



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
Doctorado en Ingeniería (Energía)

**Optimización de la cadena de suministro de
combustibles automotrices**

TESIS

Que para optar por el grado de:
Doctor en Ingeniería en Energía

PRESENTA:

Rafael García Jolly

TUTOR:

Dra. Cecilia Martín del Campo Márquez
Facultad de Ingeniería

Cd. Universitaria, CDMX, junio de 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Esta página fue deliberadamente dejada
en blanco



Miembros del jurado

Presidente	Dr. José Ramón Francisco J. Montiel López
Secretario	Dra. Idalia Flores de la Mota
1er. Vocal	Dra. Cecilia Martín del Campo Márquez
2do. Vocal	Dr. José Ángel F. de la Vega Navarro
3er. Vocal	Dra. Carmina Montiel Pacheco



Esta página fue deliberadamente dejada en blanco



Resumen

En esta tesis se presentan las bases para la construcción de un modelo de optimización simplificado para la cadena de suministro de combustibles automotrices en México, para detectar y evaluar las diferentes opciones de inversión en infraestructura para ampliar la red de distribución.

Basándose en los resultados de este modelo, se compara la utilización de una tarifa nivelada, similar a la aprobada por la Comisión Reguladora de Energía, contra la optimización de la entrada en operación mediante variables binarias. Esta última propuesta resultó ser la más sólida ante cuatro diferentes escenarios de crecimiento de la demanda: inercial, ecológico, de crisis y pos-Covid.

Los resultados del modelo determinista pudieron corroborarse mediante la construcción de un hipercubo latino, el cual consta de 64 escenarios isoprobabilísticos que abarcan las posibles variaciones de precios, tanto de petróleo crudo como de productos petrolíferos, conforme a los datos históricos.

Concluye que el freno a la economía, derivado de la pandemia por el virus SARS-Cov-2, permite diferir la decisión sobre la expansión de la red de suministro de combustibles automotrices, al menos para los próximos tres años.

La contribución relevante de la tesis fue mostrar cómo se seleccionan los elementos críticos de la compleja red mexicana para construir/desarrollar un modelo de optimización, que sea práctico para la toma de decisiones, sobre la expansión de largo plazo de la infraestructura de suministro de los combustibles automotrices.



Abstract

This thesis presents the bases for the construction of a simplified optimization model for the automotive fuels supply chain in Mexico, to identify and evaluate the different investment options in infrastructure to expand the distribution network.

Based on the model results, the use of a leveled fee, similar to that approved by the Comisión Reguladora de Energía (Energy Regulatory Commission), is compared against the operation start optimization using binary variables. The latter proposal was the strongest in the face of four different demand growth scenarios: inertial, ecological, crisis and post-Covid.

The results of the deterministic model could be corroborated through the construction of a Latin hyper-cube, which consists of 64 isoprobabilistic scenarios that cover possible price variations, both for crude oil and petroleum products, according to historical data.

It concludes that the brake on the economy, caused by the SARS-CoV-2 pandemic period, makes possible to defer the decision on the expansion of the automotive fuels supply network, at least for the next three years.

The relevant contribution of the thesis was to show how the critical elements of the complex Mexican network are selected to build / develop an optimization model, which is practical for decision-making, on the long-term expansion of the supply infrastructure of the automotive fuels.



Contenido

1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. OBJETIVO	13
1.2. PROBLEMÁTICA	13
1.3. PROPUESTA	18
2. OPTIMIZACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO	19
2.1. ANTECEDENTES.....	20
2.2. CADENA NACIONAL DE SUMINISTRO DE COMBUSTIBLES AUTOMOTRICES.....	26
2.3. REFINACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE PETROLÍFEROS.....	28
2.4. OPTIMIZACIÓN MATEMÁTICA	34
2.5. MODELACIÓN	38
3. METODOLOGÍA.....	42
3.1. MODELO.....	42
3.2. ESCENARIOS DE LARGO PLAZO	55
3.3. ESCENARIOS DE PRECIOS.....	59
3.4. INVERSIONES PARA LA EXPANSIÓN DE LA RED.....	67
3.5. GRTMPS, LA HERRAMIENTA	75
4. RESULTADOS	76
4.1. TARIFA NIVELADA	76
4.2. PROGRAMACIÓN MIXTA ENTERA	87
4.3. ESCENARIO SIN EXPANSIÓN DE LA RED.....	94
4.4. VARIACIÓN DE PRECIOS	95
5. CONCLUSIONES.....	103
6. NOMENCLATURA.....	105
7. REFERENCIAS	107



