de la metodología

Lean:

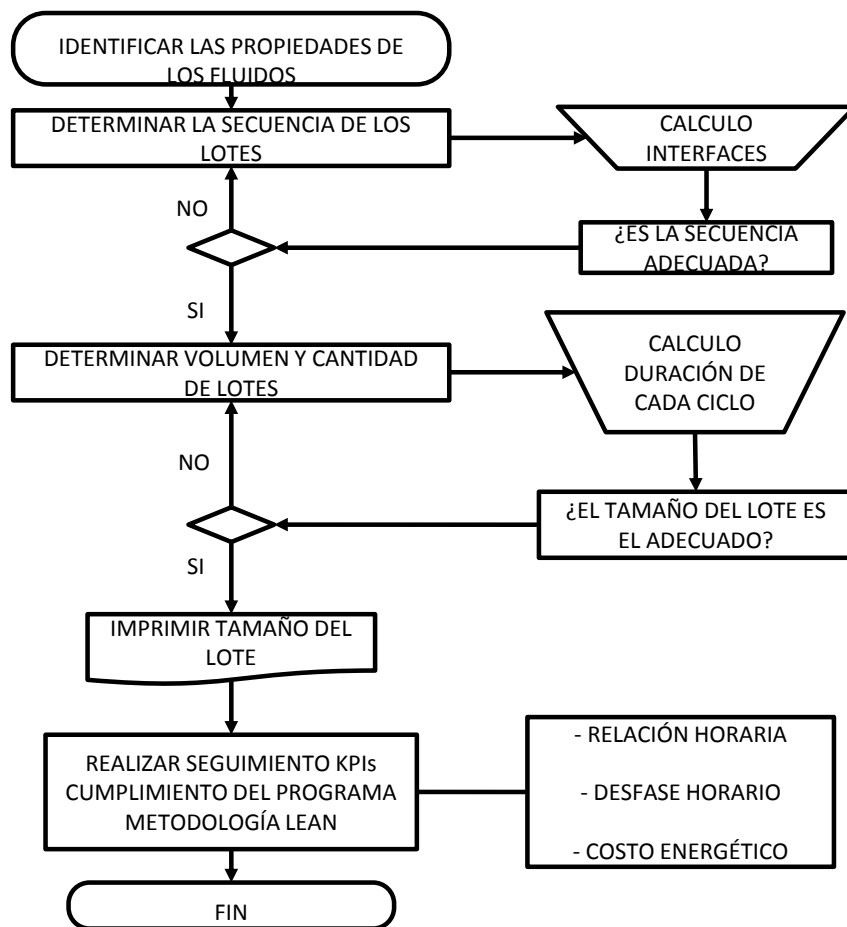


Figura 12: Diagrama de flujo para la programación de ductos

1. Cálculo Interfaces (Para los productos P4 y P5).

a. Datos de entrada:

Tabla 31. Datos de Entrada Memoria de Cálculo

TEMP FLUIDO	30	°C
P4	30	-
P5	52	-
VISC 1	2,00	cSt
VISC 2	0,73	
VISC MZ	1,26	
LONGITUD TUBO	338000	m
DIAMETRO TUBO	0,3366	
FLUJO HORARIO	6001	BPH
VELOCIDAD	2,98	m/s

b. Cálculo Viscosidad de la interfaz.

$$\mu_{mezcla} = 0.5 * 2^{1/3} + 0.5 * 0.73^{1/3} = 1.26 \text{ cSt} \quad (1)$$

c. Cálculo Número de Reynolds

$$Re = \frac{0.3366 * 2.98}{1.26} = 795412.6 \quad (2)$$

d. Cálculo coeficiente dispersión axial

$$K = \frac{0.3366}{2} * 2.98 * 2592 * 795412.6^{-0.9} * \left(\frac{2 * 338000}{0.3366}\right)^{0.141} = 0.049 \frac{m^2}{s} \quad (3)$$

e. Cálculo tiempo medio de la interfaz

$$T_M = \frac{338000}{2.98} = 113492.35 \text{ segundos} \quad (4)$$

f. Cálculo tiempo final de la interfaz

$$T_{AB} = 2 * 113492.35 - T_{BA}' \quad (5)$$

Donde, T_{BA}' Es el tiempo inicial de la interfaz. Valor a iterar (Valor Inicial de 113447.18 segundos)

g. Cálculo concentración de P4 en P5.

$$C_{P4}/C_{P5} = 0.5 * \left(1 - \operatorname{erf} \left[\frac{2.98 * 113492.35 - 338000}{\sqrt{4 * 0.049 * 113492.35}} \right] \right) = 0.1 \quad (6)$$

h. Cálculo Volumen Interfaz

$$V_c = 0.089 * 2.98 * (113537.5 - 113447.2)[2 * 6.28981] = 301.14 \text{ Barriles}$$

i. Cálculo iterativo del volumen de la interfaz. El punto inicial es $C_{P4}/C_{P5}' = 0.1$, es decir una concentración máxima de P4 en P5 del 10%. Lo anterior converge en el momento en que

$$C_{P4}/C_{P5}' = C_{P4}/C_{P5} \text{ variando el tiempo inicial de la interfaz.}$$

