

UNIVERSIDAD PANAMERICANA
FACULTAD DE INGENIERÍA

Con estudios incorporados a la
Secretaría de Educación Pública

**“METODOLOGÍAS PARA MEJORAR LA PLANEACIÓN
DEL USO DE LA FUERZA MOTRIZ EN UNA COMPAÑÍA
FERROVIARIA”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
MAESTRÍA EN INGENIERÍA**

P R E S E N T A

OSWALDO VLADIMIR MOTA HERNÁNDEZ

DIRECTOR DE TESIS:

**MARÍA DE LOURDES GUADALUPE MARTÍNEZ
VILLASEÑOR**

Agradecimientos

- Con todo mi corazón y cariño, como resultado del esfuerzo y dedicación a lo largo de sus vidas: para mis padres, Ricardo Mota y María Eugenia Hernández, mi hermana, Jacqueline Mota y mi abuela, Sofía Sánchez, quienes, con su apoyo, cariño y confianza, me han convertido en una persona de provecho, ayudándome a culminar una meta muy importante en mi vida.
- A mi esposa Fabiola Rodríguez, con todo mi amor y como muestra de seguir luchando para alcanzar todo lo que soñemos.
- Para mi amigo Israel López, primero por adentrarme al mundo del ferrocarril y segundo por compartirme todo su conocimiento y recomendaciones cuando más las necesité y por último por tener el privilegio de haber trabajado a tu lado.
- Con gran admiración y respeto a la Dra. María de Lourdes Martínez Villaseñor por la dirección de la tesis y por su apoyo en cada clase.
- Al ingeniero Juan Carlos Villa por la revisión de esta tesis, así como sus comentarios y atinadas sugerencias.
- A la Universidad Panamericana y a la Facultad de Ingeniería, por brindarme la oportunidad de realizarme como profesionista y aspirar al grado de maestro.
- **En memoria del gran cantante y persona, *Guillermo Guerra*, quien siempre vivirá en nuestros recuerdos y con sus grandes canciones, que algún día mis hijos escucharán. Será imborrable su legado.**

Resumen

El problema de dimensionamiento de locomotoras a largo plazo y planeación de la asignación de máquinas a los trenes es un problema que actualmente en México no cuenta con una metodología para resolverlo, en los ferrocarriles americanos hay diferentes soluciones a nivel estratégico que involucran aspectos de la vía, talleres y flota, pero enfocados en el tren de pasajeros. Dentro del tren de carga sólo existen soluciones a nivel operativo y con un horizonte máximo de siete días, lo cual no permite proyectar a largo plazo el número de máquinas requeridas.

En este trabajo se plantean dos metodologías para solucionar el problema de no tener suficiente fuerza tractiva para cubrir la demanda requerida y plantear una mejora en la asignación de locomotoras a los trenes más importantes y así optimizarlos. Se realiza un análisis histórico de los últimos doce meses, en el cual se determina la productividad por tipo de máquina, promedio diario de uso de fuerza extranjera, disponibilidad de locomotoras, rutas operativas de la red ferroviaria, tonelaje bruto promedio de trenes, número promedio de máquinas por tren, entre otros factores. Se dan las bases para proyectar la flota mínima diaria de locomotoras a un horizonte de cinco años y se muestran los beneficios de una mejor planeación de asignación de máquinas a los trenes más importantes por tipo. El resultado del análisis determina que se puede eliminar el uso de máquinas externas, se justifica la adquisición de máquinas nuevas de corriente alterna (AC) de última tecnología por renovación de flota obsoleta de máquinas de corriente directa (DC) y se obtiene una reducción de uso de fuerza en cada tren al mover la misma carga con menos locomotoras, generando ahorros en consumos de combustible importante a lo largo del año. Se sugiere mayor investigación relacionada a la capacidad de arrastre por cada eje operativo de las nuevas locomotoras AC con el fin optimizar aún más la fuerza motriz que debe de llevar cada tren.

Contenido

Agradecimientos	1
Resumen.....	2
Índice de Tablas y Figuras.....	6
Tablas	6
Figuras	7
Introducción	8
Capítulo 1. Antecedentes	11
1.1 Privatización de Ferrocarriles Nacionales de México.....	11
1.2 Participación del ferrocarril en el transporte de carga	12
1.3 Carga movida por concesionario en 2018.....	13
1.4 Crecimiento de la fuerza motriz del Sistema Ferroviario Mexicano	14
1.5 Fuerza motriz del Sistema Ferroviario Mexicano en 2017.....	14
1.6 Tipos de Locomotoras	15
1.7 Flota total de locomotoras de Ferromex en la actualidad	16
Capítulo 2. Diagnóstico de la situación actual de la fuerza motriz en Ferromex.....	18
2.1 Impacto del uso de máquinas extranjeras en Ferromex.....	18
2.2 Impacto en el consumo de combustible y gastos de mantenimiento por no contar con una eficiente planeación de asignación de máquinas a los trenes.....	21
2.3 Objetivos e hipótesis	22
2.4 Definición del problema	23
Capítulo 3. Marco teórico	24
Capítulo 4. Metodologías para la optimización del uso de la fuerza motriz en una compañía ferroviaria.....	29
4.1 Plan para el dimensionamiento de la flota mínima de locomotoras requeridas diariamente para operar a un horizonte de 5 años.....	29
4.1.1 Diagrama de flujo del plan para el dimensionamiento de la flota mínima de locomotoras	30
1.-Nuevo pronóstico quinquenal de TKN's	31
2.-Aplicar factor TKB/TKN al pronóstico para obtener TKB's.....	31
3.-Promedio de TKB's diarias a mover por mes	31
4.-Obtener la productividad por tipo de locomotoras (AC y DC).....	31

5.-Asignar locomotoras AC a la operación con base en el porcentaje de disponibilidad del año pasado	31
6.-Balance de TKB's a Mover VS TKB's de la flota de camino (AC y DC)	32
4.1.2 Caso práctico de aplicación en una compañía ferroviaria	33
4.1.2.1.-Nuevo pronóstico quinquenal de TKN's y estacionalidad	33
4.1.2.2.- Aplicar factor TKB/TKN al pronóstico para obtener TKB's y el promedio de TKB's diarias a mover por mes.....	35
4.1.2.3.-Obtener la productividad por tipo de locomotoras (AC y DC).....	36
4.1.2.4.-Asignar locomotoras AC a la operación con base en el % de disponibilidad del año pasado	36
4.1.2.5.-Balance de TKB's a Mover VS TKB's de la flota de camino (AC y DC)	36
4.1.2.6.-Resultados.....	38
4.1.3 Justificación de la compra de locomotoras mediante un ACB (Análisis Costo-Beneficio)41	
4.1.3.1 Criterios de evaluación.....	41
4.1.3.2 Evaluación financiera	42
4.1.3.3 Flujo financiero.....	43
4.1.4 Conclusiones de la metodología	45
4.2 Planeación para la asignación del número de máquinas por tramo operativo que necesitan los trenes más importantes por segmento de mercado.....	46
4.2.1 Diagrama de flujo la asignación de número de máquinas por tramo operativo para los trenes más importantes por tipo	47
1.-Nuevo pronóstico anual de demanda de carga a mover mes x mes (toneladas comerciales netas)	48
2.-Aplicar factor Ton Br/Ton Net al pronóstico.....	48
3.-Promedio de toneladas brutas diarias a mover por mes.....	48
4.-Obtener los trenes más importantes por tipo con base en el histórico del último año... 48	
5.-Definir las rutas operativas por donde correrán los trenes.....	48
6.-Asignar el factor de caballaje compensado por cada tramo operativo	48
7.-Clasificar los trenes por rumbo y asignar sus tramos	49
8.-Obtener el número de HP's por tren en cada tramo operativo	49
9.-Transformar HP's en número de máquinas que se necesitan x tramo en cada tren	49
4.2.2 Caso práctico de aplicación en una compañía ferroviaria	49
4.2.2.1.-Nuevo pronóstico anual de mes x mes (toneladas comerciales netas).....	50

4.2.2.2.-Aplicar factor Ton Br/Ton Net al pronóstico.....	50
4.2.2.3.-Promedio de toneladas brutas diarias a mover por mes.....	50
4.2.2.4.-Obtener los trenes más importantes por tipo con base en el histórico 2018	51
4.2.2.5.-Definir las rutas operativas por donde correrán los trenes.....	52
4.2.2.6.-Asignar el factor de caballaje compensado por cada tramo operativo.....	54
4.2.2.7.-Clasificar los trenes por rumbo y asignar sus tramos	54
4.2.2.8.-Obtener el número de HP's por tren en cada tramo operativo	55
4.2.2.9.-Transformar HP's en número de máquinas que se necesitan x tramo en cada tren	56
4.2.2.10.-Resultados de la metodología.....	56
4.2.3 Ahorros por el uso de la metodología desarrollada.....	61
4.2.4 Conclusiones de la metodología	64
Capítulo 5. Recomendaciones para investigaciones a futuro	65
Referencias.....	66

Índice de Tablas y Figuras

Tablas

Tabla 1 - Evolución de la fuerza motriz del SFM (Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario, 2018)	14
Tabla 2 - Distribución de fuerza motriz en el SFM	14
Tabla 3 - Tabla de flota de locomotoras FXE por marca y modelo	17
Tabla 4 - Toneladas Brutas - Km que se movieron por los distritos fronterizos en 2018 en la red de Ferromex	18
Tabla 5 - Consumo mensual de combustible 2018 por tipo de locomotoras	22
Tabla 6 - Pronóstico de ventas en TKN's	34
Tabla 7 - Estacionalidad.....	34
Tabla 8 - Estadística histórica de TKN's y TKB's.....	35
Tabla 9 - Promedio diario de TKB's mes x mes de los cinco años	35
Tabla 10 - Estadística histórica del año anterior de productividad por tipo de locomotora	36
Tabla 11 - Disponibilidad histórica de locomotoras AC del último año	36
Tabla 12 - Flota efectiva de locomotoras AC.....	36
Tabla 13 - Cálculo de locomotoras requeridas.....	37
Tabla 14 - Locomotoras adicionales por año	38
Tabla 15 - Plan de adquisición de locomotoras	38
Tabla 16 - Flujo financiero del costo beneficio de la compra de locomotoras (1/2)	43
Tabla 17- Flujo financiero del costo beneficio de la compra de locomotoras (2/2)	44
Tabla 18- Pronóstico anual 2019 de toneladas comerciales netas	50
Tabla 19- Proyección de toneladas brutas para el siguiente año	50
Tabla 20 - Proporción de toneladas por tipo de tren del último año y proyección.....	51
Tabla 21 - Toneladas brutas a mover por tipo de tren mes x mes.....	51
Tabla 22 - Promedio diario por toneladas brutas por tipo de tren	51
Tabla 23 - Trenes tipo A más importantes	52
Tabla 24 - # de trenes por tipo a proyectar.....	52
Tabla 25- Rutas operativas de la red de Ferromex	52
Tabla 26 – Factores de caballaje compensado en la ruta Ciudad Juárez – Valle de México	54
Tabla 27 - Clasificación de trenes tipo A por rumbo N y S	54
Tabla 28 – Asignación de tramos operativos para los trenes automotrices.....	55
Tabla 29 – HP's necesarios por tren para cada tramo operativo 1/2	56
Tabla 30 - Reducción de uso de fuerza motriz mediante el uso de la metodología propuesta.....	62

Figuras

Figura 1 - Mapa del Sistema Ferroviario Mexicano (Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario, 2017)	11
Figura 2- Gráfica de evolución de la carga transportada en el SFM (Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario, 2018)	12
Figura 3 - Crecimiento de la participación del ferrocarril en el transporte de carga del 1999 al 2017	13
Figura 4 - Toneladas movidas por concesionario de ferrocarril en 2018.....	13
Figura 5 - Máquina FXE-4816 (Modelo G.E. ES-4,400AC, 2016, 6 ejes, AC, 4,400 HP's)	15
Figura 6 - Adquisición de locomotoras AC por parte de Ferromex a lo largo de la concesión	16
Figura 7 - Composición de la flota actual de locomotoras FXE	16
Figura 8- Ubicación de los puntos de intercambio fronterizo entre Ferromex y Ferrocarriles de Estados Unidos.....	18
Figura 9- Gráfica de promedio diario de locomotoras mes a mes.....	19
Figura 10 - Gráfica de locomotoras de FXE fuera de su red y de locomotoras externas en territorio FXE	20
Figura 11 – Efecto neto de locomotoras fuera de FXE y externas en FXE	20
Figura 12 – Gráfica de consumo de combustible mensual 2018	22
Figura 13 – Niveles de clasificación del Problema de Asignación de Locomotoras (LAP) (Assad, 1980)	25
Figura 14 – Diferentes etapas en el proceso de planeación (Goossens, 2006)	26
Figura 15 - Proceso general para el requerimiento de locomotoras	30
Figura 16 - Diagrama de flujo para comparar TKB's a mover vs Fuerza AC	32
Figura 17 - Diagrama de flujo para comparar TKB's a mover vs Fuerza DC	33
Figura 18 - Gráfica quinquenal del promedio diario mes a mes de demanda y fuerza tractiva	38
Figura 19- Gráfica quinquenal del promedio diario mes a mes de demanda y fuerza tractiva con máquinas adicionales	39
Figura 20 - Proceso general para la asignación de máquinas a los trenes por tramo operativo	47
Figura 21 - Factor de conversión toneladas brutas entre netas operativas	50
Figura 22 - Patios operativos o de intercambio de máquinas en la red de Ferromex	53
Figura 23 - Locomotoras requeridas por tramo de un tren (actualmente)	56
Figura 24 - Locomotoras requeridas por tramo de un tren (propuesta)	57
Figura 25 - Comparativo de # de máquinas por tramo de un tren	57
Figura 26 - Máquinas x tren x tramo operativo 1/3	58
Figura 27 - Máquinas x tren x tramo operativo 2/3	59
Figura 28 - Máquinas x tren x tramo operativo 3/3	60
Figura 29 - Máquinas AC y DC promedio diario que se necesitan por patio	61
Figura 30 – Comparativo de consumo de combustible por tramo	63

Introducción

El tema de este trabajo es desarrollar dos metodologías para la optimización de la planeación de uso de la fuerza motriz dentro de una compañía ferroviaria. La primera consiste en dimensionar la flota mínima de locomotoras de camino que se necesita para operar diariamente a un futuro de cinco años y la segunda trata de plantear una mejora para la asignación de locomotoras para los trenes más importantes por segmento de mercado. Actualmente la compañía sobre la que se aplican las metodologías antes descritas enfrenta varios problemas con respecto a la fuerza motriz o número de locomotoras con las que cuenta. El primero y más importante es que en los últimos años, durante los meses de mayor demanda de máquinas, se tuvo dificultades para mover las toneladas requeridas por los clientes; en consecuencia la empresa no contaba con locomotoras suficientes en la frontera para recibir el intercambio de trenes, por lo cual las máquinas extranjeras de los ferrocarriles Union Pacific (UP) y Burlington Northern & Santa Fe (BNSF) se vieron en la necesidad de entrar a la red ferroviaria de México con los trenes que debía mover la propia compañía. El impacto de tener locomotoras de otras compañías en las vías que se tienen concesionadas ha causado un gran endeudamiento de horas-caballos de fuerza (horas-HP) por cada locomotora dentro de su territorio y esto a su vez genera que cuando los ferrocarriles de Estados Unidos necesiten fuerza motriz, se deberán regresar las locomotoras de inmediato y mandar fuerza motriz nacional para pagar la deuda y como consecuencia se reduce aún más la fuerza motriz con la que se cuenta.

El segundo problema es que no se cuenta con una planeación de asignación de máquinas a los trenes y que los costos por consumo de combustible y mantenimiento se han ido incrementando debido a que la flota actual se está haciendo cada día más obsoleta. Por lo cual, se tiene como objetivo ir renovando la flota paulatinamente con el fin de hacerla más eficiente y por ende reducir el gasto en el consumo de combustible y de mantenimiento. Por lo anterior, el objetivo del análisis es desarrollar una metodología que permita calcular el número mínimo de locomotoras requeridas para cubrir la demanda comercial de los próximos cinco años y optimizar la planeación del uso de la fuerza motriz en cada tren, garantizando una buena velocidad mínima en las pendientes gobernadoras de la red ferroviaria.

Con base en lo antes mencionado se pretende demostrar que las metodologías son capaces de resolver el problema de no tener suficiente fuerza para mover la demanda y evitar el desperdicio de fuerza en los trenes, y por ende, gastos innecesarios en consumo de combustible. Partiendo de este punto, el área de Planeación de una empresa ferroviaria encontró diversas soluciones operativas para la optimización de asignación de máquinas para cada tren día a día y a un horizonte máximo de siete días, lo cual no resuelve los problemas de planeación. Ziarati, Soumis, Gélinas y Saintoge (Ziarati, Soumis, Desrosiers, Gélinas, & Saintonge, 1997) desarrollaron un modelo de flujo de productos múltiples con restricciones adicionales con el objetivo de proporcionar suficiente fuerza tractiva a los trenes, utilizando sistemas heterogéneos de locomotoras y trenes; Xu X, Li, y Xu (Xu, Li, & Xu, 2018) modelaron e intentaron resolver el problema integrado de asignación de locomotoras y horarios de trenes. Observaron una

desventaja del proceso de planificación jerárquica, que a menudo resulta en una mala coordinación entre el horario del tren y el horario de la locomotora.

Estos análisis observaron que cuando se realiza la programación de los trenes, se descuidan el horario y las rutas de las locomotoras. Como se puede apreciar en los objetivos de los modelos mencionados se centran en un problema de operación a trenes del día a día y actuando dependiendo de los problemas que suceden diariamente y no de planeación de la flota mínima de máquinas que se necesitan para operar o conocer el tonelaje promedio con los que correrán los trenes y así determinar el número de máquinas que se requieren en los patios para que salgan, parten de un pull fijo de locomotoras.

Actualmente hay varios modelos para resolver el problema de la operación en la asignación de locomotoras a trenes (Wright, 1989; Xu et al., 2018; Ziarati et al., 1997), sin embargo, no se encontró ninguna solución enfocada para determinar el número mínimo de locomotoras hacia el futuro y la planeación de una asignación óptima de máquinas de acuerdo a un pronóstico de ventas. El trabajo aquí analizado presenta dos metodologías óptimas para conocer el pull mínimo que se requiere para la operación diaria y un programa de asignación de máquinas en cada tramo operativo para los trenes más importantes por segmento de mercado.

La primera metodología contempla la mayoría de las variantes que pueden afectar la fuerza motriz disponible, básicamente consiste en realizar un balance de oferta contra demanda. La demanda será proporcionada por el área Comercial de la empresa ferroviaria de forma anual y en toneladas-kilómetro netas, éstas serán transformadas en toneladas-kilómetro brutas y después se obtendrá un promedio diario a mover mes a mes con base en la estacionalidad del año pasado. Para obtener la oferta actual de toneladas que se pueden mover, primero se calculará la productividad unitaria por tipo de locomotoras, corriente alterna (AC) y corriente directa (DC), después con la estadística histórica de disponibilidad de máquinas AC se proyectará a los años futuros un promedio de dicha disponibilidad y por último se obtendrán las toneladas-kilómetro brutas totales que pueden mover las locomotoras AC y DC de camino. Con todo lo anterior cualquier usuario que use esta metodología será capaz de realizar un balance de toneladas-kilómetro brutas a mover contra las que proporcionan la flota actual; si la demanda es mayor, se requerirá fuerza adicional, si no, se mandará a los servicios de patio las locomotoras sobrantes. El requerimiento de locomotoras adicionales se basará en los meses de mayor demanda y se repetirá para cada uno de los años agregando las locomotoras de años anteriores y así obtener una flota acumulada.

La segunda metodología consiste en calcular cuántos caballos de fuerza (HP's) necesitan los principales trenes por segmento de mercado en cada uno de los tramos por lo que pasarán, garantizando una velocidad mínima en la pendiente gobernadora entre 23 y 25 km/h. La demanda será proporcionada por el área Comercial de la empresa ferroviaria de forma mensual y en toneladas netas, éstas serán transformadas en toneladas brutas y después se obtendrá un promedio diario a mover mes a mes con base en la estacionalidad del año pasado; se obtendrán los trenes más importantes que corrieron durante el último año por tipo de tren, después se definirán las rutas operativas por dónde correrán y clasificarán por rumbo para poder asignar su

factor de caballaje compensado. Con todo lo anterior se podrá obtener los HP's necesarios para mover los trenes y se calculará el número de locomotoras por tren y por tramo teniendo como premisa desperdiciar lo menos que se pueda de fuerza. Este proceso se repetirá para cada mes a lo largo del año.

El documento está organizado de la esta manera: La siguiente sección proporciona los antecedentes. En el capítulo 2 veremos un diagnóstico de la situación. El marco teórico se presenta en el capítulo 3. El capítulo 4 explica las metodologías propuestas, un caso práctico de aplicación y sus resultados y conclusiones. El capítulo 5 presenta algunas recomendaciones para investigaciones a futuro.

Capítulo 1. Antecedentes

1.1 Privatización de Ferrocarriles Nacionales de México

En 1995, el gobierno mexicano decidió la privatización de Ferrocarriles Nacionales de México (FNM), otorgando concesiones por 50 años de la red FNM.

De los 17,384 kilómetros de vía que fueron concesionados a las diferentes empresas, Ferromex se quedó con el 47% (8,121 km), siendo el principal concesionario de las vías férreas del país, sin embargo, Kansas City Southern de México, segundo más importante concesionario, perteneciéndole el 24% de las vías (4,250 km), fue el que obtuvo la línea (Línea B) con la distancia más corta entre la Ciudad de México y Estados Unidos. Ferromex, por otra parte, obtuvo la mayoría de los puertos y los puntos de conexión restantes con Estados Unidos, dándole también una gran ventaja territorial, mientras que el resto de las nuevas compañías ferroviarias se quedaría con el tráfico local de su región.

Después de la privatización de FNM las vías férreas quedaron distribuidas en el país por concesión, como se aprecia en la figura 1.



Figura 1 - Mapa del Sistema Ferroviario Mexicano (Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario, 2017)¹

¹ Actualmente la distribución de las vías ha cambiado, sin embargo, para efectos de sólo mostrar Ferromex se muestra este mapa.

1.2 Participación del ferrocarril en el transporte de carga

Actualmente el ferrocarril sigue siendo el sistema de transporte de carga más eficiente, ya que es el que con menor cantidad de energía mueve más carga por kilómetro recorrido. En la mayoría de los países primermundistas siguen desarrollando su economía alrededor de este tipo de transporte, por lo cual incrementar la participación de este servicio dentro del país cobra gran relevancia.

En los últimos años el Sistema Ferroviario Mexicano en el transporte de carga ha ido incrementando su participación de manera continua como se muestra en la figura 2.

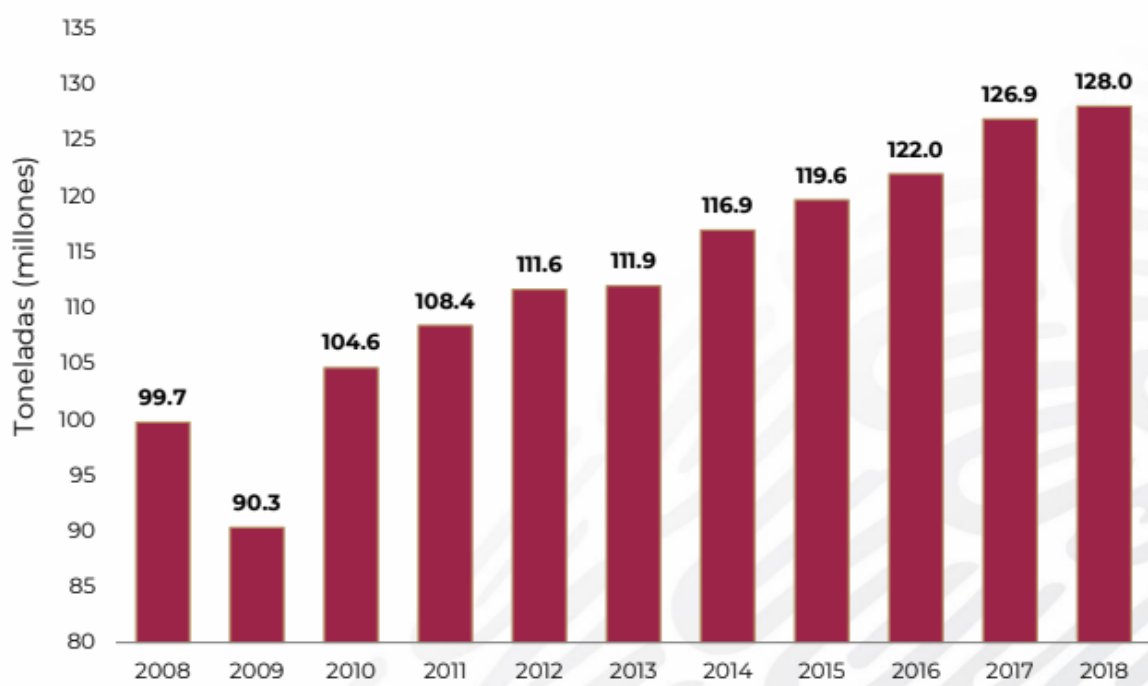


Figura 2- Gráfica de Evolución de la Carga Transportada en el SFM (Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario, 2018)

El tonelaje transportado por ferrocarril en los últimos diez años incrementó un 28%, moviendo 28 millones de toneladas más en 2018 con respecto al 2008. Tan solo de 2017 a 2018 hubo un incremento del 1%.