Índice de tablas

Tabla 1. Infraestructura de Pemex Logística	27
Tabla 2. Conceptos básicos de la Investigación de Operaciones	34
Tabla 3. Principales definiciones de la programación matemática	37
Tabla 4. Nomenclatura utilizada para los sistemas de distribución de combustibles automotrices	47
Tabla 5. Matriz de incidencia Bajío-Occidente.....	49
Tabla 6. Matriz de incidencia para el sistema de ductos Sur-Golfo-Centro-Occidente.....	51
Tabla 7. Determinación de LHS para escenarios de precios	66
Tabla 8. Heurística para la inversión de ductos	68
Tabla 9. Memoria de cálculo de tarifa PC-OC (Manzanillo-Guadalajara)	69
Tabla 10. Resultado de las tarifas niveladas para los sistemas propuestos	70



Índice de figuras

Figura 1. Operación propuesta para petrolíferos en la Reforma Energética 2013	14
Figura 2. Segmentación de la cadena de suministro de combustibles automotrices	16
Figura 3. Infraestructura nacional de petrolíferos.....	17
Figura 4. Esquema de los procesos de refinación.....	28
Figura 5. Rendimientos de destilación para diferentes calidades de crudo.....	29
Figura 6. Desempeño relativo de diferentes configuraciones de refinerías	30
Figura 7. Variaciones en el margen de refinación (ilustrativo).....	31
Figura 8. Contribución de costos a lo largo de la cadena de suministro	32
Figura 9. Logística de las diferentes alternativas de suministro a Guadalajara	32
Figura 10. Demanda promedio 2016 de las zonas Centro, Bajío y Occidente	33
Figura 11. Análisis conceptual de la complejidad del modelo.....	39
Figura 12. Ciclo de vida típico de los modelos matemáticos.....	41
Figura 13. Construcción del cubo de datos de producción de petrolíferos	43
Figura 14. Sistemas de ductos aislados	47
Figura 15. Sistema de ductos Norte.....	48
Figura 16. Sistema de ductos Sur-Golfo-Centro-Occidente.....	48
Figura 17. Agrupación de nodos en el sistema de ductos Sur-Golfo-Centro-Occidente.....	49
Figura 18. Simplificación del sistema de ductos Sur-Golfo-Centro-Occidente.....	50
Figura 19. Rutas de suministro a Guadalajara/Zona Occidente	50
Figura 20. Agrupación de nodos en el sistema de ductos Norte.....	52
Figura 21. Modelo simplificado con 11 regiones.....	52
Figura 22. Conceptualización del modelo multi períodos de largo plazo	55
Figura 23. Escenarios propuestos para la predicción de la demanda futura	56
Figura 24. Generación aleatoria de escenarios	62
Figura 25. Aplicación del método de Morris al LHS.....	62
Figura 26. Alternativas para el manejo de inversiones	67
Figura 27. Modelo de prueba para determinar el año óptimo de inversión.....	71
Figura 28. Resultados para determinar el año óptimo de inversión (ejemplo)	74