2. Cálculo tamaño de lotes

a. Datos de entrada cálculo tamaño de lotes

Tabla 32. Datos de Entrada Memoria de Cálculo Tamaño Lotes

PROGRAMA		
DIAS DE ANALISIS	10	DÍA
FLUJO DIARIO	144019	BPD
FLUJO HORARIO	6001	BPH
TOTAL CICLO	24,0	HORAS
DURACION CICLO	1,0	DÍAS
No CICLOS	10	-

b. Cálculo del volumen de cada producto en el horizonte de tiempo:

Tabla 33. Cálculo del volumen de cada producto en el horizonte de tiempo

TIPO DE PRODUCTO	VOLUMEN DÍA * DÍAS DE ANALISIS	VOLUMEN A 10 DÍAS
	BBL	BBL
P1	16281*10	162805
P2	105525*10	1055254
P3	3344*10	33437
P4	5955*10	59552
P5	12914*10	129142

- c. Cálculo de número de lotes en el horizonte de tiempo partiendo de un factor de lotes supuesto:

Tabla 34. Cálculo de número de lotes en el horizonte de tiempo partiendo de un factor de lotes supuesto

TIPO DE PRODUCTO	FACTOR DE LOTES * No CICLOS	No LOTES TOTAL
	-	-
P1	0,79 * 10	8
P2	1,07* 10	11
P3	1,73* 10	17
P4	1,33* 10	13
P5	0,70* 10	7

- d. Cálculo del tamaño del lote mediante la división del volumen proyectado en el horizonte de tiempo y el número de lotes:

Tabla 35. Cálculo del tamaño del lote mediante la división del volumen proyectado en el horizonte de tiempo y el número de lotes

VOLUMEN MES	OPERACIÓN MATEMATICA	No LOTES TOTAL	TAMAÑO DEL LOTE $B_{i..n}^{**}$
BBL	-	-	BBL
162805	÷	8	20625
1055254		11	98455
33437		17	1931
59552		13	4480
129142		7	18528

e. Cálculo de la duración de cada uno de los lotes

Tabla 36. Cálculo de la duración de cada uno de los lotes

TAMAÑO DEL LOTE $B_{i...n}^*$	OPERACIÓN MATEMATICA	FLUJO HORARIO	HORA/ LOTE
BBL	-	BPH	HR
20625	÷	6001	3
98455			16
1931			0
4480			1
18528			3

f. Se debe realizar la iteración de para que $B_{i...n}^{**} = B_{i...n}^*$ sean iguales, minimizando la función objetivo.

Tabla 37. Cálculo Iteración Minimización Función Objetivo

TIPO DE PRODUCTO	CAÍDA DE PRESIÓN	LONGITUD DEL LOTE
	Bar/100m	m
P1	$0,5 * 0.013 * 597^2 / (0.3366 * 1000)$	$(0,158987 * 20625) / 0.089$
P2	$0,5 * 0.017 * 896^2 / (0.3366 * 1000)$	$(0,158987 * 98455) / 0.089$
P3	$0,5 * 0.013 * 466^2 / (0.3366 * 1000)$	$(0,158987 * 1931) / 0.089$
P4	$0,5 * 0.015 * 874^2 / (0.3366 * 1000)$	$(0,158987 * 4480) / 0.089$
P5	$0,5 * 0.014 * 761^2 / (0.3366 * 1000)$	$(0,158987 * 18528) / 0.089$

PRESIÓN (PPn)	ENERGÍA/LOTE
Bar	BHP
Caída de Presión P1*Longitud Lote P1/100	$6001 * 0,7 * (PP1) * 14,5038 / 1715 = 1359$
Caída de Presión P2*Longitud Lote P2/100	$6001 * 0,7 * (PP2) * 14,5038 / 1715 = 13053$
Caída de Presión P3*Longitud Lote P2/100	$6001 * 0,7 * (PP3) * 14,5038 / 1715 = 98$
Caída de Presión P4*Longitud Lote P2/100	$6001 * 0,7 * (PP4) * 14,5038 / 1715 = 485$
Caída de Presión P5*Longitud Lote P2/100	$6001 * 0,7 * (PP5) * 14,5038 / 1715 = 1609$

g. Finalmente, la sumatoria de la energía consumida por cada producto a transportar será la función a minimizar:

$$\min \varepsilon = 1359 + 13053 + 98 + 485 + 1609 = 16603 \text{ HP} \quad (7)$$