De 1999 al 2017 el ferrocarril en México incrementó su participación en un 6.4% dentro del transporte de carga terrestre, generando que las compañías ferroviarias incrementen su flota de fuerza motriz. En la figura 3 se muestra el porcentaje de 1999 que es de 18.8%, y en 2017 de 25.2%, lo que arroja el incremento de 6.4%

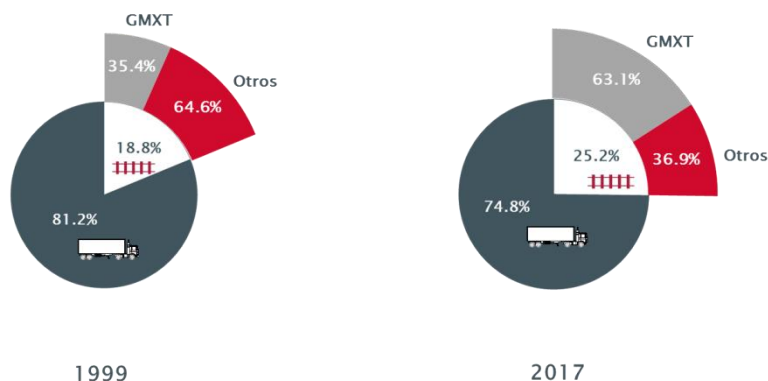


Figura 3 - Crecimiento de la participación del ferrocarril en el transporte de carga del 1999 al 2017

1.3 Carga movida por concesionario en 2018

Con el incremento de la participación del ferrocarril en el transporte de carga, Ferromex ha logrado ubicarse como la compañía ferroviaria que más volumen de carga mueve. Como se ve en la figura 4, Ferromex logró mover el 61.8% de toneladas en 2018 del volumen total.

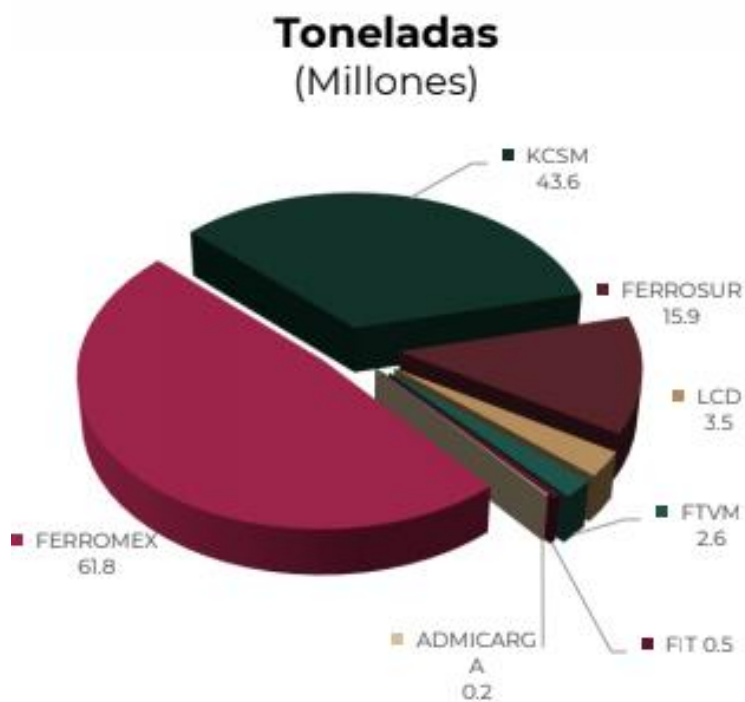


Figura 4 - Toneladas movidas por concesionario de ferrocarril en 2018²

² KCSM – Kansas City Southern de México
 LCD – Ferrocarril Coahuila Durango
 FTVM – Ferrocarril y Terminal del Valle de México
 FIT – Ferrocarril del Istmo de Tehuantepec

1.4 Crecimiento de la fuerza motriz del Sistema Ferroviario Mexicano

Una locomotora (fuerza motriz) es un material rodante con motor que se usa para dar tracción a los carros (unidades de arrastre) de ferrocarril. Como se mencionó anteriormente el incremento de volumen de carga a mover ha propiciado que las compañías concesionarias se vean en la necesidad de adquirir más locomotoras año con año para cubrir este crecimiento. La tabla 1 muestra el incremento paulatino de la flota total de locomotoras en el país, un incremento del 10% en los últimos diez años y el aumento de HP's por máquina.

Tener más caballaje por máquina permite mover la misma carga con menos máquinas y es consecuencia de la modernización del tipo de locomotora. A grandes rasgos, la actualización de locomotoras DC (1,200 a 3,000 HP's) a locomotoras AC (4,000 a 4,400 HP's) es lo que permite ir mejorando la productividad unitaria año con año.

Tabla 1 - Evolución de la Fuerza Motriz del SFM (Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario, 2018)

EVOLUCIÓN DE LA FUERZA MOTRIZ 2008 - 2018			
Año	Locomotoras (unidades)	Potencia Total (HP)	Potencia Promedio (HPx unidad)
2008	1,177	3,865,200	3,284
2009	1,160	3,751,050	3,234
2010	1,213	3,998,650	3,296
2011	1,236	4,127,050	3,339
2012	1,231	4,136,100	3,360
2013	1,243	4,242,150	3,413
2014	1,207	4,142,000	3,432
2015	1,280	4,470,500	3,493
2016	1,298	4,582,950	3,531
2017	1,295	4,606,900	3,557
2018	1,274	4,550,000	3,571

1.5 Fuerza motriz del Sistema Ferroviario Mexicano en 2017

En 2017 el Sistema Ferroviario Mexicano contaba con un total de 1,295 locomotoras en toda la red, siendo Ferromex el de mayor participación con un 46%, dado que fue el que mayor volumen de carga movió (ver tabla 2).

Tabla 2 - Distribución de Fuerza Motriz en el SFM

DISTRIBUCIÓN DE LA FUERZA MOTRIZ 2017		
Concesionario / Asignatario	Locomotoras* (unidades)	Participación (% / Total)
FERROMEX	596	46.0%
KCSM	424	32.8%
FERROSUR	192	14.8%
FTVM	31	2.4%
FIT**	27	2.1%
LCD	22	1.7%
ADMICARGA	3	0.2%
TOTAL	1,295	100%

* Incluye equipo en servicio activo y fuera de servicio (en reparación, condenación y fuera de servicio por más de 6 meses).

** Derivado de la modalidad impuesta por la SCT, las vías de Chiapas y Mayab fueron operadas durante 2017 por el FIT.

1.6 Tipos de Locomotoras

Las locomotoras de diésel-eléctricas vienen siendo plantas de corriente que proporciona energía a los motores de tracción ubicados en cada uno de los ejes de la máquina. Este tipo de plantas para ser activadas cuentan con un generador, en caso de ser de corriente directa (DC), o un alternador, si son de corriente alterna (AC), y en ambos tipos un motor diésel es el encargado de encender el generador o alternador.

Ferrocarriles Nacionales de México solo contaba con locomotoras tipo DC por considerarse más seguras y más fácil de controlar su voltaje y amperaje, sin embargo, tiempo después las locomotoras AC demostraron también ser eficientes y poder controlar totalmente su voltaje y amperaje, además de que esta tecnología permitía incluir dos ejes más tractivos y por ende más caballaje, de 1,200 HP's o 3,000 HP's a 4,000 HP's o hasta 4,400 HP's, lo cual se traduce en mayor fuerza tractiva por máquina. En la figura 5 se muestra un ejemplo de una máquina AC de 6 ejes.

Actualmente Ferromex cuenta con los dos tipos de locomotoras, sin embargo, la mayoría de la flota DC es utilizada en trabajos de patio, es decir formación de trenes, clasificación de carros, entrega de equipo a industria, etc., y una pequeña parte de máquinas DC. Las de mayor caballaje se utilizan junto con toda la flota AC para trenes de camino (tipo de trenes que recorren grandes distancias).



Figura 5 - Máquina FFE-4816 (Modelo G.E. ES-4,400AC, 2016, 6 ejes, AC, 4,400 HP's)

1.7 Flota total de locomotoras de Ferromex en la actualidad

La clasificación de la flota de Ferromex se muestra en la tabla 3. De la división del total de máquinas DC entre la flota total resulta que tiene poco menos de la mitad de la flota, siendo DC (48%), lo cual con el paso del tiempo se pretende reducir más hasta dejar un pull mínimo de locomotoras de este tipo sólo para trabajos de patio en específico.

La flota AC es la más moderna y eficiente, ya que tienen más fuerza tractiva y mueven casi dos veces más lo que una locomotora DC, por lo tanto, en conjunto vendrían gastando menos combustible y sus gastos de mantenimiento serían menores.

Cuando se le otorgó la concesión a Ferromex, las 284 locomotoras DC fueron otorgadas, mientras que locomotoras AC sólo fueron 35 y las 277 restantes se fueron adquiriendo de la siguiente manera (ver figura 6):

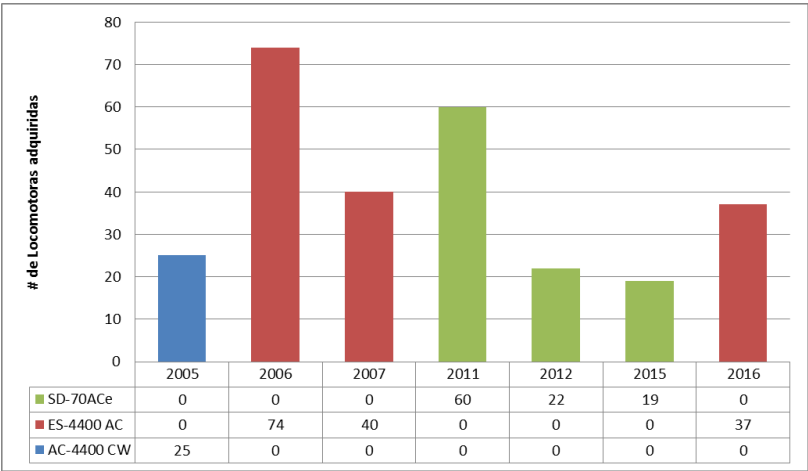


Figura 6 - Adquisición de locomotoras AC por parte de Ferromex a lo largo de la concesión³

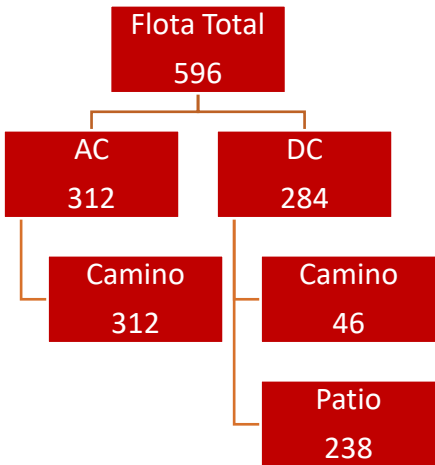


Figura 7 - Composición de la flota actual de locomotoras FXE

³ Ferromex no ha adquirido más locomotoras desde el 2016.

En la tabla 3 también se presenta el caballaje que ofrecen los tipos de locomotoras AC y DC por modelo y marca. En las máquinas AC la variedad de potencia que ofrecen es mínima; caso contrario en las DC vemos que tenemos cinco tipos de caballaje.

De la flota DC de Ferromex que está compuesta por 284 locomotoras, se observa que el 23% son máquinas de menos de 3,000 HP's, lo cual las convierte en ser las primeras a reemplazarse para seguir aumentando el caballaje total de la flota.

Para el modelo a desarrollar en este documento se contemplará toda la flota AC (312 máquinas) y un número fijo de 46 locomotoras DC de 3,000 HP's, que estén en óptimas condiciones para trenes de camino. La flota restante de DC's se utilizarán para servicios de patio.

Tabla 3 - Tabla de flota de locomotoras FXE por marca y modelo

Tipo	Marca	Modelo	Locs	H.P.'s x Loc	H.P.'s Acum	%
AC	EMD	SD-70ACe	116	4,300	498,800	23.35%
	Total EMD		116		498,800	
	G.E.	AC-4400 CW	60	4,400	264,000	12.36%
		ES-4400AC	136	4,400	598,400	28.01%
	Total EMD		196		862,400	
Total AC			312		1,361,200	
DC	EMD	GP-22-ECO	1	2,000	2,000	0.09%
		GP-38	3	2,000	600	0.03%
		GP-38-2	45	2,000	90,000	4.21%
		GP-40-2	25	3,000	75,000	3.51%
		SD-40-2	122	3,000	366,000	17.13%
		SW-1000	2	1,200	2,400	0.11%
		SW-1504	11	1,500	16,500	0.77%
	Total EMD		209		552,500	
	G.E.	B-23-7	3	2,250	6,750	0.32%
		C-30 SUPER-7	41	3,000	123,000	5.76%
		C-30-7	1	3,000	3,000	0.14%
		SUPER-7 MP	21	3,000	63,000	2.95%
		SUPER-7R	9	3,000	27,000	1.26%
	Total GE		75		222,750	
	Total DC			284		775,250
FLOTA TOTAL FXE			596		2,136,450 100.00%	

Capítulo 2. Diagnóstico de la situación actual de la fuerza motriz en Ferromex

2.1 Impacto del uso de máquinas extranjeras en Ferromex

En esta sección se describe la problemática actual por la que Ferromex y la fuerza motriz atraviesan. Ferromex cuenta con cuatro puntos de intercambio en la frontera norte con los ferrocarriles de Estados Unidos, siendo el más importante en Piedras Negras, Coahuila, derivado de que los dos ferrocarriles con los que se tiene intercambio, que son UP y BNSF, entregan la mayoría de sus trenes en este punto y por lo tanto es donde hay más saturación de tráfico de trenes de lado de Ferromex; después y por orden de importancia siguen Ciudad Juárez, Nogales y Mexicali (ver figura 8 y tabla 4).

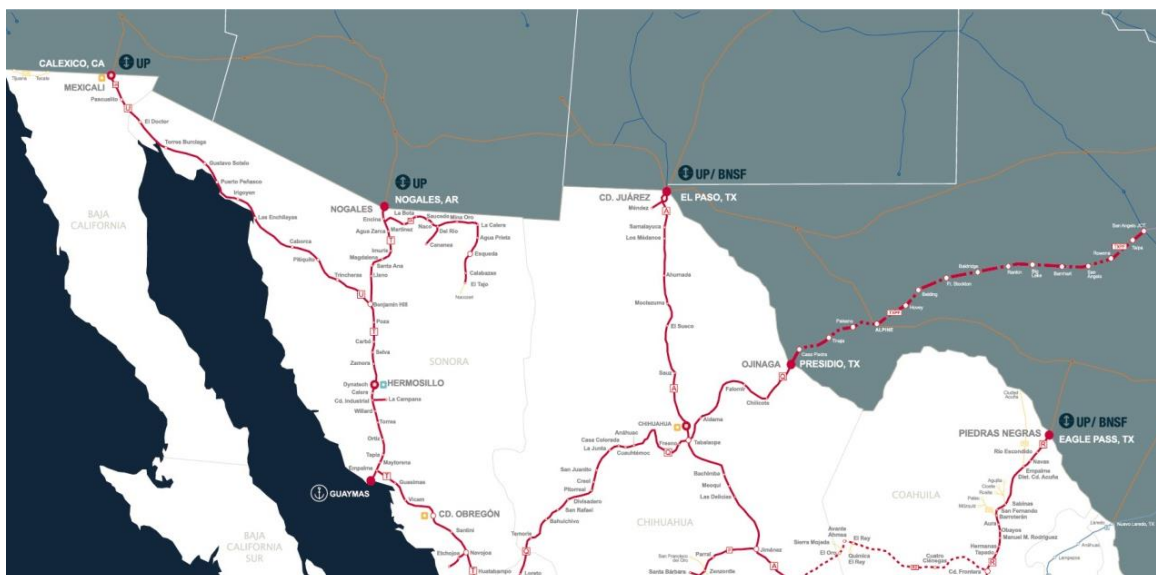


Figura 8- Ubicación de los puntos de intercambio fronterizo entre Ferromex y Ferrocarriles de Estados Unidos

Tabla 4 - Toneladas Brutas - Km que se movieron por los distritos fronterizos en 2018 en la red de Ferromex

Distrito Fronterizo	Tons Brutas - Km (Millones)	%
Piedras Negras	6,752.4	37.46%
Nogales	4,782.0	26.53%
Ciudad Juárez	4,741.3	26.30%
Mexicali	1,750.2	9.71%
Total Ton-Km	18,025.9	100.00%

Estos puntos de intercambio cobran gran importancia para Ferromex ya que por estas vías es donde ingresa una parte muy importante de flete de carga a mover, en su mayoría del sector agrícola, automotriz e intermodal.

Con el objetivo de optimizar la logística de los trenes tanto en Estados Unidos como en México se tiene un acuerdo entre los ferrocarriles americanos y Ferromex de que ambos deben de tener

locomotoras disponibles para recibir los trenes en su territorio y así continuar inmediatamente hasta su destino y evitar demoras. En caso de que no se tenga fuerza motriz disponible y no se tenga cupo en el patio fronterizo para almacenar momentáneamente el tren en turno, el ferrocarril receptor debe de “rentar” las locomotoras del ferrocarril que entrega dicho tren para asegurar el flujo de mercancías.

La “renta” de locomotoras a los ferrocarriles de Estados Unidos consiste en generar una deuda del total de HP’s (caballos de fuerza) por tipo de locomotora por cada hora que se encuentre operando fuera de sus vías, por ejemplo, si una locomotora tipo AC de 4,000 HP’s se encuentra en territorio mexicano 24 horas, nos generará una deuda de 96,000 HP’s/Hr. Esta deuda se podrá saldar con máquinas de diferente caballaje pero que al final cumplan con los mismos HP’s/hr que se rentaron.

Ferromex en los últimos años durante los meses de mayor demanda de entrega de trenes por parte de Burlington Northern y Union Pacific no ha tenido máquinas suficientes para mover los trenes que se intercambian en la frontera, ocasionando importantes demoras y saturación de carros de ferrocarril. Con la meta de eliminar este efecto negativo con clientes importantes y no saturar los patios ferroviarios fronterizos mexicanos, Ferromex ha tenido que operar trenes con máquinas de los ferrocarriles americanos y por ende incrementar la deuda de HP’s.

Ferromex en un principio planteó un programa de endeudamiento de HP’s con los ferrocarriles americanos, el cual consistía en utilizar máquinas de estos ferrocarriles en los meses de mayor demanda, que son durante la cosecha de granos (mayo a julio), y mandar máquinas a su territorio durante los primeros y últimos tres meses del año, que es cuando el volumen de carga es menor, para saldar dicha deuda, sin embargo, como se puede apreciar en la figura 9 el uso de locomotoras americanas ya es continuo durante todo el año, generando que la deuda siga incrementando.

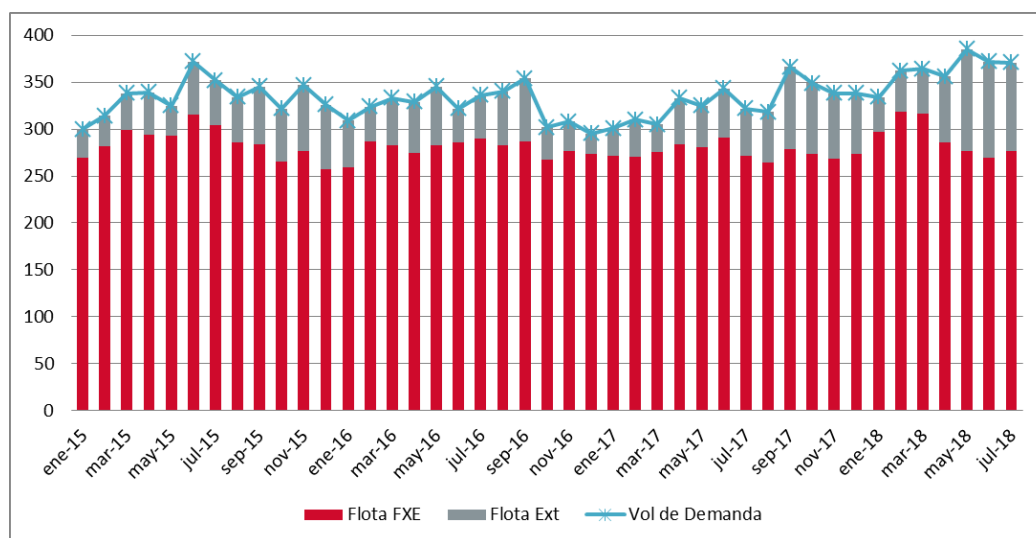


Figura 9- Gráfica de promedio diario de locomotoras mes a mes

La siguiente figura (figura 10) permite visualizar el promedio mes a mes de máquinas de Ferromex que se encuentran en territorio norteamericano y de máquinas extranjeras que están operando en la red de Ferromex.

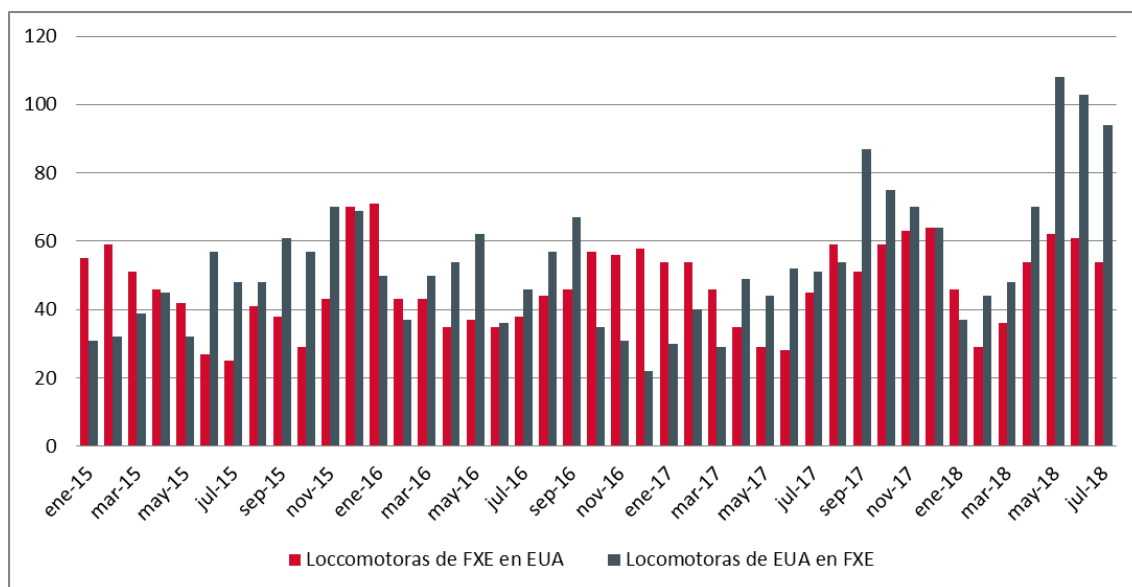


Figura 10 - Gráfica de locomotoras de FXE fuera de su red y de locomotoras externas en territorio FXE

El efecto neto se puede observar en la figura 11, donde se observa los meses donde Ferromex disminuye su flota y también donde se cuenta con fuerza de más para mover la demanda solicitada. El tener locomotoras de menos en la red es un caso crítico, al igual que el tener máquinas extranjeras moviendo flete de Ferromex en territorio mexicano. Estas situaciones se pretenden eliminar con el modelo desarrollado en este trabajo.