Figura 29. Distribución óptima 2021 con tarifa nivelada y escenario inercial.....	78
Figura 30. Distribución óptima 2030 con tarifa nivelada y escenario inercial.....	79
Figura 31.Sensibilidad Golfo-Centro 2030 con tarifa nivelada y escenario inercial	80
Figura 32. Distribución óptima 2024 con tarifa nivelada y escenario de crisis	83
Figura 33. Distribución óptima 2025 con tarifa nivelada y escenario pos-Covid	84
Figura 34. Distribución óptima 2021 con MIP y escenario Inercial	88
Figura 35. Distribución óptima 2030 con MIP y escenario Inercial	88
Figura 36. Distribución óptima 2030, escenario Inercial sin inversiones	94
Figura 37. Esquema de presentación de resultados estocásticos	96
Figura 38. Variaciones en el proceso de crudo para el escenario inercial (LHS)	97
Figura 39. Variaciones en la importación de gasolina para el escenario inercial (LHS).....	97
Figura 40. Variaciones en balanza comercial de destilados intermedios para el escenario inercial (LHS)	98
Figura 41. Variaciones en la exportación de residuales para el escenario inercial (LHS).....	99
Figura 42. Año óptimo de operación de los sistemas de ductos, escenario inercial (LHS)	100
Figura 43. Año óptimo de operación de los sistemas de ductos, escenario ecológico (LHS) .	101
Figura 44. Año óptimo de operación de los sistemas de ductos, escenario de crisis (LHS) ...	102
Figura 45. Año óptimo de operación de los sistemas de ductos, escenario pos-Covid (LHS)	102



Índice de Gráficas

Gráfica 1. Optimización de la refinería de Cadereyta.....	46
Gráfica 2. Escenarios de demanda de petrolíferos 2020-2030	57
Gráfica 3. Histórico de ventas nacionales de productos petrolíferos, mbd	58
Gráfica 4. Actualización del pronóstico de ventas 2020-2030 (escenario pos-Covid)	59
Gráfica 5. Precios históricos de petróleo crudo.....	60
Gráfica 6. Diferencial histórico entre crudo ligero y crudo pesado.....	60
Gráfica 7. Ajuste de la distribución de probabilidad Gamma al diferencial de precios de crudo	61
Gráfica 8. Precios históricos de combustibles	63
Gráfica 9. Diferencial histórico entre productos ligeros y pesados.....	63
Gráfica 10. Diferenciales históricos (crudos vs productos)	64
Gráfica 11. <i>Crack Spread</i> para crudo ligero	65
Gráfica 12. Correlación entre precio de gasolina y diésel	65
Gráfica 13. Principales variables operativas, escenario inercial con tarifa nivelada.....	77
Gráfica 14. Utilización de la nueva infraestructura con tarifa nivelada y escenario inercial ...	78
Gráfica 15. Sensibilidad Golfo-Centro con tarifa nivelada y escenario inercial.....	79
Gráfica 16. Construcción de la función objetivo, valor presente MM\$/d.....	80
Gráfica 17. Principales variables operativas, escenario ecológico con tarifa nivelada	81
Gráfica 18. Utilización de la nueva infraestructura con tarifa nivelada y escenario ecológico	81
Gráfica 19. Principales variables operativas, escenario de crisis con tarifa nivelada.....	82
Gráfica 20. Utilización de la nueva infraestructura con tarifa nivelada y escenario de crisis..	82
Gráfica 21. Principales variables operativas, escenario pos-Covid con tarifa nivelada	83
Gráfica 22. Utilización de la nueva infraestructura con tarifa nivelada y escenario pos-Covid	84
Gráfica 23. Impacto económico con tarifa nivelada por el cambio de escenario de Inercial a Ecológico	85
Gráfica 24. Impacto económico con tarifa nivelada por el cambio de escenario de Inercial a Crisis.....	85
Gráfica 25. Impacto económico con tarifa nivelada por el cambio de escenario de Inercial a pos-Covid	86
Gráfica 26. Principales variables operativas, escenario inercial con MIP.....	86



Gráfica 27. Utilización de la nueva infraestructura con MIP y escenario inercial	87
Gráfica 28. Impacto económico del cambio de tarifa nivelada a MIP, escenario inercial.....	89
Gráfica 29. Principales variables operativas, escenario ecológico con MIP	89
Gráfica 30. Principales variables operativas, escenario de crisis con MIP.....	90
Gráfica 31. Principales variables operativas, escenario pos-Covid con MIP	90
Gráfica 32. Utilización de la nueva infraestructura con MIP y escenario ecológico.....	91
Gráfica 33. Utilización de la nueva infraestructura con MIP y escenario de crisis	91
Gráfica 34. Utilización de la nueva infraestructura con MIP y escenario pos-Covid.....	92
Gráfica 35. Impacto económico con MIP por el cambio de escenario de Inercial a ecológico	92
Gráfica 36. Impacto económico con MIP por el cambio de escenario de Inercial a crisis	92
Gráfica 37. Impacto económico con MIP por el cambio de escenario de Inercial a pos-Covid	93
Gráfica 38. Principales variables operativas, escenario inercial sin inversiones	93
Gráfica 39. Contribución económica de los proyectos de expansión de la red.....	95
Gráfica 40. Valor esperado de las principales variables operativas, escenario inercial	100



1. Introducción

La apertura del mercado nacional de gasolina y diésel en 2017 fue el detonador de este proyecto de investigación, en el cual se analiza la cadena de suministro de combustibles automotrices y se propone una metodología para definir cuál será la mejor trayectoria en el mediano y largo plazos para el crecimiento en la infraestructura que le da soporte al mercado.

Difícilmente podrían verse inversiones privadas para la construcción de refinerías, dados los altos niveles de capital requeridos, pero en los rubros de distribución, almacenamiento y comercialización se ha visto una creciente participación de los inversionistas. En este trabajo se aborda la cadena de suministro desde la perspectiva de la distribución de combustibles automotrices.

1.1. Objetivo

Analizar las opciones de expansión de la red existente de distribución de combustibles automotrices y proponer una metodología que apoye al tomador de decisiones sobre la conveniencia de su construcción, basada en la optimización conjunta de inversiones y costos de distribución.

Desarrollar un modelo de optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices en México, que permita la maximización del valor económico aportado por la red de distribución en el mediano y largo plazos, considerando un horizonte multiperíodos.

1.2. Problemática

Los cambios que propuso la Reforma Energética, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 21 de diciembre de 2013, representaban un nuevo paradigma nacional, al desaparecer las figuras de Petróleos Mexicanos y de la Comisión Federal de Electricidad como monopolios estatales, después de varias décadas de haberse administrado como instrumento de política pública. La promulgación de las Leyes secundarias en agosto de 2014 planteaba la libre competencia en el sector energético, pero generó incertidumbre hacia los inversionistas al tratarse de un escenario inédito en el sector energético mexicano.

La Ley de Hidrocarburos estableció condiciones asimétricas para Petróleos Mexicanos en cuanto a ventas de primera mano, privilegiando las actividades comerciales de los importadores. Se establecieron regulaciones secundarias similares a las existentes en otros países, cuyos mercados se desempeñan en un panorama económico y una madurez del sector energético

que distaban de las condiciones prevalecientes en México durante el período de apertura de los mercados. En otros casos, la regulación emulaba la operación de Pemex y CFE como monopolios estatales, que dejó de ser el modelo de operación de las ahora Empresas Productivas del Estado (EPE).

Finalmente, los órganos reguladores surgieron como una instancia de verificación de procesos que antes se llevaban al interior de las empresas paraestatales, o que simplemente se ignoraban. Así, el cumplimiento de la política energética establecida por la Secretaría de Energía quedó sujeto a la aprobación de entidades independientes, tanto para las EPE como para las empresas privadas que así lo solicitaran. En la Figura 1 se esquematiza la participación de los diferentes actores en la operación de la cadena de petrolíferos, propuesta por la Reforma energética de 2013.



Fuente: elaboración propia

Figura 1. Operación propuesta para petrolíferos en la Reforma Energética 2013

La apertura del sector energético en México, en específico en el ramo de los hidrocarburos, implicó una serie de oportunidades de participación de la iniciativa privada. Las actividades en los rubros de exploración y producción de petróleo crudo representaron un gran atractivo para los inversionistas. Sin embargo, la contribución que éstos pudieran aportar al balance nacional de energía se vería reflejado hasta el largo plazo y no tendría un impacto importante en la cadena de suministro de combustibles automotrices, con incidencia hacia el consumidor final.