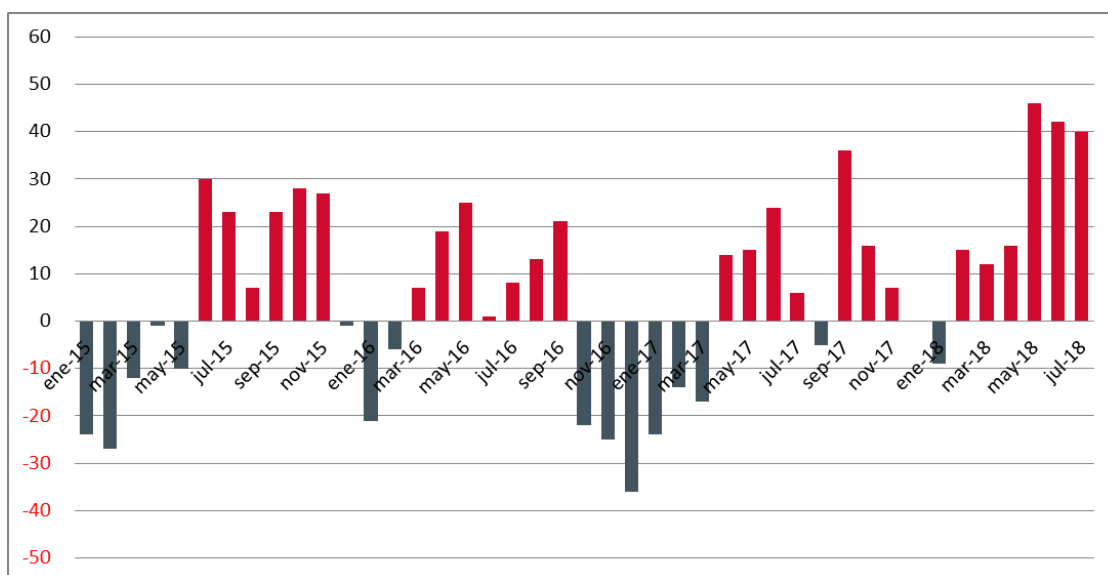


Figura 11 – Efecto neto de locomotoras fuera de FXE y externas en FXE

Como ya se mencionó anteriormente, el endeudamiento de HP-horas ocasiona un endeudamiento por locomotora operada en nuestras vías y esto como consecuencia genera que cuando los ferrocarriles extranjeros que prestaron sus máquinas, en el momento que ellos lo requieran, se tenga que mandar fuerza motriz para saldar esa deuda, ocasionando una reducción de la flota y llegar a un punto crítico en el que no contemos con la oferta de equipo necesaria para mover lo que los clientes solicitan, cayendo en un incumplimiento por parte de la empresa.

Aunado a la complicación actual por la que se atraviesa y como se mencionó en los antecedentes, el sistema de transporte ferroviario en México, y por ende Ferromex, vislumbra grandes crecimientos en volumen a mover, lo cual daría pauta a pensar que, si la flota actual de locomotoras con las que se cuenta es insuficiente, el tener dicho aumento nos llevaría en automático a requerir cierto número de máquinas adicionales. El modelo desarrollado en este documento deberá ser capaz de dimensionar la flota total requerida.

2.2 Impacto en el consumo de combustible y gastos de mantenimiento por no contar con una eficiente planeación de asignación de máquinas a los trenes

Actualmente Ferromex no cuenta con una correcta planeación para la asignación de número de máquinas en cada uno de los trenes que se forman en los patios ferroviarios. Esto trae como consecuencia que las locomotoras dejen de ser productivas y que, aunque puedan gastar menos combustible por no arrastrar tanta carga, generen un desperdicio de fuerza. Como ejemplo hay trenes que se pudieron mover con sólo dos máquinas en tres de sus cuatro tramos operativos, pero como en el tramo crítico se necesitan tres máquinas, este tren sale así de origen a destino generando una improductividad y reduciendo las toneladas de arrastre por cada caballo de fuerza que el tren lleva.

Aunado a lo anterior, los costos por consumo de combustible y mantenimiento se han ido incrementando durante los últimos años debido a que la flota actual se está haciendo cada día más obsoleta.

En la tabla número 5 se muestra la forma en que se calcula el rendimiento promedio por tipo de locomotora en Ferromex. Básicamente se calcula con los litros que se consumen por cada mil toneladas brutas-kilómetro (TKB's), que da como resultado del 2018 que una locomotora tipo AC consume en promedio 3.55 Lt/MTKB y una locomotora DC 4.20 Lt/MTKB.

Tabla 5 - Consumo mensual de combustible 2018 por tipo de locomotoras

		TKB'S			Consumo				Rendimiento	
		AC	DC	Total	AC	DC	Otros	Total	AC	DC
2018	Ene	6,296,935,787	638,761,180	6,935,696,967	22,177,316	2,709,829	2,684,002	27,571,147	3.52	4.24
	Feb	5,990,169,936	505,415,285	6,495,585,221	20,707,582	2,017,514	2,328,928	25,054,024	3.46	3.99
	Mar	6,613,867,381	774,938,087	7,388,805,468	23,034,133	2,971,245	2,683,849	28,689,227	3.48	3.83
	Abr	6,738,172,585	691,324,572	7,429,497,157	23,126,673	2,615,142	2,734,846	28,476,661	3.43	3.78
	May	7,390,438,781	722,016,542	8,112,455,323	26,722,395	2,751,111	2,684,891	32,158,397	3.62	3.81
	Jun	7,109,376,411	939,245,160	8,048,621,571	27,967,555	2,765,648	2,943,866	33,677,069	3.93	2.94
	Jul	7,505,816,750	711,326,056	8,217,142,806	26,533,377	2,795,237	2,534,778	31,863,392	3.54	3.93
	Ago	7,340,780,495	772,269,945	8,113,050,440	25,837,029	2,681,711	2,915,666	31,434,406	3.52	3.47
	Sep	7,340,780,495	364,096,233	7,704,876,728	24,267,275	2,749,983	2,336,525	29,353,783	3.31	7.55
	Oct	7,281,985,464	922,770,070	8,204,755,534	25,775,389	3,535,740	2,582,202	31,893,331	3.54	3.83
	Nov	7,340,780,495	1,167,706,081	8,508,486,576	28,005,770	3,452,785	2,651,876	34,110,431	3.82	2.96
	Dic	7,390,946,715	512,823,213	7,903,769,928	25,208,406	3,107,509	2,635,647	30,951,562	3.41	6.06
		84,340,051,295	8,722,692,424	93,062,743,719	299,362,900	34,153,454	31,717,076	365,233,430	3.55	4.20

La siguiente gráfica (figura 12) presenta información mes a mes del consumo de combustible por tipo de locomotoras, por lo cual vemos que más del 80% es de máquinas AC, las cuales se deben de usar solamente para trenes de camino y sobre los cuales se quiere disminuir dicho consumo.

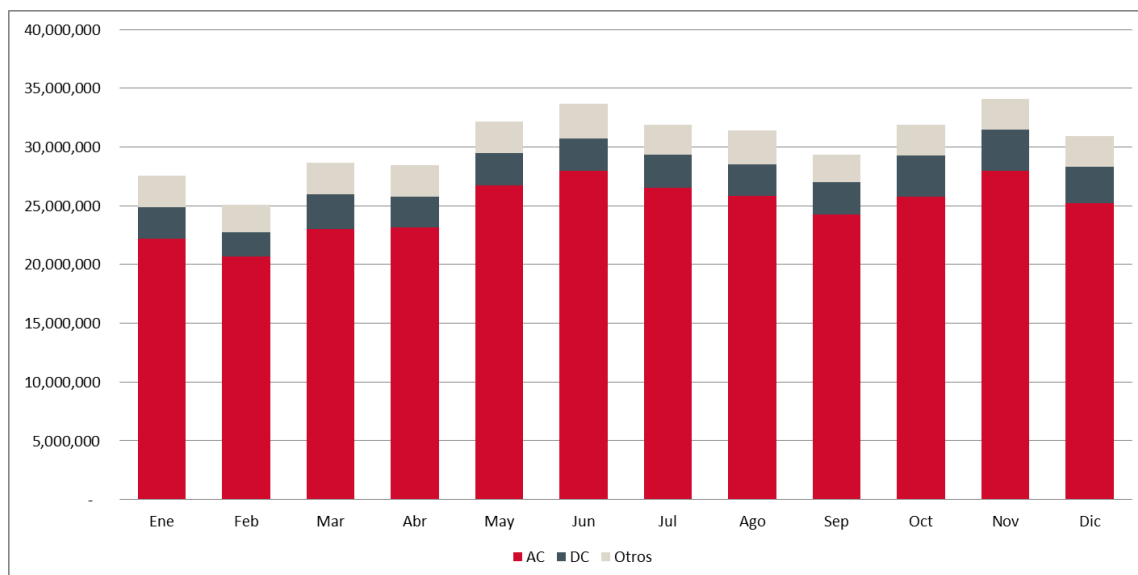


Figura 12 – Gráfica de consumo de combustible mensual 2018

2.3 Objetivos e hipótesis

Este trabajo consiste en el diseño e implementación de un plan y una metodología que permitan conocer la flota mínima de locomotoras requeridas para operar diariamente a un horizonte de 5 años y mejorar el aprovechamiento de las máquinas en los trenes, garantizando una velocidad mínima de 20 km/h.

El plan para el dimensionamiento de la flota mínima de locomotoras requeridas para operar diariamente durante 5 años eliminará la deuda con los ferrocarriles americanos por el uso de sus máquinas extranjeras al no contar con fuerza suficiente para recibir sus trenes.

Este plan tendrá como base un balance de demanda contra fuerza tractiva para contar con suficiente fuerza propia y así eliminar el uso de máquinas externas, justificando la adquisición de nuevas máquinas AC por medio de un análisis costo-beneficio para renovar la flota obsoleta de locomotoras DC.

Por otra parte, la metodología de asignación óptima de máquinas a los trenes más importantes por tipo de segmento resolverá la falta de aprovechamiento promedio de la fuerza tractiva que trae cada tren.

Para mejorar el uso de la fuerza motriz en cada uno de los trenes se tendrá como base un estudio de capacidad de arrastre por tipo locomotora en la pendiente gobernadora dentro cada tramo operativo por el que cruza cada tren, garantizando una velocidad mínima de entre 23 y 25 km/h, lo cual permitirá mover la misma carga con menos máquinas y así obtener ahorros en consumo de combustible.

Tanto el plan como la metodología que se desarrollarán en este documento serán implementados dentro de una compañía ferroviaria que se enfoquen dentro del área estratégica y táctica y así valorar la mejora económica que se podrá obtener.

Serán aplicables para problemas de dimensionamiento de fuerza motriz o planificación de asignación de locomotoras a los trenes más importantes por segmento a mediano plazo.

2.4 Definición del problema

La fuerza tractiva o número de locomotoras para mover los trenes diariamente es muy importante para las compañías ferroviarias, debido al alto costo de operar las locomotoras, a la compleja programación de los trenes y asignación de número de locomotoras para cada tren para una óptima coordinación.

Hoy en día Ferromex no cuenta con una metodología para el análisis de compra de locomotoras y como empresa pretende llevar sus indicadores al nivel de los ferrocarriles americanos, por lo cual el optimizar el indicador de caballos de fuerza que se necesitan para mover una tonelada bruta (HPTon) toma gran relevancia. En la actualidad, la gente de operación suele mandar el mismo número de máquinas de origen a destino con los trenes, lo cual dificulta mejorar este indicador. Aunado a lo anterior tampoco se cuenta con una planeación de asignación de máquinas a los trenes por tipo de segmento (granos, automotriz, intermodal, etc), ya que no se cuenta con un estudio para analizar la formación de trenes con base en los crecimientos futuros de la demanda comercial.

Derivado de los problemas anteriores, el Consejo de Administración de Ferromex ha solicitado que para incluir en el presupuesto de inversión de cada año (CAPEX) la adquisición o compra de nuevas locomotoras, se desarrolle una metodología, un análisis costo-beneficio y un plan maestro de asignación de número de máquinas por tramo a los trenes para justificar esta inversión y se pueda mejorar el indicador.

El área de Planeación de Ferromex ha sido asignada para encontrar la solución óptima para estos problemas, encontrando a su vez diversas soluciones operativas para el día a día y a un horizonte máximo de 7 días, lo cual no resuelve el problema que se tiene que atacar, sin embargo, da un panorama general sobre la operación y de lo cual se hablará a continuación.

Capítulo 3. Marco teórico

(Assad, 1980) describe que hay tres niveles de toma de decisiones involucradas en la administración de una red ferroviaria: estratégicos, tácticos y operacionales.

Las decisiones a nivel operativo implican decisiones que se ocupan de las operaciones diarias y son tomadas por personal de gestión inferior que se ocupa directamente de los problemas operativos.

Las decisiones tácticas son aquellas que tienen horizontes de planificación a mediano plazo. Son problemas que se refieren principalmente a la asignación efectiva de los recursos adquiridos con base en la decisión del nivel estratégico. El problema de planificación táctica podría resolverse mensual o trimestralmente para responder solo a cambios importantes de los recursos.

Las decisiones estratégicas son aquellas relacionadas con la inversión de grandes capitales para obtener recursos para uso a largo plazo (Premkumar,2019). Estas decisiones requieren la participación de altas direcciones. Premkumar menciona las siguientes decisiones como estratégicas dentro de una empresa ferroviaria:

- Diseño y mejora de la red ferroviaria
- Ubicación de patios ferroviarios y mejor clasificación de talleres dentro de los patios
- Decisiones óptimas de rutas y planificación a largo de plazo de los trenes
- **Dimensionamiento de la flota de locomotoras**

Dentro del dimensionamiento de la flota de locomotoras, uno de los problemas más importantes que enfrenta el ferrocarril es el problema de asignación de locomotoras (LAP). El objetivo del LAP es asignar una flota de locomotoras a un costo mínimo a los trenes pre-programados, sujetos a una serie de restricciones de nivel estratégico, táctico y operativo como se observa en la figura 13.

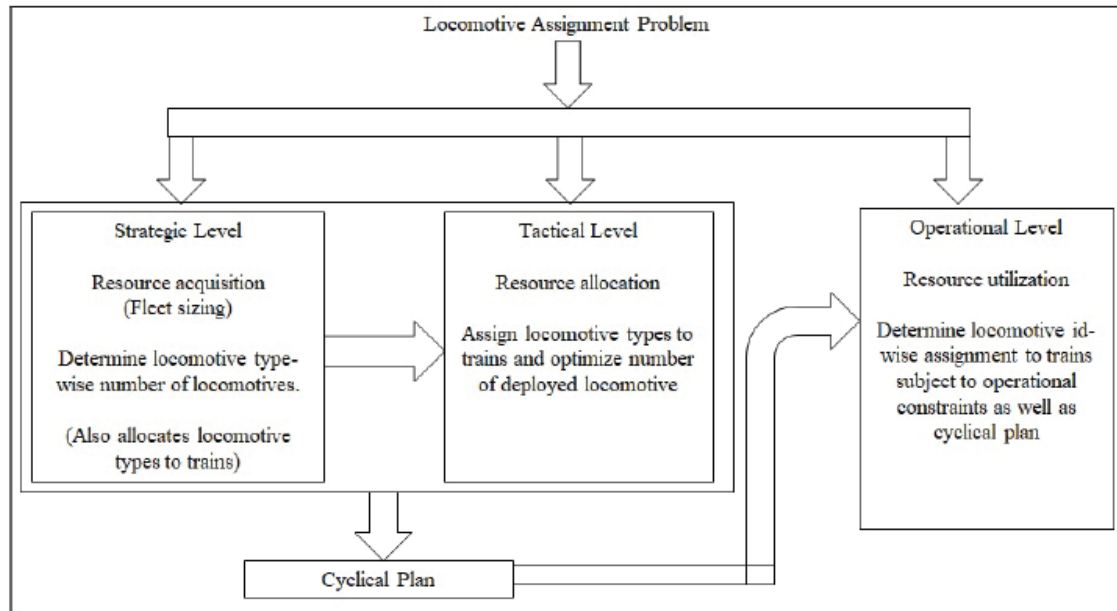


Figura 13 – Niveles de clasificación del Problema de Asignación de Locomotoras (LAP) (Assad, 1980)

El nivel estratégico LAP implica el dimensionamiento de la flota para la adquisición de recursos; mientras que el nivel táctico LAP implica la asignación de estos recursos adquiridos a trenes basados en tipos de locomotoras. Una característica común a ambos es que la salida es de naturaleza cíclica. Si bien el nivel estratégico LAP también resuelve el problema del nivel táctico, ya que el dimensionamiento de la flota se realiza en función de los tipos de locomotoras y solo se puede lograr asignando tipos de locomotoras a los trenes, el nivel táctico LAP toma el tamaño de la flota como se indica y luego asigna los tipos de locomotoras a los trenes.

Assad (1980) explica que las decisiones a nivel operativo involucran decisiones que se ocupan de las operaciones diarias y toma en cuenta la naturaleza dinámica del entorno. En consecuencia, las decisiones a este nivel son tomadas por personal de gestión inferior que se ocupa directamente de los problemas operativos.

En esta revisión de literatura se incluyen únicamente los artículos relacionados con las decisiones estratégicas.

Canca et al. (Canca, 2016) presenta en su artículo la integración de fases estratégicas y tácticas del proceso de planeación del tránsito rápido. Describe un modelo de programación matemático que determina simultáneamente la red de infraestructura, la planeación de la línea, la capacidad de los trenes en cada línea, la inversión en la fuerza motriz y la planeación del personal para trenes de pasajeros. Para este modelo, la demanda se asume como elástica y establece como límites el número de vagones que puede llevar cada tren, lo cual comparado con los trenes de carga es muy poco tonelaje, pero sirve como parámetro para dimensionar la transferencia de carga entre patios y cómo maximizar los recursos por toda la red. En cuestión de la fuerza motriz el costo de comprar

locomotoras, que es uno de los aspectos que más importa para el desarrollo de una nueva metodología, se basa en que la flota se adquiere antes del comienzo de la operación y se financia hasta el último año del horizonte de la planificación. El artículo de Canca es adecuado para definir una propuesta de justificación que financie la adquisición de más equipo de fuerza motriz.

En un trabajo posterior, Canca et al (Canca,2017) agrega a su proceso de planeación del tránsito rápido un algoritmo llamado “Adaptive Large Neighborhood Search” (ALNS) para manejar simultáneamente el diseño de la red y los problemas de planificación de línea considerando también equipo rodante y aspectos de planificación personal. Igual que el primer proceso, el objetivo es incorporar los costos relativos a la construcción de la red, adquisición de flota, operación de los trenes, etc., considerando para el usuario la mejor selección en cuestión de ruta y maximizando el beneficio total de la red al lograr un equilibrio entre la cobertura máxima de rutas y el costo total mínimo que debería representar. Aunque el proceso se sigue enfocando en trenes de pasajeros, la actualización de este proceso ayuda a proponer una mejor metodología para la asignación óptima de máquinas a los trenes y al dimensionamiento total de la flota de locomotoras año por año.

Podemos encontrar trabajos también cuya aportación en el proceso de planeación se enfocan en el desarrollo de un plan de línea o sea un conjunto de rutas en la red ferroviaria operado a diferente frecuencia. Por ejemplo (Goossens, 2006) introduce varios modelos para resolver problemas de planeación de las líneas de modo que la capacidad de transporte sea suficiente para satisfacer la demanda y teniendo como objetivo que los costos operativos sean los mínimos. Aunque Goossens no considera la compra y asignación de máquinas, sirve de apoyo para dimensionar de forma correcta y óptima la planeación de los trenes más importantes derivado de la demanda proyectada, como se muestra en la figura 14.

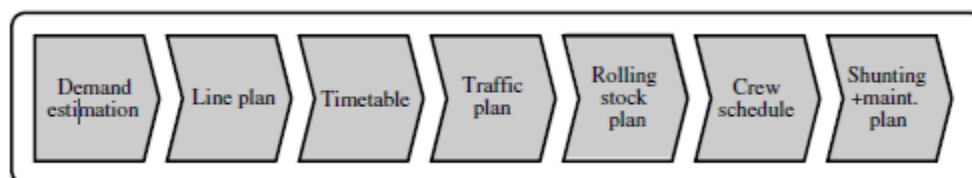


Figura 14 – Diferentes etapas en el proceso de planeación (Goossens, 2006)

Sá et al. (Sá,2015) estudia el diseño de hub de redes con múltiples líneas y dónde deben ser localizados. El objetivo de su trabajo es minimizar el tiempo total de viaje, considerando un presupuesto con restricciones. Para ello presenta un algoritmo de Benders y algunos algoritmos heurísticos.

En el estado del arte se pueden encontrar trabajos que se refieren a la asignación de locomotoras.

Ziarati, Soumis, Gélinas y Saintogé (Ziarati et al., 1997) desarrollaron un modelo de flujo de productos múltiples con restricciones adicionales, con el objetivo de proporcionar suficiente fuerza tractiva a los trenes, utilizando sistemas heterogéneos de locomotoras y trenes.

El problema fue modelado como un problema de flujo de productos múltiples con restricciones adicionales. Dado que se trata de un problema de programación a gran escala (1,300 locomotoras y 2,000 trenes en una semana) e incluye una amplia gama de restricciones suplementarias, fue descompuesto en pequeños problemas superpuestos que involucran de 500 a 1,000 trenes. Cada problema más pequeño se resuelve utilizando un método de descomposición Dantzig-Wolfe, donde los sub-problemas se formulan como problemas de ruta más restringidos o sin restricciones, según el estado de la locomotora. El modelo muestra como resultados una mejora del 7% sobre la solución que actualmente maneja la empresa.

El método que presenta el modelo es con un horizonte de ejecución a una semana. Considera la forma más compleja de asignación de locomotoras, que es varios tipos de locomotoras para diferentes tipos de trenes. Toma en cuenta las locomotoras críticas e inspecciones regulares para todas las locomotoras. Las pruebas fueron con datos reales de CN North America. Horizonte de una semana se dividió en problemas más pequeños. Por cada ahorro del 1% en locomotoras se tiene un ahorro anual de 4 millones de dólares para la empresa.

Booler(Booler, 1980) desarrolló una metodología (Método Heurístico), basado en flujos de múltiples productos en una red, con el objetivo de encontrar el costo mínimo del conjunto de programas de asignación de locomotoras a trenes.

Como conclusión del modelo y resultados se puede observar que los tiempos de solución dependen del número de trabajos, el número de clases de locomotoras y la cantidad de variación en los tiempos de inicio, pero pueden ser bastante variables cuando estos factores permanecen constantes. Los tiempos obtenidos han sido de unos 20 segundos para 20 problemas de trabajo, entre uno y tres minutos para 30 trabajos y entre tres y diez minutos para 50 trabajos. El programa nunca se ha utilizado en un problema práctico, pero los resultados parecen lo suficientemente alentadores como para sugerir que el desarrollo para la aplicación práctica puede valer la pena.

Xu X, Li, y Xu (Xu et al., 2018) modelaron e intentaron resolver el problema integrado de asignación de locomotoras y horarios de trenes. Observaron una desventaja del proceso de planificación jerárquica, que a menudo resulta en una mala coordinación entre el horario del tren y el horario de la locomotora. Cuando se realiza el horario de trenes, se descuidan el horario y las rutas de las locomotoras.

Mediante un modelo intentaron resolver el problema antes mencionado, teniendo en cuenta que por lo general las decisiones de programación de trenes, como la determinación de la trayectoria del tren y el horario de los trenes, se toman antes de que las locomotoras y otros materiales rodantes se asignen a los servicios de trenes.

Para resolver este problema integrado, primero se construyó una red tridimensional estado-espacio-tiempo en la que se usa un estado para indicar qué tren está asignado a una locomotora. Luego se formula el problema como un problema de flujo de red de múltiples productos de costo mínimo con arcos incompatibles y restricciones de flujo de enteros. Se presenta una heurística de

relajación lagrangiana para resolverlo. Se lleva a cabo un estudio computacional para probar la efectividad de nuestra heurística de relajación lagrangiana.

Se resolvió el problema con una red ferroviaria subyacente general. Se formuló como un modelo de flujo de red de múltiples productos de costo mínimo con arcos incompatibles y restricciones de flujo de enteros en una red tridimensional de estado-espacio-tiempo. Se comparó las soluciones de heurística de relajación de lagrangiano con las soluciones generadas por dos métodos de solución de referencia. Los resultados computacionales demostraron la efectividad de la heurística de relajación lagrangiana e informan los beneficios obtenidos al integrar las decisiones de asignación de locomotoras y el horario del tren.

Hay autores que estudian el problema del abastecimiento de combustible como Raviv y Kaspi (Raviv et al. 2011) que consideran el problema de cómo determinar un horario óptimo de abastecimiento de combustible y una política de contratación con proveedores de combustible. Sin embargo, también se enfocan únicamente en la mejora de la operación con las locomotoras existentes.

Los métodos de planeación de rutas a nivel estratégico y solución a los problemas de asignación de locomotoras, aunque involucran el dimensionamiento de la flota, primeramente se centran en trenes de pasajeros, en el cual la operación es muy diferente al tren de carga, y segundo, mezclan muchos aspectos relevantes a la vía y restricciones generales de planeación de la operación, lo cual es importante y estos modelos lo resuelven. Sin embargo, para el proyecto que se pretende desarrollar ayudaría a tomar como base el análisis de una correcta optimización de trazos de todas las rutas, incluyendo la flota diaria de máquinas que se necesitan.

Por otra parte, se encontraron diversos modelos para la solución de asignación de máquinas a trenes de carga en el ámbito operativo a un horizonte máximo de siete días, lo cual refleja lo compleja que es la operación y asignación de recursos día a día.

Las metodologías que se presentan en este documento se enfocan completamente en el dimensionamiento de la fuerza motriz necesaria para un plan a cinco años con enfoque estratégico, no contemplando factores como crecimiento de vía, patios ferroviarios o talleres, pero partiendo de una flota conocida y teniendo como objetivo mejorarla y hacerla más grande, siempre y cuando la demanda así lo requiera; también se contempla la justificación de adquisición de más máquinas nuevas y de última tecnología y cómo optimizar la fuerza motriz mediante un plan año por año, derivado de un pronóstico comercial y un análisis histórico de los trenes más importantes que corren diariamente por segmento (enfoque estratégico y táctico).

Capítulo 4. Metodologías para la optimización del uso de la fuerza motriz en una compañía ferroviaria

Lo que se realiza en este trabajo son dos metodologías en las que se pueda observar las ventajas de implementarlas en la planeación de la operación del ferrocarril. Las metodologías son las siguientes:

1. Plan para el dimensionamiento de la flota mínima de locomotoras requeridas diariamente para operar a un horizonte de 5 años
2. Metodología para la asignación óptima de número de máquinas por tramo operativo para los trenes más importantes por segmento.

4.1 Plan para el dimensionamiento de la flota mínima de locomotoras requeridas diariamente para operar a un horizonte de 5 años

Esta sección introduce las principales características del conjunto de datos y pasos para desarrollar el plan de cálculo a considerar y la justificación de ésta.

Primero se presenta un diagrama de flujo de la metodología para observar los pasos a seguir (figura 15), después se explica detalladamente cada paso en qué consiste y el proceso que se tiene que realizar para poder continuar al siguiente. Mediante un caso de aplicación se muestra cómo funciona la metodología y a través de un análisis costo-beneficio se aterriza la rentabilidad de usarla; y por último se incluyen las conclusiones del uso de ésta.

4.1.1 Diagrama de flujo del plan para el dimensionamiento de la flota mínima de locomotoras

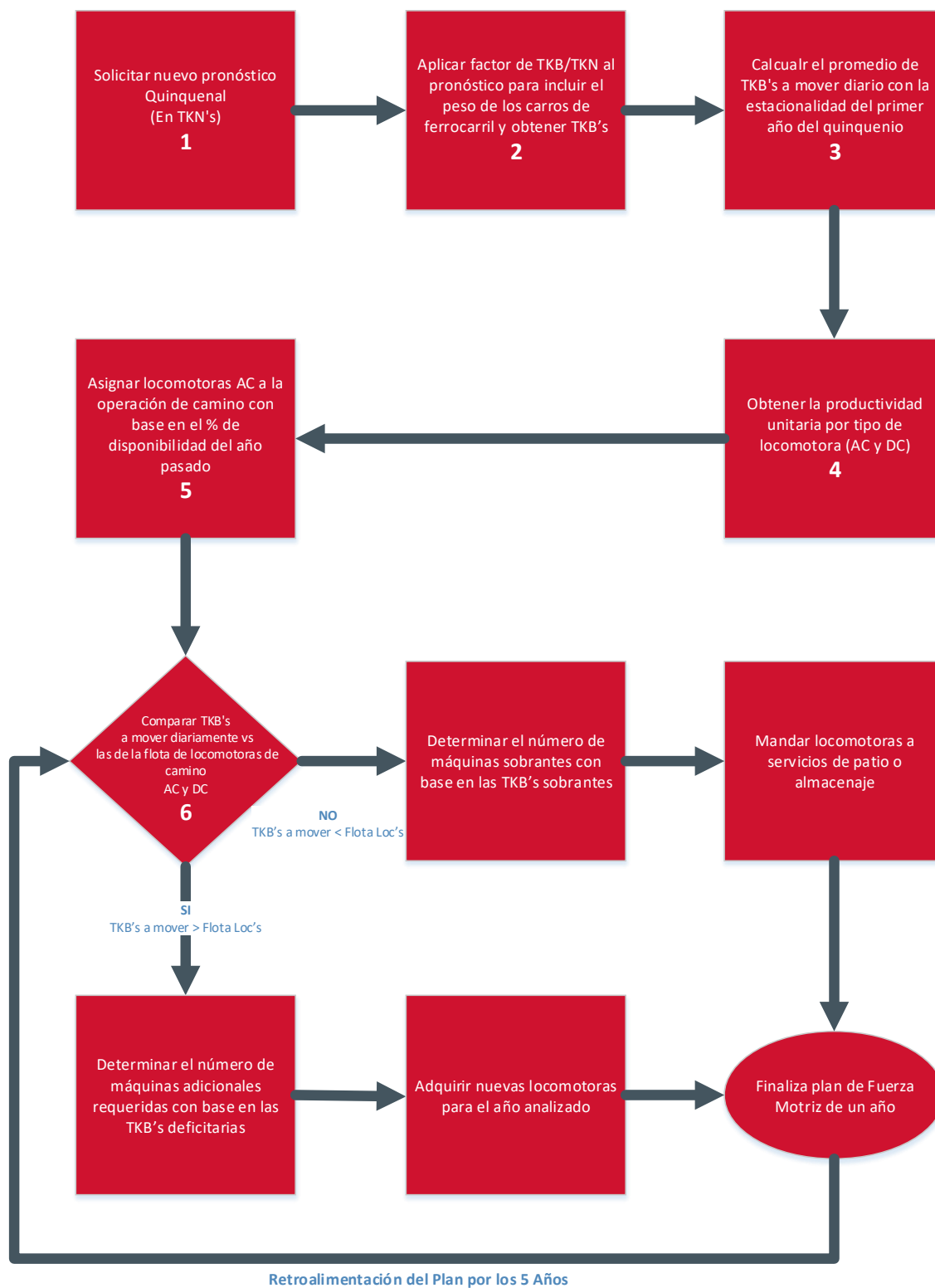


Figura 15 - Proceso general para el requerimiento de locomotoras

1.-Nuevo pronóstico quinquenal de TKN's

Obtener un pronóstico de TKN's a mover en los próximos cinco años, como ejemplo del 2020 al 2024, en el primer año del pronóstico (2020) se debe proporcionar una estacionalidad en la cual se indique mes a mes la proporción en la que se moverá el total de TKN's de ese año, ésta misma se va a replicar para los años restantes (2021-2024).

El pronóstico quinquenal es la estimación o previsión de volumen que una compañía ferrocarrilera pretende mover en los próximos 5 años normalmente dado en toneladas-kilómetro netas (TKN's). Las TKN's son la medida usada comúnmente en el tráfico de transporte de carga, en especial el terrestre de larga distancia (ferroviario o carretero) y básicamente es el producto de las toneladas de producto transportadas en carros de ferrocarril por la distancia de viaje de las mismas.

2.-Aplicar factor TKB/TKN al pronóstico para obtener TKB's

Las toneladas-kilómetro brutas (TKB's) son las toneladas transportadas por la distancia de viaje, incluyendo el peso de carros en los que son transportadas dichas toneladas. Debido a que este también suma al peso que las locomotoras tienen que arrastrar es necesario incluirlo en el cálculo.

Con base en la estadística histórica de los doce últimos meses de las TKN's y TKB's que se han movido se obtendrá un factor de relación, el cual nos permitirá transformar el pronóstico de TKN's a TKB'S y este se proyectará para los cinco años del plan.

3.-Promedio de TKB's diarias a mover por mes

Cualquier compañía ferroviaria deberá contar con cierto número de locomotoras para poder mover cierta cantidad de toneladas al día. Por eso una vez que se tengan las TKB's anuales, éstas se tienen que distribuir mensualmente con la estacionalidad proporcionada del primer año y, posteriormente, del promedio mensual se calcula un promedio de TKB's diarias a mover.

4.-Obtener la productividad por tipo de locomotoras (AC y DC)

La productividad unitaria por tipo de locomotora es de vital importancia para el plan, ya que con esta dimensionaremos la fuerza total de arrastre con la que contará la compañía ferroviaria y será el punto clave de comparación contra la demanda diaria. Para calcularla requeriremos obtener de la información histórica de los últimos 12 meses la proporción por locomotoras AC y DC con la cual se han movido las TKB's. Adicionalmente, se requerirá obtener el promedio diario del número de locomotoras AC y DC que se usaron en los últimos 12 meses para poder dividirlo entre las TKB's que les corresponden y así obtener la productividad unitaria por tipo.

5.-Asignar locomotoras AC a la operación con base en el porcentaje de disponibilidad del año pasado

Contemplar diferentes infortunios que puedan sufrir las máquinas a lo largo del tiempo y plasmarlo en el plan a desarrollar es de vital importancia para que arroje resultados apegados a la realidad, es por eso que el modelo contemplará un porcentaje de disponibilidad de la flota total de máquinas AC, la cual se considerará que podrá operar diariamente.

Para obtener un porcentaje de disponibilidad de máquinas y proyectarlo hacia el futuro se tomará en cuenta las siguientes restricciones:

- Sólo se considera la disponibilidad de locomotoras AC.
- Las locomotoras DC contemplan un número fijo para camino.
- La proyección futura de disponibilidad se proyecta con el promedio mensual de los últimos meses.
- La disponibilidad AC considera:
 - Mantenimiento (fallas, inspecciones y overhaul modulados)
 - Accidentes y vandalismo

6.-Balance de TKB's a Mover VS TKB's de la flota de camino (AC y DC)

Una vez que se tenga el total de TKB's netas de arrastre de toda la flota AC y DC se podrá realizar un balance de oferta contra demanda y así saber si tenemos un déficit o un sobrante de fuerza en cada mes.

Con el objetivo de evitar tener locomotoras AC en patio o almacenadas, en el análisis de balance se le dará prioridad a este tipo de máquinas, por lo cual primero se va a evaluar cuántas TKB's a mover con fuerza tractiva AC se pueden mover y en caso de que sobre fuerza, se mandarán a patios o almacenaje. En caso contrario, que es el caso en que falten máquinas, se mandarían a evaluar las TKB's faltantes con fuerza tractiva DC (ver figura 16).

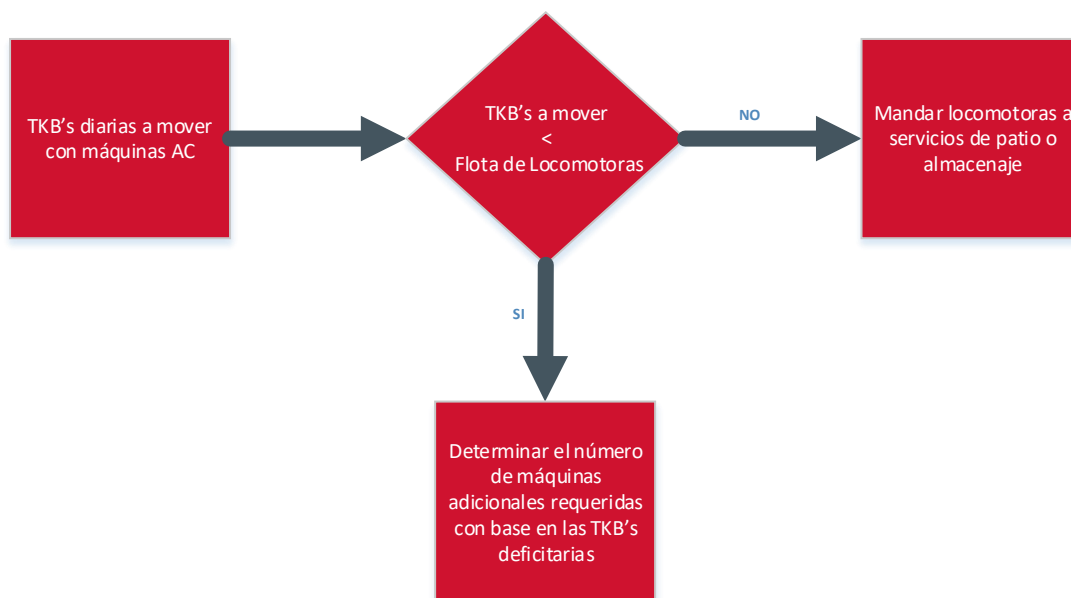


Figura 16 - Diagrama de flujo para comparar TKB's a mover vs fuerza AC

Como se mencionó anteriormente, usar locomotoras DC de camino será la segunda opción del análisis, por lo cual en este segundo balance primero se evaluará cuántas TKB's de las faltantes que no se pudieron mover con la flota actual AC se pueden mover hasta con un máximo de 46 máquinas DC (número fijado por el área de operación para usar este tipo de máquinas en camino) y determinar cuántas máquinas se usarán. Si después de este balance no se cubren las TKB's restantes con toda la fuerza motriz de la empresa, el faltante de TKB's a mover determinarán cuántas locomotoras adicionales AC se requerirán por año (ver figura 17).

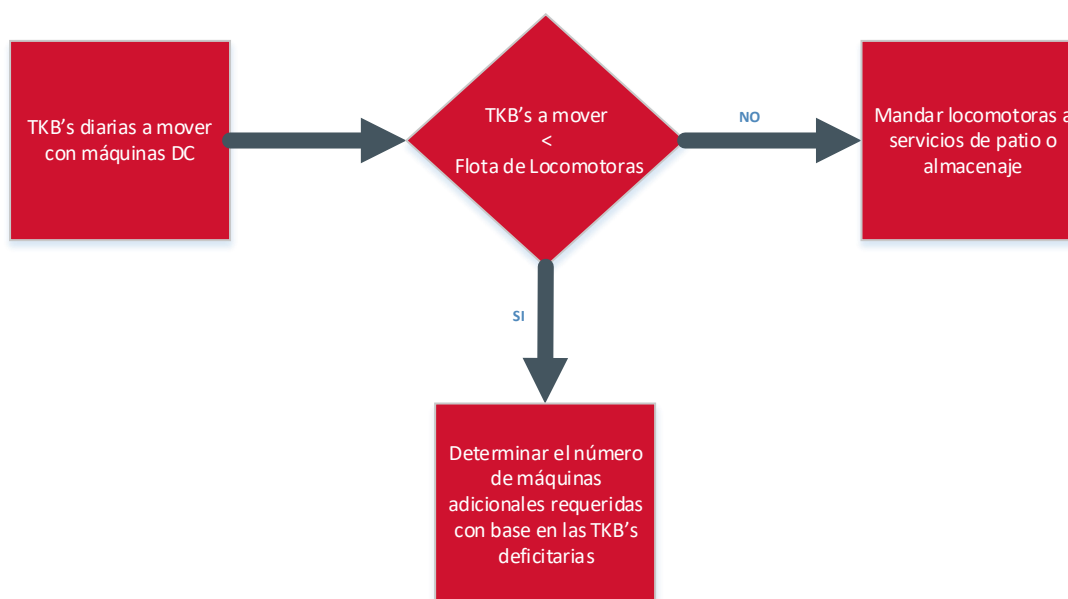


Figura 17 - Diagrama de flujo para comparar TKB's a mover vs fuerza DC

4.1.2 Caso práctico de aplicación en una compañía ferroviaria

Lo que se realiza en esta sección es un caso práctico de aplicación en una compañía ferroviaria donde se puede observar la ventaja de utilizar el plan de dimensionamiento de flota mínima de locomotoras y mediante los resultados sustentar la validez del plan.

Una compañía ferroviaria, a través de la gerencia de Planeación, ha detectado la necesidad de que se cuente con suficientes locomotoras para operar diariamente y mover la demanda requerida durante los próximos cinco años.

4.1.2.1.-Nuevo pronóstico quinquenal de TKN's y estacionalidad

El área Comercial proporciona el pronóstico de ventas por segmento de mercado (tabla 6) durante los próximos cinco años, así como la estacionalidad de un año (tabla 7) para así conocer la demanda requerida mes por mes.

Tabla 6 - Pronóstico de ventas en TKN's

Tons - Km (Millones)	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Total
Segmento A	20,226.5	21,035.5	21,877.0	22,752.0	23,662.1	109,553.1
Segmento B	7,450.1	7,748.1	8,058.1	8,380.4	8,715.6	40,352.4
Segmento C	3,477.0	3,616.1	3,760.7	3,911.2	4,067.6	18,832.6
Segmento D	2,613.2	2,717.7	2,826.4	2,939.5	3,057.1	14,153.9
Segmento E	4,312.4	4,484.9	4,664.3	4,850.9	5,044.9	23,357.3
Segmento F	2,588.4	2,691.9	2,799.6	2,911.6	3,028.1	14,019.6
Segmento G	3,668.7	3,815.5	3,968.1	4,126.8	4,291.9	19,871.0
Segmento H	2,163.5	2,250.1	2,340.1	2,433.7	2,531.0	11,718.4
Segmento I	5,053.5	5,255.7	5,465.9	5,684.5	5,911.9	27,371.5
Total Ton-Km	51,553.4	53,615.5	55,760.2	57,990.6	60,310.2	279,229.9

Tabla 7 - Estacionalidad

MES	%
ENE	6.89%
FEB	6.79%
MAR	7.82%
ABR	7.63%
MAY	9.33%
JUN	8.72%
JUL	9.30%
AGO	8.75%
SEP	9.19%
OCT	9.52%
NOV	8.24%
DIC	7.80%
Total	100.00%

4.1.2.2.- Aplicar factor TKB/TKN al pronóstico para obtener TKB's y el promedio de TKB's diarias a mover por mes

Con el análisis de movimientos histórico de TKN's y TKB's de los últimos doce meses (tabla 8) se obtiene un factor de **1.87** que sirve para obtener las TKB de los próximos años, ya que el pronóstico proporcionado viene en TKN's.

Tabla 8 - Estadística Histórica de TKN's y TKB's

Mes	TKN	TKB	TKB/TKN
1	4,097,435,391	7,903,769,928	1.93
2	4,533,944,185	8,508,486,576	1.88
3	4,279,562,322	8,204,755,534	1.92
4	4,127,376,679	7,707,931,872	1.87
5	4,412,477,332	8,112,059,380	1.84
6	4,352,689,211	8,217,142,806	1.89
7	4,392,878,393	8,048,621,571	1.83
8	4,591,173,909	8,112,951,707	1.77
9	3,956,634,431	7,428,933,058	1.88
10	3,860,669,839	7,403,152,883	1.92
11	3,365,882,663	6,503,363,762	1.93
12	3,809,855,626	6,935,696,967	1.82
Promedio			1.87

Una vez que se obtienen las TKB del quinquenio mes por mes, se divide entre el número de días de cada mes y así se conoce el promedio diario de TKB's que se requiere arrastrar (tabla 9).

Tabla 9 - Promedio diario de TKB's mes x mes de los cinco años

Días mes	Mes / Año	TKN (Millones)	TKB (Millones)	Miles TKB/Día FXE	Días mes	Mes / Año	TKN (Millones)	TKB (Millones)	Miles TKB/Día FXE
31	ene-01	3,554	6,652	214,596	31	ene-04	3,997	7,483	241,391
28	feb-01	3,503	6,557	234,180	28	feb-04	3,940	7,376	263,421
31	mar-01	4,030	7,544	243,341	31	mar-04	4,533	8,485	273,725
30	abr-01	3,935	7,366	245,525	30	abr-04	4,426	8,285	276,182
31	may-01	4,808	9,000	290,318	31	may-04	5,408	10,124	326,568
30	jun-01	4,498	8,419	280,650	30	jun-04	5,059	9,471	315,693
31	jul-01	4,796	8,978	289,613	31	jul-04	5,395	10,099	325,775
31	ago-01	4,512	8,447	272,482	31	ago-04	5,076	9,502	306,505
30	sep-01	4,736	8,866	295,519	30	sep-04	5,327	9,973	332,418
31	oct-01	4,909	9,190	296,456	31	oct-04	5,522	10,338	333,473
30	nov-01	4,250	7,957	265,226	30	nov-04	4,781	8,950	298,343
31	dic-01	4,023	7,531	242,925	31	dic-04	4,525	8,471	273,257
31	ene-02	3,696	6,919	223,180	31	ene-05	4,157	7,782	251,047
28	feb-02	3,643	6,819	243,547	28	feb-05	4,098	7,671	273,958
31	mar-02	4,191	7,845	253,075	31	mar-05	4,714	8,825	284,674
30	abr-02	4,092	7,660	255,346	30	abr-05	4,603	8,617	287,230
31	may-02	5,000	9,360	301,931	31	may-05	5,624	10,529	339,631
30	jun-02	4,678	8,756	291,876	30	jun-05	5,262	9,850	328,320
31	jul-02	4,988	9,337	301,198	31	jul-05	5,611	10,503	338,806
31	ago-02	4,693	8,785	283,381	31	ago-05	5,279	9,882	318,765
30	sep-02	4,925	9,220	307,339	30	sep-05	5,540	10,371	345,715
31	oct-02	5,106	9,558	308,314	31	oct-05	5,743	10,751	346,812
30	nov-02	4,421	8,275	275,835	30	nov-05	4,972	9,308	310,277
31	dic-02	4,184	7,832	252,641	31	dic-05	4,706	8,810	284,187
31	ene-03	3,844	7,195	232,107					
28	feb-03	3,789	7,092	253,289					
31	mar-03	4,359	8,159	263,198					
30	abr-03	4,256	7,967	265,560					
31	may-03	5,200	9,734	314,008					
30	jun-03	4,865	9,107	303,551					
31	jul-03	5,187	9,711	313,245					
31	ago-03	4,881	9,136	294,716					
30	sep-03	5,122	9,589	319,633					
31	oct-03	5,310	9,940	320,647					
30	nov-03	4,597	8,606	286,869					
31	dic-03	4,351	8,145	262,747					

4.1.2.3.-Obtener la productividad por tipo de locomotoras (AC y DC)

Para calcular la productividad, primero se obtiene la proporción de TKB's que se movieron con máquinas AC y DC de los últimos doce meses. Después las TKB movidas por número el tipo de máquinas se dividen entre el promedio diario de locomotoras que se usó y se obtiene una productividad mes por mes. Finalmente se saca el promedio de esos meses y se proyecta para el quinquenio (tabla 10); en este ejercicio se obtuvo una productividad **AC** de **879.63 miles de TKB's** y para **DC** de **519.71 miles de TKB's**.

Tabla 10 - Estadística histórica del año anterior de productividad por tipo de locomotora

Días	Mes	TKB's X día (Prom)	% TKB's AC	% TKB's DC	Promedio diario					
					TKB's AC	TKB's DC	Loc AC	Loc DC	Produc AC	Produc DC
31	enero	222,509,900	92%	8%	205,646,340	16,863,560	254	43	810,764	391,882
28	febrero	239,546,885	90%	10%	215,298,196	24,248,689	254	41	848,944	594,019
31	marzo	245,654,160	91%	9%	222,323,037	23,331,124	265	38	840,285	620,828
30	abril	248,245,104	92%	8%	229,587,004	18,658,101	265	35	866,428	535,639
31	mayo	243,576,993	91%	9%	221,529,091	22,047,902	241	35	917,447	638,771
30	junio	259,911,066	92%	8%	238,374,886	21,536,180	242	37	986,458	577,377
31	julio	237,331,475	93%	7%	220,208,616	17,122,859	223	36	986,139	469,327
31	agosto	234,529,033	90%	10%	212,221,278	22,307,755	240	47	883,187	474,959
30	septiembre	269,485,679	91%	9%	246,049,136	23,436,543	278	48	886,054	487,922
31	octubre	250,303,001	88%	12%	219,289,959	30,159,535	265	46	826,998	657,949
30	noviembre	255,102,952	91%	9%	232,177,817	22,838,147	255	48	909,993	471,213
31	diciembre	239,996,289	91%	9%	217,560,012	22,436,278	266	56	819,358	400,648
577		4,683,694,803	90%	10%	2,680,265,372	264,986,671	3,047	510	879,629	519,710

4.1.2.4.-Asignar locomotoras AC a la operación con base en el % de disponibilidad del año pasado

Se obtiene un promedio de los últimos doce meses de disponibilidad de locomotoras AC (tabla 11), el cual es de **92.39%** y se utilizará para conocer la flota útil promedio diario.

Tabla 11 - Disponibilidad histórica de locomotoras AC del último año

	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	Prom
Disponibilidad	92.70%	94.00%	93.90%	92.80%	91.60%	92.50%	92.50%	91.80%	91.60%	91.00%	91.70%	92.60%	92.39%

Aplicando el porcentaje de disponibilidad histórico se obtiene que de la flota total AC que son 310 máquinas sólo **286 locomotoras** estarán **disponibles** en promedio día a día (tabla 12).

Tabla 12 - Flota efectiva de locomotoras AC

Flota Total AC	Disponibilidad	Flota Efectiva
310	92.39%	286

4.1.2.5.-Balance de TKB's a Mover VS TKB's de la flota de camino (AC y DC)

La siguiente tabla (tabla 13) muestra los insumos para ejecutar el plan de requerimiento de locomotoras. Se puede observar el promedio diario de TKB's a mover mes por mes, la fuerza disponible AC y DC que se tiene en TKB's y número de máquinas, así como las TKB faltantes convertidas a número de locomotoras que se van a requerir en promedio diariamente de cada mes y por último la flota sobrante por tipo.

Tabla 13 - Cálculo de locomotoras requeridas

Año	Mes	Promedio Diario TKB's	#AC		TKB's a mover	#AC Adicionales		TKB's a mover	#DC		TKB's a mover	#AC Faltantes	#AC Sobrantes		#DC Sobrantes	
			TKB's	Maq		TKB's	Maq		TKB's	Maq			TKB's	Maq	TKB's	Maq
1	1	214,596	214,596	244	-	-	-	-	-	-	-	-	37,343	42	23,907	27
		234,180	234,180	266	-	-	-	-	-	-	-	-	17,758	20	23,907	27
		243,341	243,341	277	-	-	-	-	-	-	-	-	8,597	10	23,907	27
		245,525	245,525	279	-	-	-	-	-	-	-	-	6,413	7	23,907	27
	Abr	290,318	251,938	286	38,380	-	-	38,380	23,907	46	14,473	16	-	-	-	-
		280,650	251,938	286	28,711	-	-	28,711	23,907	46	4,805	5	-	-	-	-
		289,613	251,938	286	37,675	-	-	37,675	23,907	46	13,768	16	-	-	-	-
		272,482	251,938	286	20,543	-	-	20,543	20,543	40	-	-	-	-	3,363	4
	Jul	295,519	251,938	286	43,580	-	-	43,580	23,907	46	19,674	22	-	-	-	-
		296,456	251,938	286	44,518	-	-	44,518	23,907	46	20,611	23	-	-	-	-
		265,226	251,938	286	13,288	-	-	13,288	13,288	26	-	-	-	-	10,619	12
		242,925	242,925	276	-	-	-	-	-	-	-	-	9,014	10	23,907	27
	2	223,180	223,180	254	-	-	-	-	-	-	-	-	28,759	33	23,907	27
		243,547	243,547	277	-	-	-	-	-	-	-	-	8,391	10	23,907	27
		253,075	251,938	286	1,136	-	-	1,136	1,136	2	-	-	-	-	22,770	26
		255,346	251,938	286	3,408	-	-	3,408	3,408	7	-	-	-	-	20,499	23
2	Abr	301,931	251,938	286	49,993	-	-	49,993	23,907	46	26,086	30	-	-	-	-
		291,876	251,938	286	39,937	-	-	39,937	23,907	46	16,031	18	-	-	-	-
		301,198	251,938	286	49,259	-	-	49,259	23,907	46	25,353	29	-	-	-	-
		283,381	251,938	286	31,443	-	-	31,443	23,907	46	7,536	9	-	-	-	-
	Jul	307,339	251,938	286	55,401	-	-	55,401	23,907	46	31,494	36	-	-	-	-
		308,314	251,938	286	56,376	-	-	56,376	23,907	46	32,469	37	-	-	-	-
		275,835	251,938	286	23,897	-	-	23,897	23,897	46	-	-	-	-	10	0
		252,641	251,938	286	703	-	-	703	703	1	-	-	-	-	23,203	26
	3	232,107	232,107	264	-	-	-	-	-	-	-	-	19,832	23	23,907	27
		253,289	251,938	286	1,351	-	-	1,351	1,351	3	-	-	-	-	22,556	26
		263,198	251,938	286	11,259	-	-	11,259	11,259	22	-	-	-	-	12,647	14
		265,560	251,938	286	13,622	-	-	13,622	13,622	26	-	-	-	-	10,285	12
	Abr	314,008	251,938	286	62,070	-	-	62,070	23,907	46	38,163	43	-	-	-	-
		303,551	251,938	286	51,612	-	-	51,612	23,907	46	27,706	31	-	-	-	-
		313,245	251,938	286	61,307	-	-	61,307	23,907	46	37,400	43	-	-	-	-
		294,716	251,938	286	42,778	-	-	42,778	23,907	46	18,871	21	-	-	-	-
	Jul	319,633	251,938	286	67,695	-	-	67,695	23,907	46	43,788	50	-	-	-	-
		320,647	251,938	286	68,709	-	-	68,709	23,907	46	44,802	51	-	-	-	-
		286,869	251,938	286	34,930	-	-	34,930	23,907	46	11,024	13	-	-	-	-
		262,747	251,938	286	10,809	-	-	10,809	10,809	21	-	-	-	-	13,098	15
3	4	241,391	241,391	274	-	-	-	-	-	-	-	-	10,547	12	23,907	27
		263,421	251,938	286	11,483	-	-	11,483	11,483	22	-	-	-	-	12,424	14
		273,725	251,938	286	21,787	-	-	21,787	21,787	42	-	-	-	-	2,120	2
		276,182	251,938	286	24,244	-	-	24,244	23,907	46	338	0	-	-	-	-
	Abr	326,568	251,938	286	74,630	-	-	74,630	23,907	46	50,724	58	-	-	-	-
		315,693	251,938	286	63,754	-	-	63,754	23,907	46	39,848	45	-	-	-	-
		325,775	251,938	286	73,837	-	-	73,837	23,907	46	49,930	57	-	-	-	-
		306,505	251,938	286	54,567	-	-	54,567	23,907	46	30,660	35	-	-	-	-
	Jul	332,418	251,938	286	80,480	-	-	80,480	23,907	46	56,573	64	-	-	-	-
		333,473	251,938	286	81,534	-	-	81,534	23,907	46	57,628	66	-	-	-	-
		298,343	251,938	286	46,405	-	-	46,405	23,907	46	22,498	26	-	-	-	-
		273,257	251,938	286	21,319	-	-	21,319	21,319	41	-	-	-	-	2,588	3
	5	251,047	251,047	285	-	-	-	-	-	-	-	-	892	1	23,907	27
		273,958	251,938	286	22,019	-	-	22,019	22,019	42	-	-	-	-	1,887	2
		284,674	251,938	286	32,736	-	-	32,736	23,907	46	8,829	10	-	-	-	-
		287,230	251,938	286	35,291	-	-	35,291	23,907	46	11,385	13	-	-	-	-
4	Abr	339,631	251,938	286	87,693	-	-	87,693	23,907	46	63,786	73	-	-	-	-
		328,320	251,938	286	76,382	-	-	76,382	23,907	46	52,475	60	-	-	-	-
		338,806	251,938	286	86,868	-	-	86,868	23,907	46	62,961	72	-	-	-	-
		318,765	251,938	286	66,827	-	-	66,827	23,907	46	42,920	49	-	-	-	-
	Jul	345,715	251,938	286	93,777	-	-	93,777	23,907	46	69,870	79	-	-	-	-
		346,812	251,938	286	94,873	-	-	94,873	23,907	46	70,967	81	-	-	-	-
		310,277	251,938	286	58,339	-	-	58,339	23,907	46	34,432	39	-	-	-	-
		284,187	251,938	286	32,249	-	-	32,249	23,907	46	8,342	9	-	-	-	-

4.1.2.6.-Resultados

En la figura 18 se observa año por año el requerimiento máximo de número de máquinas adicionales que se requerirán mes a mes a lo largo de los 5 años.

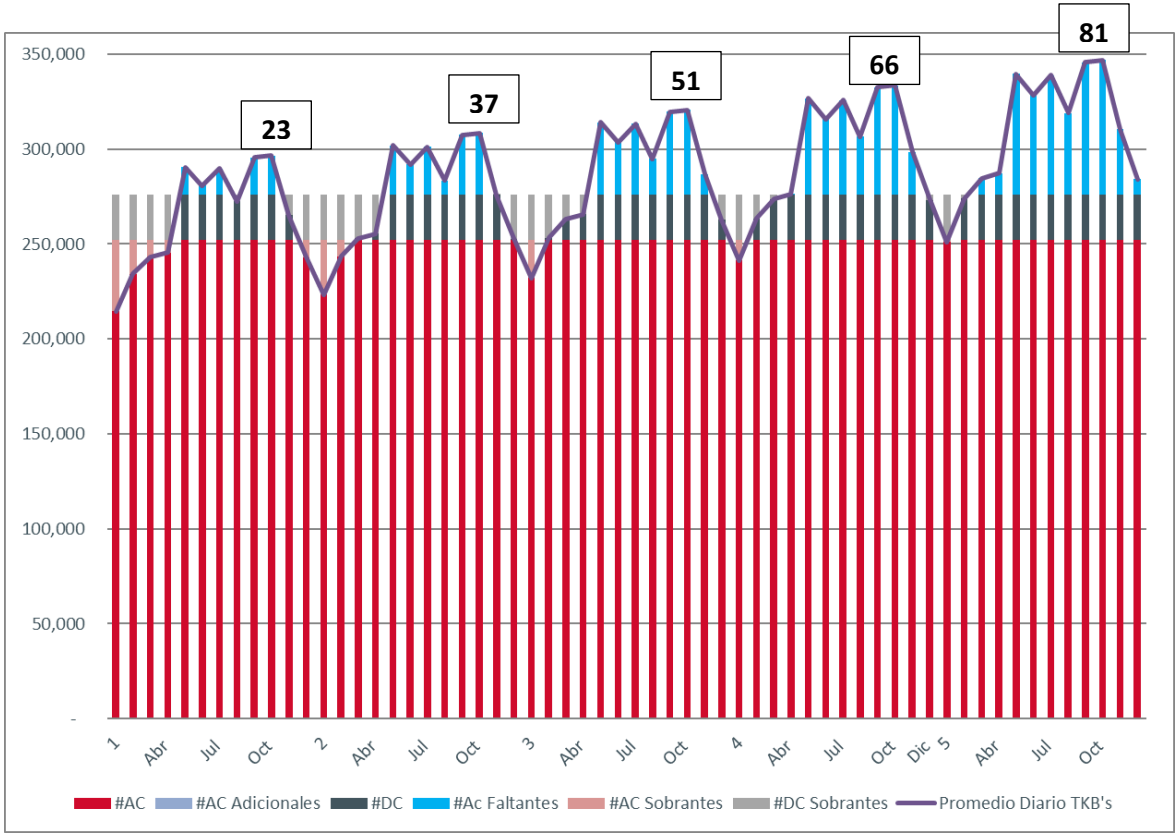


Figura 18 - Gráfica quinquenal del promedio diario mes a mes de demanda y fuerza tractiva

Tabla 14 - Locomotoras adicionales por año

Año	1	2	3	4	5
# Locomotoras Faltantes	23	37	51	66	81

El modelo descrito en el trabajo contempla para los años proyectados el número máximo de locomotoras (tabla 14), lo cual quiere decir que, si se adquieren 81 máquinas a lo largo de los 5 años como se observa en la tabla 15, será suficiente para mover el volumen requerido a lo largo del quinquenio.

Tabla 15 - Plan de adquisición de locomotoras

Año	1	2	3	4	5	Total
# Locomotoras Adicionales	23	14	14	15	15	81

En la figura 19 se muestra el resultado de la adquisición de locomotoras a lo largo de los 5 años y el uso de la fuerza tractiva en promedio diario de cada mes. Se parte de la fuerza actual de la compañía y de ahí se muestra año con año las máquinas que fueron necesarias para cubrir con la demanda.

En el primer año fueron agregadas 23 máquinas, en el segundo año sólo se necesitarán 14 locomotoras más para cubrir la demanda de ese año y así sucesivamente (de acuerdo con la tabla 15). El resultado, también con base en que la estacionalidad no es constante, el mes de mayor demanda es donde se utilizarán los recursos al máximo.

En la gráfica de la figura 19 también se observa la flota de máquinas AC y DC que sobran en promedio en cada uno de los meses a lo largo del estudio. Esto permite analizar qué hacer con esas locomotoras sobrantes en el patio en un futuro, ya sea usarlas para movimientos internos o guardarlas en los almacenes y así no gastar en cuotas de mantenimiento, desperdicio de combustible o que tengan una alta probabilidad de ser vandalizadas al estar paradas en puntos no seguros dentro de los patios.

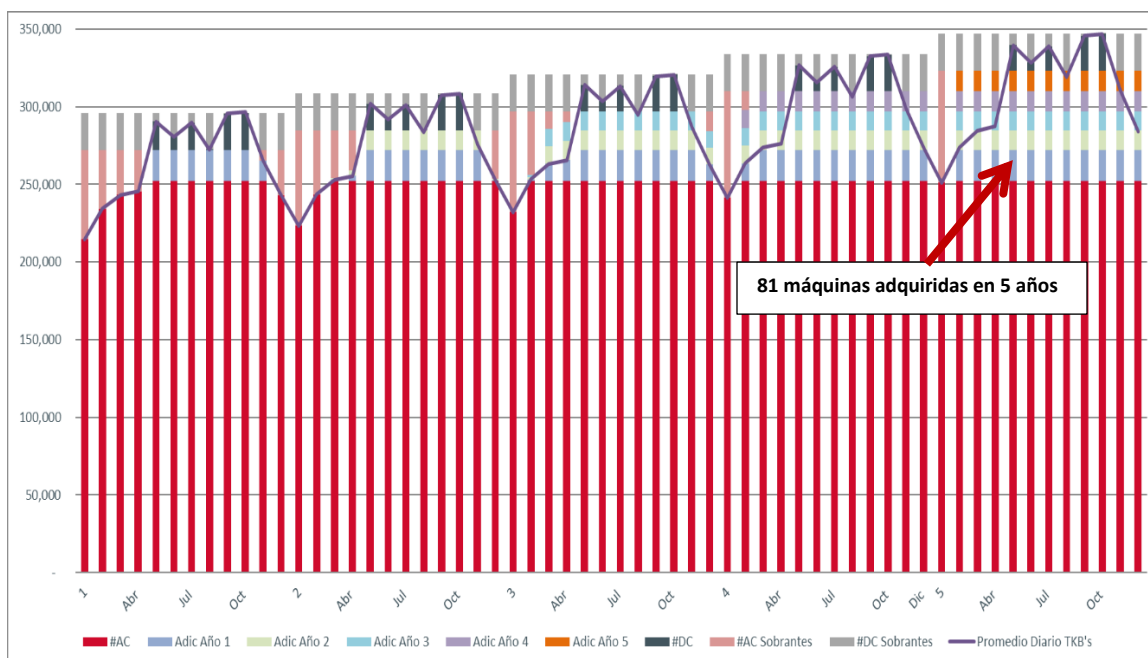


Figura 19- Gráfica quinquenal del promedio diario mes a mes de demanda y fuerza tractiva con máquinas adicionales

Los resultados obtenidos anteriormente representan la parte más importante del plan propuesto en este documento, ya que con base en la última gráfica (figura 19) se tomará la decisión a nivel estratégico dentro de la empresa ferroviaria para decidir si invierte o no durante los próximos años en la compra de las locomotoras que arroja el plan.

Como se muestra más adelante, la compra de cada locomotora conlleva un análisis costo-beneficio que justifique su compra, ya que se sabe que representan una gran inversión y se tiene como objetivo poder sustentar la adquisición de este tipo de equipo tractivo.

Por otra parte, también permite evaluar a nivel directivo si derivado de las condiciones actuales por las que atraviesa la empresa se decide hacer la compra de máquinas nuevas que dice el plan o se opte por sacar máquinas de los patios y utilizarlas para cubrir la demanda que se avecina del

próximo año y así sucesivamente. Todo lo anterior con el fin de evitar el uso de fuerza externa y ya no volver a endeudar a la empresa y ser autosuficientes.

Este plan ya se utilizó y aterrizó dentro de una empresa ferroviaria a menor escala y después de adquirir las máquinas que arrojó el plan, los resultados fueron bastante alentadores:

- No hubo déficit de fuerza motriz para mover la demanda solicitada, principalmente en el pico.
- Uso de máquinas AC y DC durante los meses de menor demanda se optimizó.
- Se está obteniendo ahorro en la empresa por consumo de combustible y cuotas de mantenimiento.

Con base en estos resultados, se puede sugerir la implementación dentro de compañías ferroviarias con más volumen de máquinas y se pueda sustentar la implementación de éste y aterrizar los beneficios de planificación que proporciona el plan.

4.1.3 Justificación de la compra de locomotoras mediante un ACB (Análisis Costo-Beneficio)

En esta sección se presenta la justificación de la adquisición de locomotoras nuevas AC para sustituir máquinas DC. El número de locomotoras por adquirir año por año está basado en el uso de la metodología antes desarrollada y con este análisis costo-beneficio se pretende demostrar la viabilidad de ésta y los beneficios de ir renovando la flota obsoleta DC por máquinas AC.

Con base en un análisis operativo, la fuerza tractiva de una máquina AC es igual 1.82 máquinas DC, por lo cual los principales ahorros que se obtendrían al realizar la sustitución propuesta serían:

- Reducción de pagos de cuotas de mantenimiento: estas cuotas son más elevadas para las máquinas AC que DC, sin embargo, como una locomotora AC representa casi los de dos DC, la reducción total de flota obsoleta DC permitirá tener un ahorro en este rubro.
- Menor consumo de combustible: es el mismo caso que el anterior, las máquinas AC gastan mayo combustible, pero al tener que reducir la flota DC por AC así a la mitad, se obtiene el ahorro al usar menos litros.

4.1.3.1 Criterios de evaluación

A continuación, se describen los criterios de evaluación que se necesitan para realizar el análisis costo-beneficio de la sustitución de locomotoras DC por AC. Estos criterios son definidos por diferentes áreas de la empresa y pueden variar de acuerdo con las políticas de cada empresa. En este caso se tomará el ejemplo de Ferromex.

Las premisas que se utilizarán son las siguientes:

- Tasa de descuento (oportunidad): 10 % anual.
- Tasa impositiva (ISR + PTU): 30 %.
- Tasa de depreciación de la inversión (20 años): 5 %.
- Período de evaluación: 21 años
- Precio del dólar: \$20.50
- Inflación del costo por locomotora: 1.5% por año máximo (por contrato)
- Factores de escalación por mantenimiento: 1.84%, 5.22% y 4.70% por año
- Precio inicial del Diésel por litro: \$16.24
- Inflación del costo de Diésel por litro: 3.5% por año

4.1.3.2 Evaluación financiera

En las tablas 16 y 17 se refleja el análisis año por año del costo-beneficio en cual se puede observar la inversión requerida a lo largo del tiempo de la depreciación de las locomotoras. También nos muestra cómo el flujo de efectivo se va moviendo conforme los beneficios van dejando ganancias en cuestión de dinero. Este análisis nos permite concluir si la inversión en la compra de máquinas nuevas AC para sustituir máquinas DC es rentable.

A continuación, se presenta el monto de inversión que se requiere en cada año para la compra de locomotoras AC con base en la metodología, los beneficios que se transforman en ahorros monetarios al adquirir máquinas nuevas y por último los resultados del análisis, con los cuales se concluye que sí es rentable este proyecto. Dado que la inversión se va a recuperar en un lapso de **11 años**, casi a la mitad de la vida útil de las locomotoras, se tiene un valor presente neto de **128.3 MDD** con una tasa interna de retorno del **19.1%**, que es mayor al 10% de la tasa mínima que se esperaba obtener.

Inversión:

- Adquisición de 23 locomotoras en el año 1: 52.6 Millones de dólares (Mdd)
- Adquisición de 14 locomotoras en el año 2: 32.5 Mdd
- Adquisición de 14 locomotoras en el año 3: 33.0 Mdd
- Adquisición de 15 locomotoras en el año 4: 35.8 Mdd
- Adquisición de 15 locomotoras en el año 5: 36.4 Mdd
- Inversión total de 81 locomotoras en 5 años: 190.5 Mdd

Beneficios:

- Ahorros en las cuotas de mantenimiento (De 147 DC's a 81 AC's).
- Ahorros por consumo de combustible (De DC's 4.14 Lt/TKB a AC's 3.67 Lt/TKB).
 - Mayor productividad (De 520 TKB's/Día por locomotora a 880 TKB's/Día).

Los resultados de los principales indicadores financieros son los siguientes:

- Valor Presente Neto: 128.3 Mdd
- Tasa Interna de Retorno: 19.1 %.
- Periodo de recuperación descontado: 11 años.

4.1.3.3 Flujo financiero

Tabla 16 - Flujo financiero del costo beneficio de la compra de locomotoras (1/2)

Tasa de descuento	10%	Impuestos	30.0%	Participación	10%						
Período de eval.	23 [años]	Depreciación									
Precio Dólar	20.5	(Locomotoras)	5.0%								
Inversión	\$ 190,449,537										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Beneficios	\$ 1,468,694	\$ 17,944,989	\$ 25,550,640	\$ 32,325,159	\$ 33,719,594	\$ 34,946,295	\$ 37,283,657	\$ 39,801,878	\$ 42,516,630	\$ 45,445,023	\$ 48,605,738
Ahorro x Mantenimiento	\$ -	\$ 2,823,688	\$ 4,430,869	\$ 6,493,579	\$ 7,661,842	\$ 8,953,727	\$ 10,381,349	\$ 11,957,990	\$ 13,698,206	\$ 15,617,954	\$ 17,734,722
Ahorro x Combs y Product	\$ -	\$ 14,247,079	\$ 20,245,548	\$ 24,887,420	\$ 25,113,592	\$ 25,992,567	\$ 26,902,307	\$ 27,843,888	\$ 28,818,424	\$ 29,827,069	\$ 30,871,016
Valor de Rescate por Loc DC	\$ 1,468,694	\$ 874,223	\$ 874,223	\$ 944,160	\$ 944,160	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Inversión	-\$ 52,626,875	-\$ 32,513,206	-\$ 32,999,854	-\$ 35,886,217	-\$ 36,423,385	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Adquisición de 23 Locomotoras	-\$ 52,626,875										
Adquisición de 14 Locomotoras		-\$ 32,513,206									
Adquisición de 14 Locomotoras			-\$ 32,999,854								
Adquisición de 15 Locomotoras				-\$ 35,886,217							
Adquisición de 15 Locomotoras					-\$ 36,423,385						
Depreciación	\$ -	\$ 2,631,344	\$ 4,257,004	\$ 5,906,997	\$ 7,701,308	\$ 9,522,477	\$ 9,522,477	\$ 9,522,477	\$ 9,522,477	\$ 9,522,477	\$ 9,522,477
		\$ 2,631,344	\$ 2,631,344	\$ 2,631,344	\$ 2,631,344	\$ 2,631,344	\$ 2,631,344	\$ 2,631,344	\$ 2,631,344	\$ 2,631,344	\$ 2,631,344
			\$ 1,625,660	\$ 1,625,660	\$ 1,625,660	\$ 1,625,660	\$ 1,625,660	\$ 1,625,660	\$ 1,625,660	\$ 1,625,660	\$ 1,625,660
				\$ 1,649,993	\$ 1,649,993	\$ 1,649,993	\$ 1,649,993	\$ 1,649,993	\$ 1,649,993	\$ 1,649,993	\$ 1,649,993
					\$ 1,794,311	\$ 1,794,311	\$ 1,794,311	\$ 1,794,311	\$ 1,794,311	\$ 1,794,311	\$ 1,794,311
						\$ 1,821,169.24	\$ 1,821,169	\$ 1,821,169	\$ 1,821,169	\$ 1,821,169	\$ 1,821,169
Beneficios Brutos	\$ 1,468,694	\$ 15,313,645	\$ 21,293,635	\$ 26,418,162	\$ 26,018,287	\$ 25,423,818	\$ 27,761,180	\$ 30,279,401	\$ 32,994,153	\$ 35,922,546	\$ 39,083,261
Impuestos	\$ 440,608	\$ 4,594,094	\$ 6,388,091	\$ 7,925,449	\$ 7,805,486	\$ 7,627,145	\$ 8,328,354	\$ 9,083,820	\$ 9,898,246	\$ 10,776,764	\$ 11,724,978
Beneficios Netos	\$ 1,028,086	\$ 10,719,552	\$ 14,905,545	\$ 18,492,713	\$ 18,212,801	\$ 17,796,672	\$ 19,432,826	\$ 21,195,581	\$ 23,095,907	\$ 25,145,782	\$ 27,358,283
Flujo de Efectivo	-\$ 51,598,789	-\$ 19,162,311	-\$ 13,837,305	-\$ 11,486,506	-\$ 10,509,277	\$ 27,319,149	\$ 28,955,303	\$ 30,718,057	\$ 32,618,384	\$ 34,668,259	\$ 36,880,760
Flujo de Efectivo Acumulado	-\$ 51,598,789	-\$ 19,162,311	-\$ 32,999,616	-\$ 44,486,123	-\$ 54,995,399	-\$ 27,676,250	\$ 1,279,053	\$ 31,997,110	\$ 64,615,494	\$ 99,283,753	\$ 136,164,513
Flujo de Efectivo Descontado	-\$ 51,598,789	-\$ 17,420,282	-\$ 11,435,790	-\$ 8,629,982	-\$ 7,177,977	\$ 16,963,042	\$ 16,344,514	\$ 15,763,221	\$ 15,216,717	\$ 14,702,726	\$ 14,219,129
Valor Presente Neto	-\$ 51,598,789	-\$ 17,420,282	-\$ 28,856,072	-\$ 37,486,054	-\$ 44,664,032	-\$ 27,700,989	-\$ 11,356,476	\$ 4,406,745	\$ 19,623,462	\$ 34,326,188	\$ 48,545,317
Tasa Interna de Retorno						-32.89%	-14.04%	-4.10%	2.15%	6.40%	9.45%

Tabla 17- Flujo financiero del costo beneficio de la compra de locomotoras (2/2)

VPN \$ 128,294,516 [USD]
TIR 19.06%
P. Rec. 12.00 [año]

Inversión										Escenario Teórico
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
Beneficios	\$ 52,019,178	\$ 55,707,627	\$ 59,695,428	\$ 64,009,174	\$ 68,677,926	\$ 73,733,438	\$ 79,210,414	\$ 85,146,788	\$ 91,584,024	\$ 98,567,452
Ahorro x Mantenimiento	\$ 20,067,676	\$ 22,637,823	\$ 25,468,180	\$ 28,583,973	\$ 32,012,843	\$ 35,785,076	\$ 39,933,860	\$ 44,495,555	\$ 49,509,998	\$ 55,020,835
Ahorro x Combs y Product	\$ 31,951,502	\$ 33,069,804	\$ 34,227,248	\$ 35,425,201	\$ 36,665,083	\$ 37,948,361	\$ 39,276,554	\$ 40,651,233	\$ 42,074,026	\$ 43,546,617
Valor de Rescate por Loc DC	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Inversión	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Adquisición de 23 Locomotoras										
Adquisición de 14 Locomotoras										
Adquisición de 14 Locomotoras										
Adquisición de 15 Locomotoras										
Adquisición de 15 Locomotoras										
Depreciación	\$ 9,522,477	\$ 9,522,477	\$ 9,522,477	\$ 9,522,477	\$ 9,522,477	\$ 9,522,477	\$ 9,522,477	\$ 9,522,477	\$ 9,522,477	\$ 9,522,477
	\$ 2,631,344	\$ 2,631,344	\$ 2,631,344	\$ 2,631,344	\$ 2,631,344	\$ 2,631,344	\$ 2,631,344	\$ 2,631,344	\$ 2,631,344	\$ 2,631,344
	\$ 1,625,660	\$ 1,625,660	\$ 1,625,660	\$ 1,625,660	\$ 1,625,660	\$ 1,625,660	\$ 1,625,660	\$ 1,625,660	\$ 1,625,660	\$ 1,625,660
	\$ 1,649,993	\$ 1,649,993	\$ 1,649,993	\$ 1,649,993	\$ 1,649,993	\$ 1,649,993	\$ 1,649,993	\$ 1,649,993	\$ 1,649,993	\$ 1,649,993
	\$ 1,794,311	\$ 1,794,311	\$ 1,794,311	\$ 1,794,311	\$ 1,794,311	\$ 1,794,311	\$ 1,794,311	\$ 1,794,311	\$ 1,794,311	\$ 1,794,311
	\$ 1,821,169	\$ 1,821,169	\$ 1,821,169	\$ 1,821,169	\$ 1,821,169	\$ 1,821,169	\$ 1,821,169	\$ 1,821,169	\$ 1,821,169	\$ 1,821,169
Beneficios Brutos	\$ 42,496,701	\$ 46,185,150	\$ 50,172,951	\$ 54,486,697	\$ 59,155,449	\$ 64,210,961	\$ 69,687,937	\$ 75,624,311	\$ 82,061,547	\$ 89,044,976
Impuestos	\$ 12,749,010	\$ 13,855,545	\$ 15,051,885	\$ 16,346,009	\$ 17,746,635	\$ 19,263,288	\$ 20,906,381	\$ 22,687,293	\$ 24,618,464	\$ 26,713,493
Beneficios Netos	\$ 29,747,691	\$ 32,329,605	\$ 35,121,066	\$ 38,140,688	\$ 41,408,814	\$ 44,947,672	\$ 48,781,556	\$ 52,937,018	\$ 57,443,083	\$ 62,331,483
Flujo de Efectivo	\$ 39,270,168	\$ 41,852,082	\$ 44,643,542	\$ 47,663,165	\$ 50,931,291	\$ 54,470,149	\$ 58,304,033	\$ 62,459,495	\$ 66,965,560	\$ 71,853,960
Flujo de Efectivo Acumulado	\$ 175,434,680	\$ 217,286,762	\$ 261,930,305	\$ 309,593,470	\$ 360,524,761	\$ 414,994,910	\$ 473,298,943	\$ 535,758,438	\$ 602,723,998	\$ 674,577,958
Flujo de Efectivo Descontado	\$ 13,763,954	\$ 13,335,363	\$ 12,931,644	\$ 12,551,201	\$ 12,192,546	\$ 11,854,292	\$ 11,535,142	\$ 11,233,889	\$ 10,949,404	\$ 10,680,633
Valor Presente Neto	\$ 62,309,271	\$ 75,644,634	\$ 88,576,278	\$ 101,127,479	\$ 113,320,025	\$ 125,174,317	\$ 136,709,459	\$ 147,943,348	\$ 158,892,752	\$ 169,573,386
Tasa Interna de Retorno	11.71%	13.42%	14.75%	15.81%	16.65%	17.33%	17.89%	18.35%	18.73%	19.06%

4.1.4 Conclusiones de la metodología

La metodología que se propone para calcular la flota mínima de locomotoras que se necesitan diariamente consiste en calcular diariamente las TKB a mover vs las TKB disponibles de fuerza de arrastre con las que se cuentan y sacar un balance. Con la aportación de esta metodología se generó una forma de obtener el número mínimo de locomotoras diarias por mes con base en una estacionalidad.

Se cumplió con el primer objetivo de este caso práctico que fue desarrollar un plan para calcular la flota mínima de locomotoras necesarias para mover el volumen diario requerido y con ello eliminar el uso de locomotoras extranjeras y así evitar un endeudamiento con los ferrocarriles americanos.

La importancia de este plan radica en que ya se podrá realizar un análisis a futuro de compra de máquinas AC y así eliminar por completo el uso de fuerza motriz que no sea de la empresa y de esta manera también justificar ante el consejo de administración la compra de cada una de las locomotoras adicionales que la metodología arroja. De manera adicional también este plan servirá para ir renovando la flota obsoleta y dejar de usar paulatinamente las locomotoras DC.

Esta metodología es útil para una planeación y dimensionamiento de flota. Sin embargo, la parte de asignación de máquinas a trenes no se resuelve con este plan, por lo que una vez utilizada esta metodología se recomienda usar la que se describe en la siguiente sección para dar una visión global de la planeación del cálculo de la flota de locomotoras requeridas y su asignación a los trenes.

4.2 Planeación para la asignación del número de máquinas por tramo operativo que necesitan los trenes más importantes por segmento de mercado

Como se menciona anteriormente, la siguiente metodología propuesta a continuación complementa la optimización de la planeación del uso de la fuerza motriz en una compañía ferroviaria.

Esta sección presenta las principales características del conjunto de datos y pasos para desarrollar el plan de cálculo a considerar y la justificación para la asignación de locomotoras por tramos operativos.

El siguiente diagrama de flujo (figura 20) presenta la metodología con los pasos a seguir, después se explica detalladamente cada paso y el proceso que se tiene que realizar para poder continuar al siguiente. Mediante un caso de aplicación se muestra cómo funciona la metodología y los ahorros obtenidos de su aplicación. La última sección presenta las conclusiones del uso de esta metodología.

4.2.1 Diagrama de flujo la asignación de número de máquinas por tramo operativo para los trenes más importantes por tipo

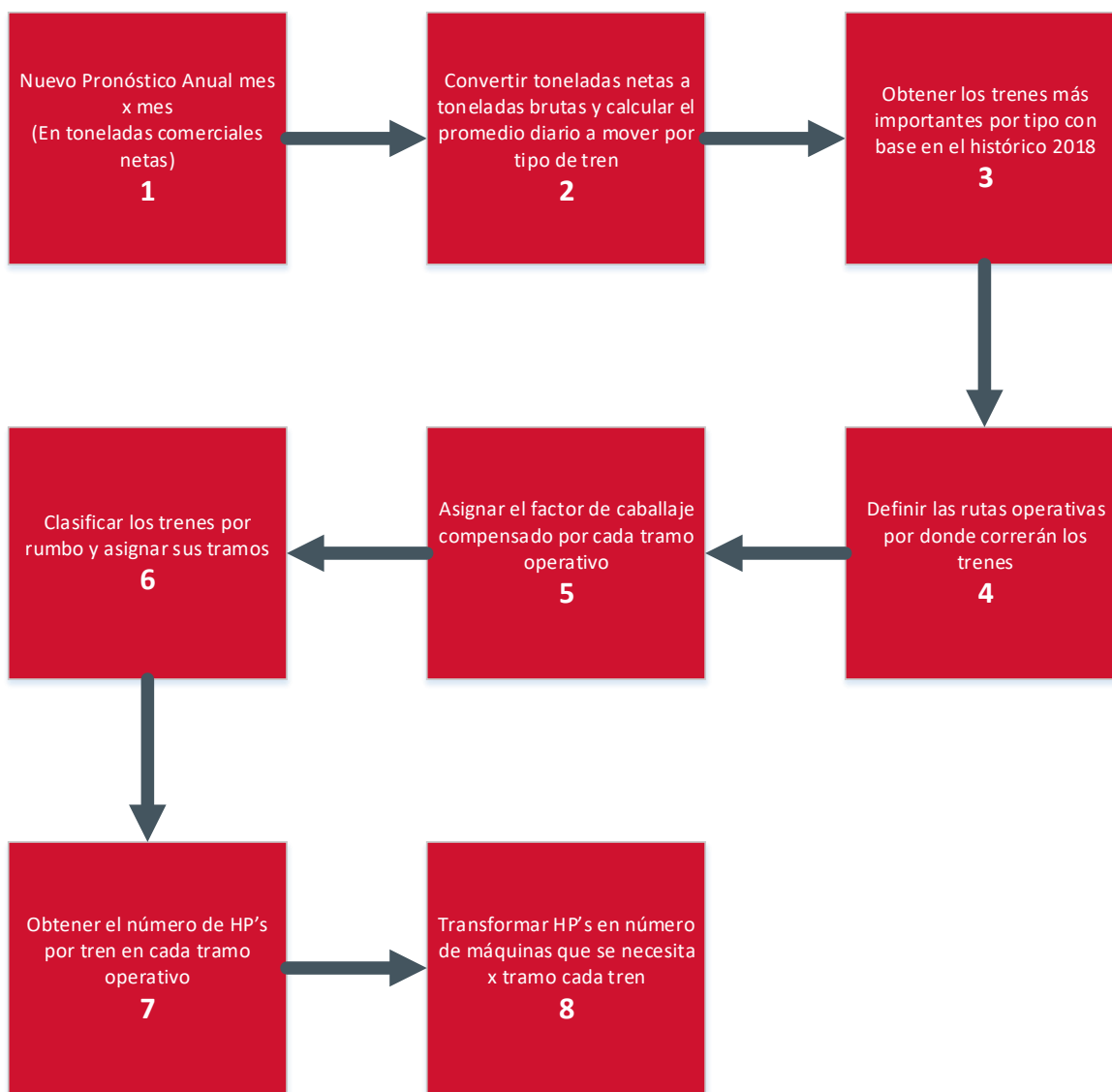


Figura 20 - Proceso general para la asignación de máquinas a los trenes por tramo operativo

1.-Nuevo pronóstico anual de demanda de carga a mover mes x mes (toneladas comerciales netas)

Se recibe el pronóstico anual de toneladas comerciales netas a mover del siguiente año por parte del área Comercial.

Obtener un pronóstico de toneladas netas a mover del próximo año, como ejemplo el 2020, y proporcionar una estacionalidad en la cual se indique mes a mes la proporción en la que se moverá el total de toneladas. Las toneladas netas es el producto que se transporta en carros de ferrocarril sin incluir el peso del carro.

2.-Aplicar factor Ton Br/Ton Net al pronóstico

Las toneladas brutas son las toneladas transportadas incluyendo el peso de carros. Debido a que este también se suma al peso que las locomotoras tienen que arrastrar es necesario incluirlo en el cálculo.

Con base en la estadística histórica del último año de las toneladas netas y brutas que se han movido se obtendrá un factor de relación, el cual nos permitirá transformar el pronóstico.

3.-Promedio de toneladas brutas diarias a mover por mes

Para obtener el promedio diario de toneladas brutas a mover por tipo de tren primero será necesario obtener una proporción del total de toneladas. Como en los casos anteriores, estará basada en la estadística histórica del último año y servirá para proyectar el siguiente.

Para conseguir el promedio diario de toneladas brutas que se tienen como demanda y calcular el número de locomotoras que se necesitan para moverse se dividirán éstas entre el número de días del mes y así obtener la demanda diaria por tipo de tren.

4.-Obtener los trenes más importantes por tipo con base en el histórico del último año

Derivado del conocimiento y experiencia del área de transportes, que es la que está a cargo de la operación y la programación de los trenes para el día a día, para obtener los trenes más importantes se tomará del último año los trenes que en conjunto movieron más del 80% de las toneladas brutas. El 20% restante se descarta de la planeación de este caso, ya que como se consideran trenes emergentes, extras o que se necesitan en el momento es preferible no contemplarlos.

5.-Definir las rutas operativas por donde correrán los trenes

El definir las principales rutas operativas de la red ferroviaria de los principales trenes nos ayudará a conocer los tramos y patios con más demanda y también servirá para poder asignar correctamente la ruta del tren en caso de que el patio ferroviario cuenta con diferentes rumbos.

6.-Asignar el factor de caballaje compensado por cada tramo operativo

El factor de caballaje compensado nos permitirá conocer las toneladas de arrastre que podrá mover una máquina en la pendiente gobernadora a una velocidad mínima de entre 23 y 25 km/h, o también saber cuántos caballos de fuerza necesitamos para pasar x toneladas a cierta velocidad por dicha pendiente y así podremos conseguir una menor ocupación de tiempo la vía o los tramos limitadores.

Con base en lo anterior, se asignará el factor más crítico de la pendiente gobernadora del tramo operativo para conocer los caballos de fuerza requeridos para mover el tren por dicho tramo, ya que la pendiente más fuerte será la que nos limite.

7.-Clasificar los trenes por rumbo y asignar sus tramos

La clasificación de los trenes por rumbo es de gran relevancia debido a que se podrá ubicar el punto de inicio, fin y tramos operativos intermedios por los que pasa y a su vez asignar el factor de caballaje compensado correcto, ya que se debe de tener en cuenta que la pendiente gobernadora no será la misma hacia el norte que hacia el sur.

Una vez definidos los rumbos de cada uno de los trenes de camino, se procederá a asignar los tramos operativos por los que pasarán dentro de cada una de las rutas operativas de la red de Ferromex.

8.-Obtener el número de HP's por tren en cada tramo operativo

Para conocer el número de HP's mínimos que se necesitan para remolcar cada tren por los tramos que cruzará la pendiente gobernadora, se obtiene multiplicando las toneladas brutas promedio de cada tren por el factor que aparece en las tablas de caballaje compensado según el rumbo que corresponda.

9.-Transformar HP's en número de máquinas que se necesitan x tramo en cada tren

Con el objetivo de desperdiciar lo menos que se pueda de fuera, una vez que se tengan los HP mínimos para mover cada tren por sus tramos operativos, se procederá a sacar el número de locomotoras necesarias por tren y por tramo, sólo usando dos tipos de máquinas:

- AC – 4,400 HP's
- DC – 3,000 HP's

Se le dará prioridad a la flota AC para mover los trenes y se realizarán las mejores combinaciones posibles con el objetivo de optimizar la fuerza y desperdiciar lo menos posible HP's.

4.2.2 Caso práctico de aplicación en una compañía ferroviaria

Lo que se realiza en esta sección es un caso práctico de aplicación en una compañía ferroviaria donde se puede observar la ventaja de utilizar el plan para la asignación de número de máquinas por tramo operativo para los trenes más importantes por tipo y mediante los resultados sustentar la validez del plan.

Dentro de una compañía ferroviaria, la gerencia de Planeación ha sido encargada de analizar la situación actual del indicador HPton, con el objetivo de optimizarlo y, en un futuro, tener ahorros potenciales por reducción de uso fuerza y a su vez entregar año con año una programación estimada de los trenes que correrán diariamente con el número de máquinas y tonelaje promedio que moverán.

4.2.2.1.-Nuevo pronóstico anual de mes x mes (toneladas comerciales netas)

El área Comercial proporciona el pronóstico de ventas por segmento de mercado (tabla 18) del próximo año y su estacionalidad mes por mes.

Tabla 18- Pronóstico anual 2019 de toneladas comerciales netas

Toneladas (Miles)	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Total del Año
Segmento A	1,254.1	1,204.2	1,642.0	1,629.5	2,328.3	2,026.4	2,240.9	1,895.4	1,935.8	2,195.5	1,556.5	1,547.0	21,455.8
Segmento B	723.6	790.3	816.3	787.7	792.8	846.1	857.2	845.7	807.9	815.0	826.9	743.0	9,652.7
Segmento C	682.7	728.8	696.9	576.7	707.4	722.2	726.9	690.9	701.6	690.2	706.6	705.5	8,336.3
Segmento D	199.3	203.5	241.1	225.3	216.9	237.3	200.0	219.6	241.4	210.2	220.0	219.2	2,633.7
Segmento E	500.5	396.1	398.7	436.1	418.4	413.0	403.2	423.2	546.1	593.2	592.7	564.9	5,686.1
Segmento F	463.1	520.9	520.9	520.9	578.8	578.8	636.7	694.6	636.7	636.7	636.7	520.9	6,945.9
Segmento G	341.6	336.4	351.8	319.9	369.6	374.1	372.6	370.3	360.1	356.2	356.2	356.5	4,265.1
Segmento H	479.0	492.1	512.7	496.3	539.9	521.8	492.5	497.7	497.9	498.0	497.9	459.9	5,985.8
Segmento I	395.0	382.8	388.5	387.0	413.8	414.3	428.4	465.9	497.2	430.5	419.5	377.6	5,000.6
Total Toneladas	5,038.9	5,055.2	5,569.1	5,379.3	6,365.9	6,134.1	6,358.2	6,103.2	6,224.9	6,425.5	5,813.1	5,494.5	69,962.0
	7.20%	7.23%	7.96%	7.69%	9.10%	8.77%	9.09%	8.72%	8.90%	9.18%	8.31%	7.85%	100%

4.2.2.2.-Aplicar factor Ton Br/Ton Net al pronóstico

Con el análisis de movimientos históricos de toneladas netas y brutas del último año se obtiene un factor de **1.85**, que sirve para obtener las toneladas brutas del siguiente año, ya que el pronóstico proporcionado viene en toneladas netas (ver figura 21).

Ton Operativas Netas	237,430.1
Ton Operativas Brutas	438,256.5
Factor	1.846

Figura 21 - Factor de conversión toneladas brutas entre netas operativas

Se aplica el factor para obtener las toneladas brutas mes por mes (tabla 19).

Tabla 19- Proyección de toneladas brutas para el siguiente año

Toneladas (Miles)	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Total del Año
Total Toneladas	5,038.9	5,055.2	5,569.1	5,379.3	6,365.9	6,134.1	6,358.2	6,103.2	6,224.9	6,425.5	5,813.1	5,494.5	69,962.0
Ton Brutas	9,574.0	9,604.9	10,581.3	10,220.8	12,095.2	11,654.9	12,080.6	11,596.1	11,827.3	12,208.4	11,044.9	10,439.5	132,927.9

4.2.2.3.-Promedio de toneladas brutas diarias a mover por mes

Para proyectar las toneladas a mover brutas por tipo de tren del siguiente año se basa en la proporción que se movió durante el último año (tabla 20).

Tabla 20 - Proporción de toneladas por tipo de tren del último año y proyección

Toneladas Brutas	% último año	Proyección
Tren Tipo A	6.98%	9,283.6
Tren Tipo B	17.38%	23,109.1
Tren Tipo C	7.98%	10,613.5
Tren Tipo D	2.87%	3,816.6
Tren Tipo E	26.02%	34,594.1
Tren Tipo F	20.68%	27,482.9
Tren Tipo G	12.37%	16,445.6
Tren Tipo H	5.70%	7,582.6
Total general	100.00%	132,927.9

Se aplica la proporción del tonelaje total que se tiene que mover por tipo de tren durante cada mes del año a proyectar (tabla 21).

Tabla 21 - Toneladas brutas a mover por tipo de tren mes x mes

Toneladas Brutas	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Total
Tren Tipo A	668.6	670.8	739.0	713.8	844.7	814.0	843.7	809.9	826.0	852.6	771.4	729.1	9,283.6
Tren Tipo B	1,664.4	1,669.8	1,839.5	1,776.8	2,102.7	2,026.2	2,100.2	2,015.9	2,056.1	2,122.4	1,920.1	1,814.9	23,109.1
Tren Tipo C	764.4	766.9	844.9	816.1	965.7	930.6	964.6	925.9	944.3	974.8	881.9	833.5	10,613.5
Tren Tipo D	274.9	275.8	303.8	293.5	347.3	334.6	346.9	332.9	339.6	350.5	317.1	299.7	3,816.6
Tren Tipo E	2,491.6	2,499.6	2,753.8	2,659.9	3,147.7	3,033.1	3,143.9	3,017.9	3,078.0	3,177.2	2,874.4	2,716.8	34,594.1
Tren Tipo F	1,979.4	1,985.8	2,187.7	2,113.1	2,500.7	2,409.7	2,497.7	2,397.5	2,445.3	2,524.1	2,283.5	2,158.4	27,482.9
Tren Tipo G	1,184.5	1,188.3	1,309.1	1,264.5	1,496.4	1,441.9	1,494.6	1,434.6	1,463.3	1,510.4	1,366.5	1,291.6	16,445.6
Tren Tipo H	546.1	547.9	603.6	583.0	689.9	664.8	689.1	661.5	674.7	696.4	630.0	595.5	7,582.6
Total general	9,574.0	9,604.9	10,581.3	10,220.8	12,095.2	11,654.9	12,080.6	11,596.1	11,827.3	12,208.4	11,044.9	10,439.5	132,927.9

Se dividen las toneladas brutas de cada tipo de tren y en cada mes entre el número de días cada uno de los meses y así se conoce el promedio diario de que se requiere arrastrar por tipo (tabla 22).

Tabla 22 - Promedio diario por de toneladas brutas por tipo de tren

Toneladas Brutas	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Total
Tren Tipo A	21,569.1	23,957.2	23,838.5	23,793.8	27,249.1	27,132.4	27,216.4	26,124.8	27,533.9	27,504.1	25,712.4	23,519.1	305,150.7
Tren Tipo B	53,690.6	59,635.0	59,339.6	59,228.2	67,829.4	67,538.8	67,747.8	65,030.6	68,538.2	68,464.1	64,004.0	58,544.4	759,590.7
Tren Tipo C	24,658.8	27,389.0	27,253.3	27,202.1	31,152.5	31,019.0	31,115.0	29,867.0	31,478.0	31,444.0	29,395.5	26,888.1	348,862.2
Tren Tipo D	8,867.3	9,849.0	9,800.2	9,781.8	11,202.4	11,154.4	11,188.9	10,740.1	11,319.4	11,307.2	10,570.6	9,668.9	125,450.4
Tren Tipo E	80,374.2	89,272.9	88,830.7	88,663.9	101,539.9	101,104.9	101,417.7	97,350.1	102,600.9	102,490.0	95,813.3	87,640.3	1,137,098.9
Tren Tipo F	63,852.5	70,922.0	70,570.6	70,438.2	80,667.4	80,321.7	80,570.3	77,338.8	81,510.3	81,422.2	76,117.9	69,625.0	903,356.9
Tren Tipo G	38,208.8	42,439.1	42,228.9	42,149.6	48,270.7	48,063.9	48,212.6	46,278.9	48,775.1	48,722.4	45,548.4	41,663.0	540,561.4
Tren Tipo H	17,617.0	19,567.5	19,470.6	19,434.0	22,256.3	22,160.9	22,229.5	21,337.9	22,488.8	22,464.5	21,001.1	19,209.6	249,237.6
Total general	308,838.4	343,031.7	341,332.4	340,691.7	390,167.7	388,496.0	389,698.2	374,068.3	394,244.6	393,818.5	368,163.2	336,758.4	4,369,308.9

4.2.2.4.-Obtener los trenes más importantes por tipo con base en el histórico 2018

Para cada tipo de tren será necesario conocer cuáles fueron los trenes más importantes por ruta para proyectarlos. Los principales trenes deben de considerar al menos el 80% del total del flete; el restante se deduce que pueden ser trenes emergentes o especiales que no correrán diariamente.

En la tabla 23 se muestra un ejemplo del tipo de tren A y las rutas que conformarían el 81.69% que se refiere a la sumatoria de dichas rutas. El 18.31% restante se descarta por ser trenes emergentes.

Tabla 23 - Trenes tipo A más importantes

Tipo	Tren	Origen	Destino	Tons Brutas último año	%	Proyección (Ton Brt Diario)
A	AJZIR	Ciudad Juárez	Irapuato	4,368,966	16.89%	15,742
A	ATOJZ	Torreón	Ciudad Juárez	3,651,735	14.11%	13,158
A	AROTO	San Francisco de los Romo	Torreón	3,258,790	12.60%	11,742
A	AFRPN	Ciudad Frontera	Piedras Negras	2,264,501	8.75%	8,159
A	AJZRO	Ciudad Juárez	San Francisco de los Romo	1,869,849	7.23%	6,737
A	APNIR	Piedras Negras	Irapuato	1,026,901	3.97%	3,700
A	APNFR	Piedras Negras	Ciudad Frontera	1,020,293	3.94%	3,676
A	AJZFR	Ciudad Juárez	Ciudad Frontera	855,517	3.31%	3,083
A	AMARO	Mazatlán	San Francisco de los Romo	832,003	3.22%	2,998
A	APNRO	Piedras Negras	San Francisco de los Romo	811,328	3.14%	2,923
A	AROPN	San Francisco de los Romo	Piedras Negras	609,874	2.36%	2,197
A	AEMNG	Empalme	Nogales	566,442	2.19%	2,041
A	Otros			4,736,604	18.31%	17,066
Total Trenes				25,872,803	100.00%	93,222

Después del estudiar todos los tipos de trenes se obtuvieron un total de **112** (tabla 24) que se pretende corran diariamente y sobre los cuales la metodología se enfocará en optimizarlos.

Tabla 24 - # de trenes por tipo a proyectar

Tipo	Tren
B	33
C	26
E	22
A	12
F	8
G	7
H	2
D	2
Total	112

4.2.2.5.-Definir las rutas operativas por donde correrán los trenes

Como se mencionó en la metodología, definir las principales rutas operativas nos ayudará a conocer los tramos y patios con más demanda y asignar correctamente la ruta del tren en caso de que el patio ferroviario cuenta con diferentes rumbos, tal es el caso del patio de Guadalajara, Irapuato, Torreón, Paredón, Sufragio y Empalme (ver tabla 25).

Tabla 25- Rutas operativas de la red de Ferromex

Ruta
Ciudad Juárez - Valles de México
Piedras Negras - Torreón
Torreón - Altamira
Nogales - Esqueda
Mexicali - Empalme
Nogales - Guadalajara
Guadalajara - Irapuato
Guadalajara - Manzanillo

A continuación, se presenta gráficamente todos los patios o puntos de intercambio operativo de máquinas de la red ferroviaria donde se podrán agregar o quitar locomotoras para optimizar el uso de esta en los trenes (figura 22).

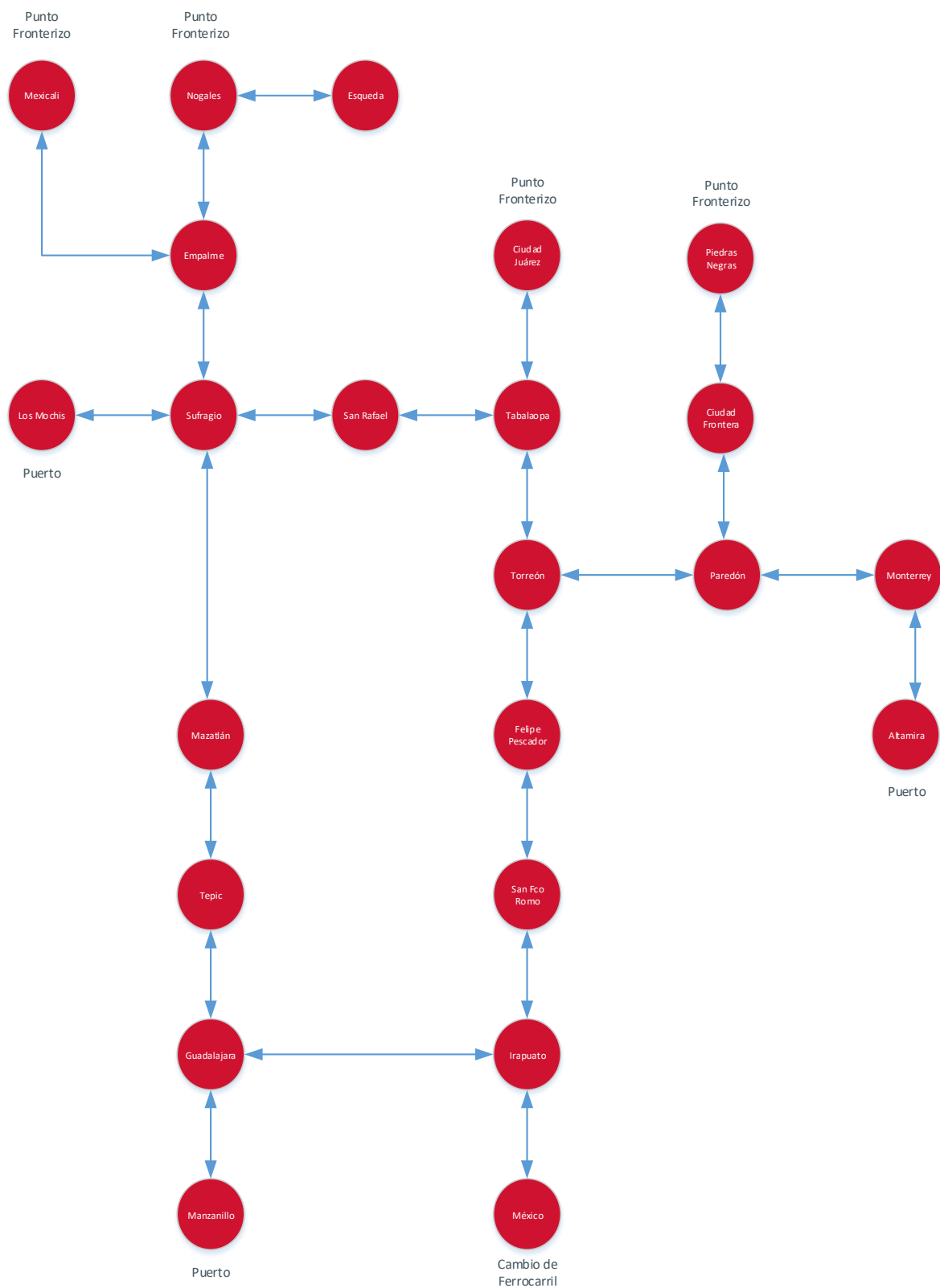


Figura 22 - Patios operativos o de intercambio de máquinas en la red de Ferromex

4.2.2.6.-Asignar el factor de caballaje compensado por cada tramo operativo

Con base en el análisis del horario oficial de la compañía y garantizando una velocidad mínima promedio de entre 23 y 25 km/h en la pendiente gobernadora, se asigna el factor de caballaje compensado (HPTon), correspondiente por rumbo norte o sur en cada tramo (ver tabla 26).

Tabla 26 – Factores de caballaje compensado en la ruta Ciudad Juárez – Valle de México

Rumbo	Tipo	Ciudad Juárez - Valle de México						
		Ciudad Juárez	Chihuahua	Torreón	Felipe Pescador	San Fco de los Romo	Irapuato	Valle de México
S	DC	1.07	1.01	1.24	2.22	1.81	1.50	
	AC	0.75	0.69	1.08	1.63	1.18	1.18	
N	DC		1.00	1.00	0.63	1.92	1.85	2.60
	AC		0.80	0.80	0.59	1.63	1.34	1.63

4.2.2.7.-Clasificar los trenes por rumbo y asignar sus tramos

Para poder asignar el factor de caballaje (HPTon) correcto de cada tren en cada uno de sus tramos, es necesario identificar el rumbo hacia el que se dirige (tabla 27).

Tabla 27 - Clasificación de trenes tipo A por rumbo N y S

Tipo	Tren	Origen	Destino	Rumbo
A	AJZIR	Ciudad Juárez	Irapuato	S
A	ATOJZ	Torreón	Ciudad Juárez	N
A	AROTO	San Francisco de los Romo	Torreón	N
A	AFRPN	Ciudad Frontera	Piedras Negras	N
A	AJZRO	Ciudad Juárez	San Francisco de los Romo	S
A	APNIR	Piedras Negras	Irapuato	S
A	APNFR	Piedras Negras	Ciudad Frontera	S
A	AJZFR	Ciudad Juárez	Ciudad Frontera	S
A	AMARO	Mazatlán	San Francisco de los Romo	S
A	APNRO	Piedras Negras	San Francisco de los Romo	S
A	AROPN	San Francisco de los Romo	Piedras Negras	N
A	AEMNG	Empalme	Nogales	N
A	Otros			

Total Trenes

En la tabla 28 se observan los tramos en los que correrán cada uno de los trenes y su rumbo, por ejemplo, en la primera línea tenemos el tren tipo A que va de Ciudad Juárez a Irapuato, este tren va con rumbo sur y pasará por los patios de intercambio de máquinas en Chihuahua, Torreón, Felipe Pescador, San Francisco de los Romo y terminando en Irapuato.

Tabla 28 – Asignación de tramos operativos para los trenes automotrices

	Ciudad Juárez - Valle de México						Piedras Negras - Torreón					Corredor Nogales - Guadalajara						Guadalajara - Irapuato	
	Ciudad Juárez	Chihuahua	Torreón	Felipe Pescador	San Fco de los Romo	Irapuato	Valle de México	Piedras Negras	Ciudad Frontera	Paredón	Torreón	Nogales	Empalme	Sufragio	Mazatlán	Tepic	Guadalajara	Guadalajara	Irapuato
AJZIR	S Inicio	S	S	S	S	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
ATOJZ	NA	N	N Inicio	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
AROTO	NA	NA	NA	N	N Inicio	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
AFRPN	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	N Inicio	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
AJZRO	S Inicio	S	S	S	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
APNIR	NA	NA	S	S	S	NA	NA	S Inicio	S	S	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
APNFR	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	S Inicio	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
AJZFR	S Inicio	S	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	N	N	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
AMARO	NA	NA	NA	NA	NA	N	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	S Inicio	S	NA	S	NA
APNRO	NA	NA	S	S	NA	NA	NA	S Inicio	S	S	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
AROPN	NA	NA	NA	N	N Inicio	NA	NA	NA	N	N	N	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
AEMNG	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	N Inicio	NA	NA	NA	NA	NA	NA

4.2.2.8.-Obtener el número de HP's por tren en cada tramo operativo

Con el factor de caballaje identificado para cada tren y en cada uno de sus tramos con el rumbo correcto y las toneladas promedio diario que se pretende arrastrar, es posible conocer los HP que se necesitan para operar a la velocidad mínima garantizada en cada sección del recorrido.

Factor de caballaje compensado en el tramo Ciudad Juárez – Chihuahua para máquinas AC: 0.75

Tonelaje bruto de un tren: 15,742 toneladas

$0.75 * 15,742 = 11,805.50$ HP's para el tramo operativo

En la tabla 29 se pueden observar los HP requeridos por tramo para cada uno de los trenes tipo A.

Tabla 29 – HP's necesarios por tren para cada tramo operativo 1/2

Rumbo	Tipo	Ciudad Juárez - Valle de México							Piedras Negras - Torreón			
		DC	AC	DC	AC	DC	AC	DC	DC	AC	DC	AC
S	DC	1.07	1.01	1.24	2.22	1.81	1.50		1.24	1.30	1.30	
	AC	0.75	0.69	1.08	1.63	1.18	1.18		1.18	1.19	1.19	
N	DC		1.00	1.00	0.63	1.92	1.85	2.60		1.24	1.30	0.45
	AC		0.80	0.80	0.59	1.63	1.34	1.63		1.14	1.10	0.47
AJZIR		3,487.10	3,208.13	5,021.42	7,578.62	5,486.36	-	-	-	-	-	-
ATOJZ		-	3,108.95	3,108.95	-	-	-	-	-	-	-	-
AROTO		-	-	-	2,046.13	5,652.86	-	-	-	-	-	-
AFRPN		-	-	-	-	-	-	-	-	2,747.27	-	-
AJZRO		1,492.42	1,373.03	2,149.09	3,243.53	-	-	-	-	-	-	-
APNIR		-	-	1,180.26	1,781.31	1,289.54	-	-	1,289.54	1,300.47	1,300.47	-
APNFR		-	-	-	-	-	-	-	1,281.24	-	-	-
AJZFR		682.83	628.21	-	-	-	-	-	-	-	1,001.49	427.91
AMARO		-	-	-	-	-	1,186.46	-	-	-	-	-
APNRO		-	-	932.49	1,407.37	-	-	-	1,018.83	1,027.47	1,027.47	-
AROPN		-	-	-	382.93	1,057.92	-	-	-	739.89	713.93	305.04
AEMNG		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

4.2.2.9.-Transformar HP's en número de máquinas que se necesitan x tramo en cada tren

Factor de caballaje compensado en el tramo Ciudad Juárez – Chihuahua para máquinas AC: 0.75

Tonelaje bruto del tren: 15,742 toneladas

$0.75 * 15,742 = 11,805.50$ HP's para el tramo operativo

$11,805.50 / 4,400 = 2.68$ Máquinas AC

$0.68 * 4,400 = 3,000$ HP's

$3,000 / 3,000 = 1$ Máquina DC

Total de máquinas para un tren de xx toneladas en el tramo Ciudad Juárez – Chihuahua = **2 máquinas AC y 1 Máquina DC (8,800 HP's AC y 3,000 HP's DC)**

4.2.2.10.-Resultados de la metodología

En este apartado se muestran las ventajas de utilizar esta metodología para la planeación de trenes y los ahorros que se pueden obtener al optimizar la fuerza motriz de la compañía y así mover el mismo volumen con menos máquinas

La siguiente figura (figura 23) muestra el número de locomotoras requeridas para un tren en cada tramo actualmente:

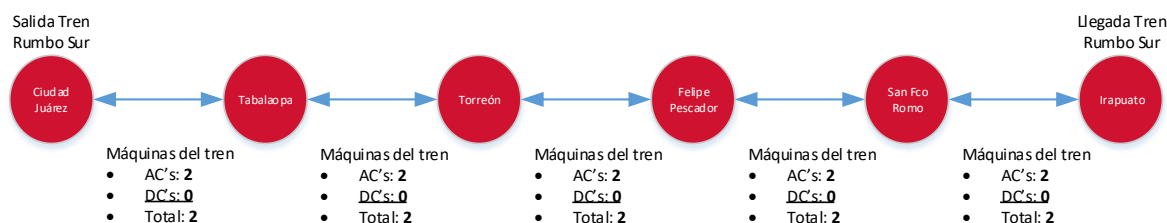


Figura 23 - Locomotoras requeridas por tramo de un tren (actualmente)

A continuación en la figura 24, se anexa una propuesta de requerimiento de máquinas por tramo para el mismo tren, usando la metodología desarrollada en este documento.

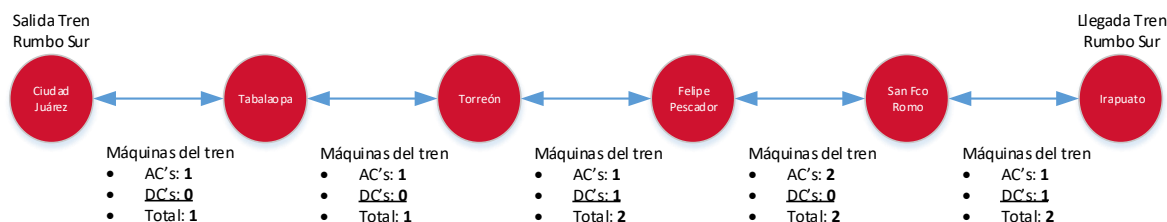


Figura 24 - Locomotoras requeridas por tramo de un tren (propuesta)

Como se puede apreciar en la figura 25, la propuesta muestra un ahorro de una máquina en los primeros dos tramos, ya que en la actualidad, como se mencionó anteriormente, los trenes suelen llegar a destino con el mismo número de máquinas que salieron y la propuesta pretende dar una solución a esta práctica y a su vez optimizar la fuerza motriz de camino.

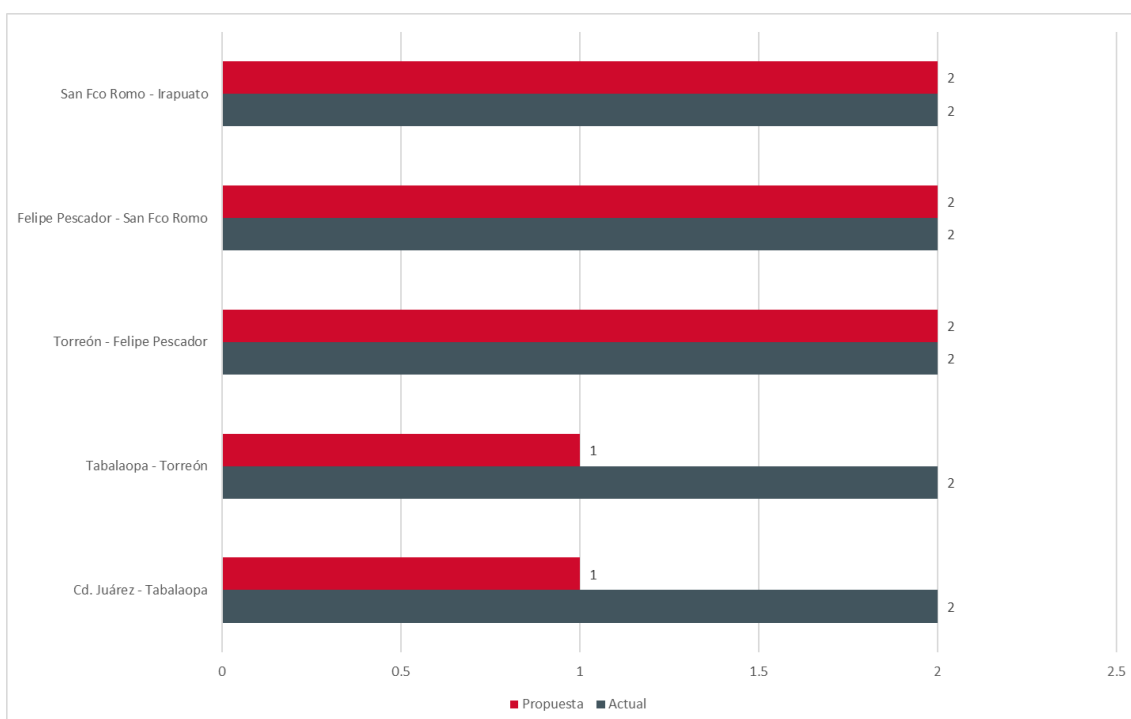


Figura 25 - Comparativo de # de máquinas por tramo de un tren

Este es un ejemplo de los 112 tipos de trenes que se analizarán para optimizar y proponer una planeación de cada mes, conforme al volumen promedio de demanda requerido.

Los resultados de las siguientes gráficas (figuras 26, 27 y 28) representan el número de locomotoras diarias que se necesitarían para cada uno de los 112 tipos de trenes en el mes de mayor demanda del pronóstico por cada tramo.

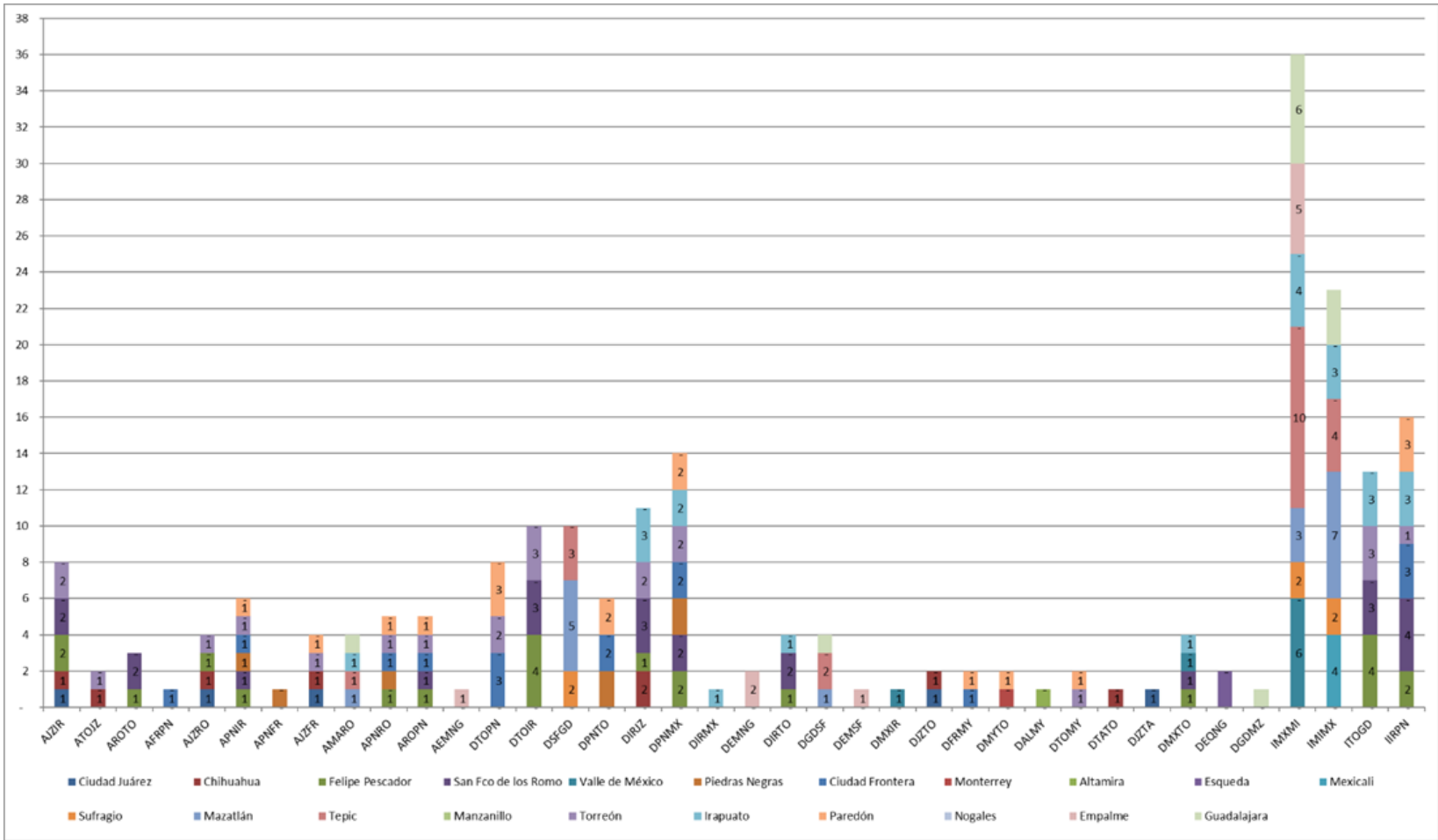


Figura 26 - Máquinas x tren x tramo operativo 1/3

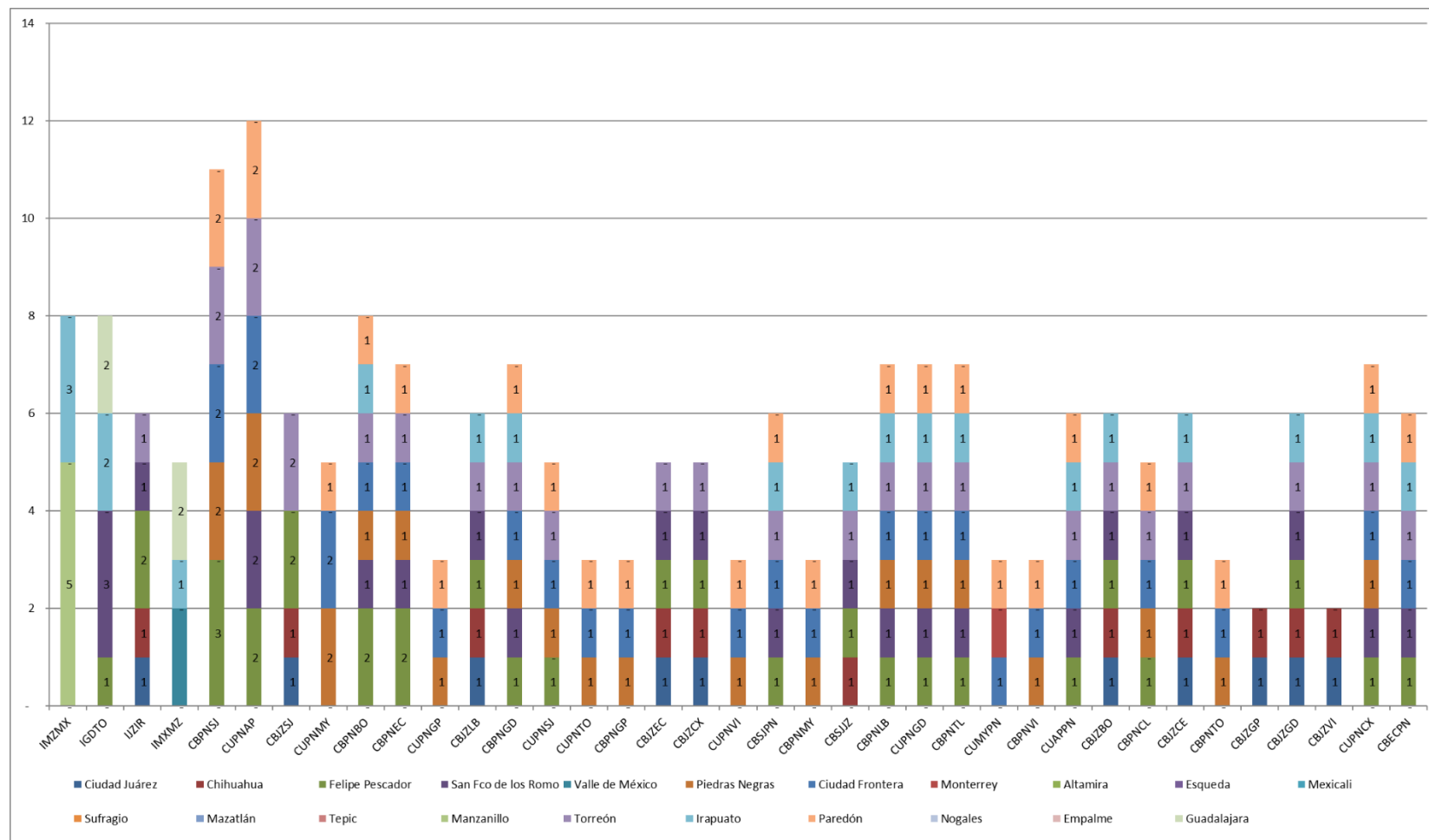


Figura 27 - Máquinas x tren x tramo operativo 2/3

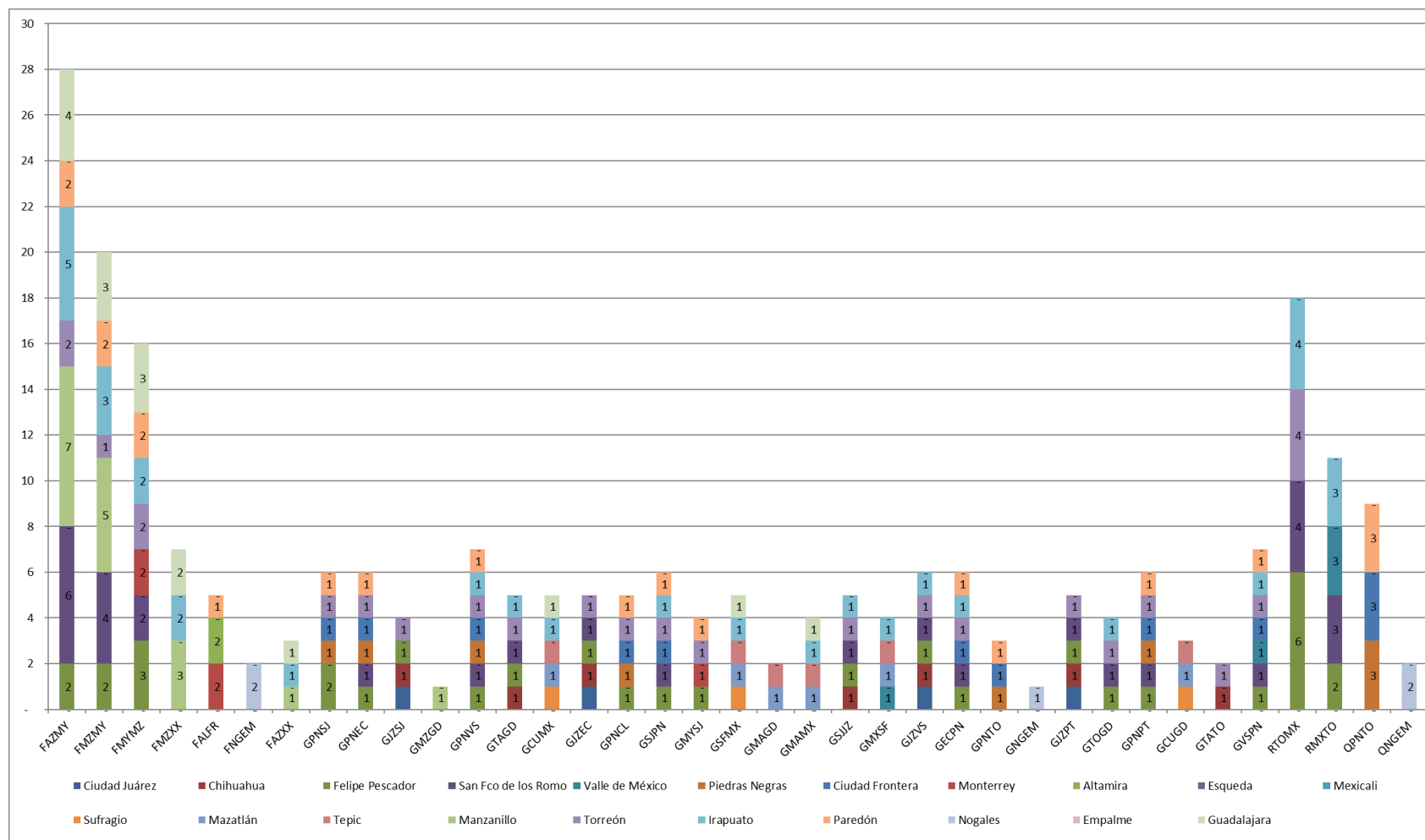


Figura 28 - Máquinas x tren x tramo operativo 3/3

Con el análisis de estos trenes, el usuario será capaz de dimensionar la flota de fuerza motriz diaria que requerirá en promedio por cada patio para los principales trenes de camino, como se muestra en la figura 29.

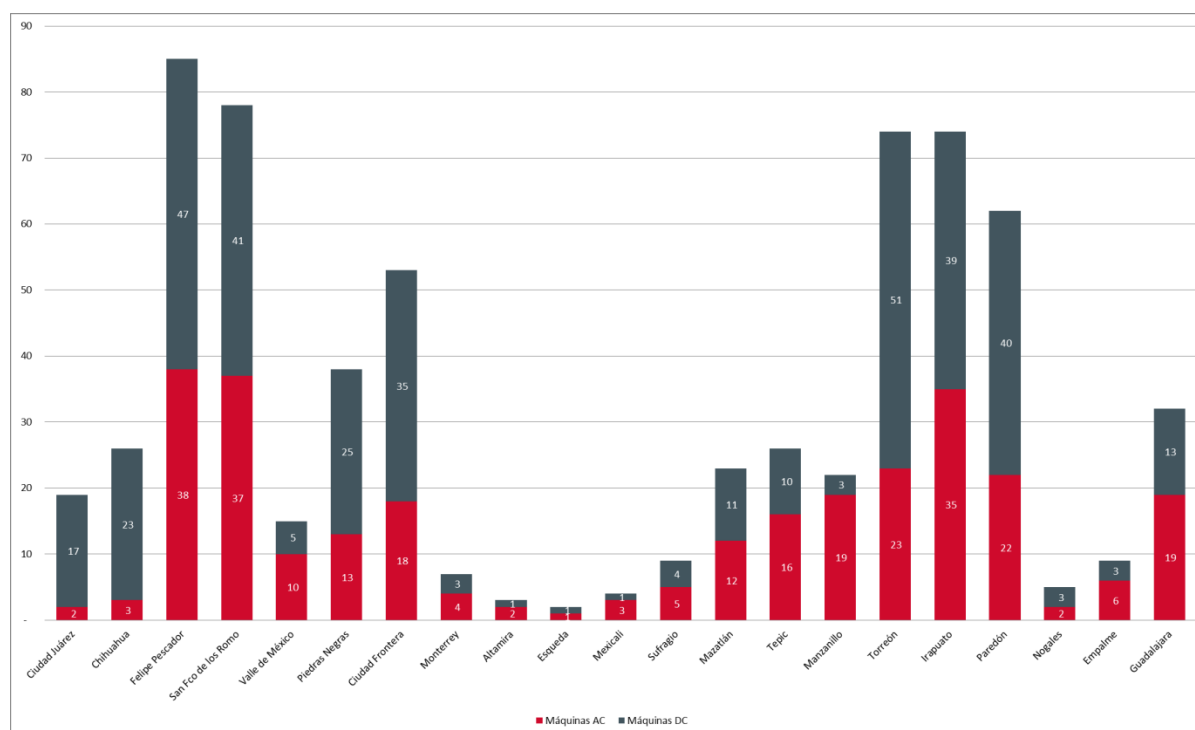


Figura 29 - Máquinas AC y DC promedio diario que se necesitan por patio

4.2.3 Ahorros por el uso de la metodología desarrollada

El uso de la metodología para optimizar el HPTon impactará en el uso de la flota total de locomotoras de camino, lo cual permitirá mover el mismo tonelaje con menos máquinas y a su vez generará un ahorro importante en el consumo de combustible.

Como se observa en la tabla 30, implementando la metodología propuesta, se puede llegar a utilizar hasta un **25% menos de fuerza** para mover las mismas toneladas que se movieron en un mes pico; esto también nos llevaría a obtener un ahorro importante en consumo de combustible por cada locomotora que se quite de cada tren según el análisis. Del análisis del mes pico se observa que se usaron 4,543 locomotoras para mover el total de las toneladas por distrito. Con la flota resultante que propone la metodología arroja que se requerirán solamente 3,387 máquinas.

Tabla 30 - Reducción de uso de fuerza motriz mediante el uso de la metodología propuesta

Tramo	De	A	Rumbo	Ton Br Tot	%	Ton Br Rum	Actual			Propuesta			Var
							Ton Br	HPTon	# Máq	Ton Br	HPTon	# Máq	
01	Mexicali	Empalme	N	149,960	42.62%	63,911	2,866	1.54	22	3,259	1.35	20	- 3
			S		57.38%	86,049	1,930	2.28	45	3,385	1.30	25	- 19
02	Torreón	Chihuahua	N	506,997	33.94%	172,075	1,780	2.47	97	5,500	0.80	31	- 65
			S		66.06%	334,922	4,691	0.94	71	6,377	0.69	53	- 19
03	Felipe Pescador	Torreón	N	1,095,704	39.02%	427,544	2,190	2.01	195	7,458	0.59	57	- 138
			S		60.98%	668,160	3,313	1.33	202	4,074	1.08	164	- 38
04	Empalme	Sufragio	N	318,512	39.14%	124,666	2,143	2.05	58	8,000	0.55	16	- 43
			S		60.86%	193,847	5,043	0.87	38	7,719	0.57	25	- 13
05	Irapuato	Guadalajara	N	771,053	44.17%	340,574	2,275	1.93	150	4,731	0.93	72	- 78
			S		55.83%	430,479	2,987	1.47	144	4,151	1.06	104	- 40
06	Irapuato	San Francisco de los Romo	N	928,195	44.23%	410,541	2,345	1.88	175	3,284	1.34	125	- 50
			S		55.77%	517,655	2,927	1.50	177	3,729	1.18	139	- 38
07	Altamira	Monterrey	N	349,831	71.25%	249,255	2,784	1.58	90	2,876	1.53	87	- 3
			S		28.75%	100,576	1,662	2.65	61	3,034	1.45	33	- 27
08	Tepic	Mazatlán	N	219,067	37.52%	82,194	1,934	2.28	43	1,699	2.59	48	6
			S		62.48%	136,873	3,420	1.29	40	1,699	2.59	81	41
09	Chihuahua	Ciudad Juárez	N	525,651	30.38%	159,693	1,683	2.61	95	5,500	0.80	29	- 66
			S		69.62%	365,958	5,439	0.81	67	5,867	0.75	62	- 5
10	Nogales	Esqueda	N	85,414	61.01%	52,109	1,511	2.91	34	1,100	4.00	47	13
			S		38.99%	33,306	847	5.19	39	1,189	3.70	28	- 11
11	Nogales	Empalme	N	461,424	40.11%	185,077	2,112	2.08	88	2,000	2.20	93	5
			S		59.89%	276,347	3,042	1.45	91	2,000	2.20	138	47
12	Monterrey	Torreón	N	1,089,887	56.58%	616,658	3,377	1.30	183	3,188	1.38	193	11
			S		43.42%	473,229	2,730	1.61	173	6,984	0.63	68	- 106
13	Guadalajara	Manzanillo	N	787,141	75.02%	590,513	2,125	2.07	278	2,573	1.71	229	- 48
			S		24.98%	196,628	1,338	3.29	147	1,973	2.23	100	- 47
14	Mazatlán	Sufragio	N	255,687	36.94%	94,451	2,147	2.05	44	6,286	0.70	15	- 29
			S		63.06%	161,236	3,417	1.29	47	6,286	0.70	26	- 22
15	Guadalajara	Tepic	N	244,473	36.94%	90,308	2,147	2.05	42	3,056	1.44	30	- 13
			S		63.06%	154,165	3,417	1.29	45	2,839	1.55	54	9
16	Valle de México	Irapuato	N	1,030,368	31.52%	324,772	1,711	2.57	190	2,699	1.63	120	- 70
			S		68.48%	705,596	3,206	1.37	220	3,729	1.18	189	- 31
17	San Francisco de los Romo	Felipe Pescador	N	1,049,150	31.52%	330,692	1,711	2.57	193	2,699	1.63	123	- 71
			S		68.48%	718,458	3,206	1.37	224	2,699	1.63	266	42
18	Paredón	Piedras Negras	N	1,866,735	36.83%	687,519	1,689	2.61	407	3,860	1.14	178	- 229
			S		63.17%	1,179,216	3,601	1.22	327	3,697	1.19	319	- 9
							4,543			3,387			

- 1,156	Ahorro Total Mensual
- 39	Ahorro x Día
-25%	% de Reducción

La siguiente gráfica (Figura 30) nos muestra un comparativo por tramo del consumo de combustible de la situación actual y la propuesta. Como se observa en la mayoría de los distritos, se obtiene un importante ahorro, que va desde un 4% hasta un 58% de reducción de litros que se necesitarían para mover la demanda de toneladas en cada tramo. Se observa que con la situación actual se gastarían aproximadamente 5.5 millones de litros de diésel y la propuesta arroja un consumo de 4.1 millones de litros; se obtiene una reducción de 1.4 millones en un mes, lo que representaría un 26% menos de consumo en toda la red. Durante el año que se analizó el tráfico, este sería el ahorro máximo que se obtendría con la metodología desarrollada en este documento.

Derivado de que se conoce la situación actual de la empresa ferroviaria que se está analizando y que el principal problema es el desperdicio de fuerza, se puede observar y deducir que los tramos donde se obtendrá el mayor ahorro en gasto de combustible serán donde se encuentren las

pendientes más fuertes, ya que son los tramos donde se pretende optimizar la fuerza tractiva y llevar menos máquinas para la misma carga o poner más carga en el tren para que se utilice toda la fuerza de cada locomotora y no existan desperdicios de fuerza.

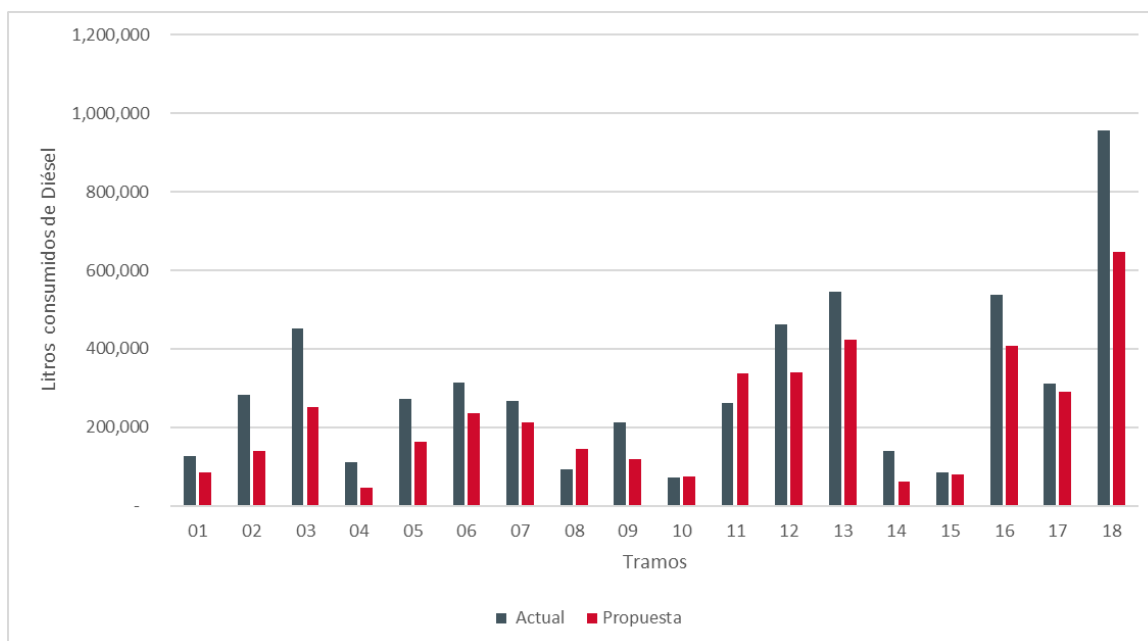


Figura 30 – Comparativo de consumo de combustible por tramo

Este comparativo será una de las partes más importantes en la metodología para la toma de decisiones, pues permitirá determinar cuándo la solución propuesta seguirá siendo óptima, dados algunos cambios del entorno del problema en general o de un tramo en específico.

Este análisis consiste en determinar la sensibilidad de la respuesta óptima de la metodología propuesta y, sobre todo, dimensionar la disponibilidad de recursos y proyectar una buena logística de estos.

Hoy en día esta metodología ya está siendo trabajada dentro de la empresa por las áreas de Planeación, Operación y Tecnologías de la Información, con el objetivo de desarrollar un dashboard donde se pueda ir dando seguimiento día a día de los trenes que se están moviendo a lo largo de toda la red y así ir monitoreando los que están fuera de rango y analizar cómo mejorar su HPTon y evitar desperdicios de fuerza tractiva.

Los resultados están siendo bastante buenos y los directores de las tres áreas han decidido que se desarrolle por completo la aplicación y así el área de Finanzas pueda ir cuantificando los ahorros de consumo de combustible en el estado de resultados de la empresa.

4.2.4 Conclusiones de la metodología

La metodología que se propone para la asignación del número de máquinas por tramo operativo que necesitan los trenes más importantes por segmento, consiste en calcular el número mínimo de máquinas que necesita cada tren para pasar por la pendiente gobernadora de cada tramo a un mínimo de entre 23 y 25 km/h. Con la aportación de esta metodología se generó una forma de planear cómo optimizar el uso de la fuerza motriz mediante mover más toneladas por cada caballo de fuerza.

Finalmente, se cumplió con el primer objetivo de este trabajo que fue desarrollar la metodología para calcular el número de máquinas y así optimizar el indicador de HP's/Ton, que a su vez nos permitirá obtener un ahorro en combustible al usar menos locomotoras.

La importancia de esta metodología de planeación radica en que ya se podrá tener una base sobre la cual comparar el indicador HPTon de la operación día a día vs las metas, y así conocer si se están obteniendo ahorros o no.

Antes de concluir, se menciona que al igual que la metodología anterior, ésta sólo se enfoca en la planeación del uso de la fuerza motriz. La parte de operativa del día a día no se resuelve con este plan, por lo que se recomienda complementar con alguna de las soluciones descritas en el marco teórico (capítulo 3) para complementar una resolución completa de asignación de máquinas a los trenes dentro de una compañía ferroviaria.

Capítulo 5. Recomendaciones para investigaciones a futuro

La importancia de este trabajo es mejorar la planeación del uso de la fuerza motriz en una compañía ferroviaria, pues como se sabe, dentro de la empresa donde se aplicaron las metodologías no se contaba con un método para calcular el número de locomotoras que se necesitan en un futuro y así solicitarlas a los proveedores. A su vez, no se estaba aprovechando totalmente la fuerza de arrastre, debido a que se carecía de una planeación para asignar correctamente la fuerza a los trenes. La mejora que se propone con las metodologías desarrolladas aquí, es muy significativa puesto que se resuelve la complejidad de los problemas antes mencionados y se justifican económicamente, que es de los factores más importantes para poder implementar un nuevo desarrollo.

Adicionalmente a los resultados obtenidos, con el objetivo de mejorar las ganancias y seguir optimizando la fuerza de arrastre de las compañías ferroviarias, se recomienda unir las dos metodologías desarrolladas con los programas de operación de asignación de máquinas a trenes que se mencionan en el marco teórico. Así se tendrá una visión completa que incluya la planeación a un futuro y la operación día a día que varía de forma constante. Con las dos visiones se pueden complementar y obtener mejores resultados de aprovechamiento de fuerza.

Por último, actualmente en la compañía ferroviaria sobre la que se trabajó, se está implementando una nueva tecnología con las locomotoras nuevas AC (que son las que ya la incluyen), la cual consiste en poder conectar y desconectar cada uno de los seis ejes operativos con los que cuentan con base en el requerimiento de fuerza que se necesite durante su trayecto. En un trabajo futuro será necesario adaptar las metodologías de este documento para planear la proyección de fuerza requerida usando ejes operativos y mostrar sus beneficios. Este es un nuevo reto y se podría llevar simplemente ajustando el cálculo de fuerza de arrastre por cada eje operativo y no por locomotora.

Dentro del ambiente ferroviario y sobre todo en el problema de asignación de locomotoras a nivel estratégico y táctico este plan y metodología propuestos en este documento ayudan a eliminar el problema de no contar con suficiente fuerza motriz y, a su vez, a optimizar cada una de las máquinas con las cuales cuente cualquier compañía ferroviaria.

Referencias

- Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario (2017). Anuario Estadístico Ferroviario. Fecha de publicación 30 de Marzo de 2018. <https://www.gob.mx/artf/acciones-y-programas/anuario-estadistico-ferroviario-2017-152797>
- Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario (2018). Anuario Estadístico Ferroviario. Fecha de publicación 03 de Abril de 2019. <https://www.gob.mx/artf/acciones-y-programas/anuario-estadistico-ferroviario-2018>
- Assad, A. A. (1980). Modelling of rail networks: toward a routing/makeup model. *Transportation Research Part B: Methodological*, 14(1-2), 101-114.
- Booler, J. M. P. (1980). The solution of a railway locomotive scheduling problem. *Journal of the Operational Research Society*, 31(10), 943–948. <https://doi.org/10.1057/jors.1980.170>
- Canca, D., De-Los-Santos, A., Laporte, G., & Mesa, J. A. (2016). A general rapid network design, line planning and fleet investment integrated model. *Annals of Operations Research*, 246(1-2), 127-144.
- Canca, D., De-Los-Santos, A., Laporte, G., & Mesa, J. A. (2017). An adaptive neighborhood search metaheuristic for the integrated railway rapid transit network design and line planning problem. *Computers & Operations Research*, 78, 1-14.
- Florian, M., Bushell, G., Ferland, J., Guérin, G., & Nastansky, L. (1976). The Engine Scheduling Problem In A Railway Network. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 14(2), 121–138. <https://doi.org/10.1080/03155986.1976.11731632>
- Forbes, M. A., Holt, J. N., & Watts, A. M. (1991). Exact Solution of Locomotive Scheduling Problems. *Journal of the Operational Research Society*, 42(10), 825–831. <https://doi.org/10.1057/jors.1991.163>
- Goossens, J. W., van Hoesel, S., & Kroon, L. (2006). On solving multi-type railway line planning problems. *European Journal of Operational Research*, 168(2), 403-424.
- Premkumar, P., & Kumar, P. R. (2019). Literature Review of Locomotive Assignment Problem from Service Operations Perspective: The Case of Indian Railways. *IIM Kozhikode Society & Management Review*, 8(1), 74-86.
- Wright, M. B. (1989). Applying Stochastic Algorithms to a Locomotive Scheduling Problem. *Journal of the Operational Research Society*, 40(2), 187–192. <https://doi.org/10.1057/jors.1989.23>
- Xu, X., Li, C.-L., & Xu, Z. (2018). Integrated train timetabling and locomotive assignment. *Transportation Research Part B: Methodological*, 117, 573–593. <https://doi.org/10.1016/J.TRB.2018.09.015>
- Ziarati, K., Soumis, F., Desrosiers, J., Gélinas, S., & Saintonge, A. (1997). Locomotive assignment with heterogeneous consists at CN North America. *European Journal of Operational Research*, 97(2), 281–292. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(96\)00198-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00198-1)