No obstante que la demanda de combustibles automotrices e industriales superaba significativamente a la capacidad de producción nacional, los requerimientos de capital son extremadamente altos y la refinación representa —desde el punto de vista económico— una actividad marginal. Si a esto agregamos que, de acuerdo con datos de la *U.S. Energy Information*



Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

Administration [1], en 2017 existía una capacidad de refinación instalada en los Estados Unidos de América de 20 millones de barriles diarios (MMBD) contra una demanda de 15 MMBD, de modo que la colocación en México de estos excedentes entraría en competencia contra la nueva capacidad de refinación en territorio nacional, ya sea de nuevas refinerías o expansión de las existentes en alianza con Pemex.

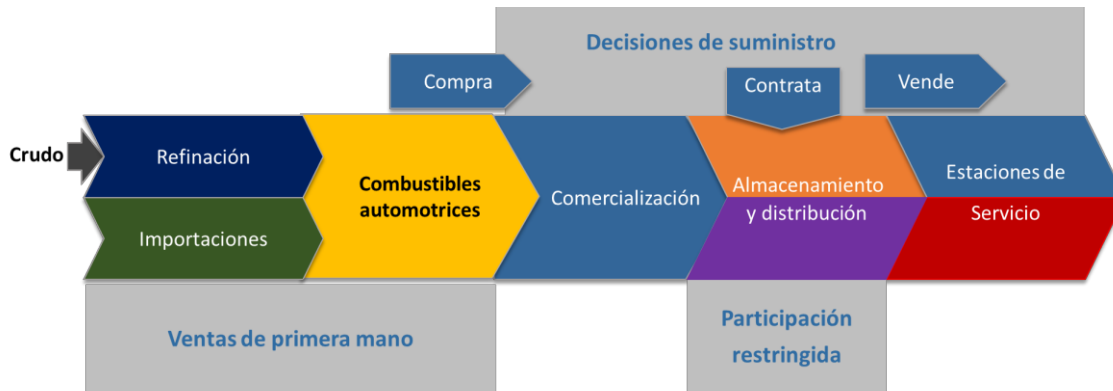
La apertura del mercado en 2016 y la liberación de los precios al público en 2017 fue interpretada como una buena señal para los inversionistas. La balanza comercial de combustibles automotrices jugó un papel importante en la competencia por el suministro de la demanda nacional, ampliando la red de más de once mil estaciones de servicio, las cuales deberían recibir el producto al menor precio posible, independientemente del origen de éste.

Para las importaciones existe un precio de oportunidad en el mercado de origen, comúnmente la Costa Norteamericana del Golfo de México, que representa un mercado maduro y con información diaria disponible sobre sus transacciones. Las habilidades del comprador para lograr condiciones comerciales favorables representan la ventaja competitiva hacia el final de la cadena de suministro.

Los costos para la internación del producto dependen fuertemente de la infraestructura para recibirlos en una terminal en territorio nacional. La capacidad de almacenamiento, la disponibilidad de ductos y el calado en puertos mexicanos determinarán los límites volumétricos en cada punto de importación, así como los factores de escala para obtener los costos asociados al transporte, almacenamiento y manejo.

Una vez que el producto se encuentra en territorio nacional, la distribución hacia las terminales de almacenamiento, a través de la red de ductos existente o futura, está normada por la Comisión Reguladora de Energía, que establece las cuotas máximas a cobrar por el prestador de servicios de transporte y almacenamiento, homologando los costos para todos los participantes en el mercado. Asimismo, establece la obligatoriedad de dar acceso abierto a la infraestructura existente de almacenamiento y distribución mediante subastas públicas en una temporada abierta, de acuerdo con los artículos 73, 74 y 75 de la Ley de Hidrocarburos.

No obstante que el transporte mediante auto tanque y carro tanque son las opciones de mayor costo en la cadena de distribución, su uso para complementar el suministro total de la demanda en algunas regiones es necesario ante limitaciones en la capacidad de la red de poliductos. Esta operación establece, en la mayoría de las ocasiones, el precio marginal de los productos en mercados alejados de la fuente de producción o de los puntos de internación.



Fuente: elaboración propia

Figura 2. Segmentación de la cadena de suministro de combustibles automotrices

En el caso de productos petrolíferos elaborados en una refinería en México, el costo de oportunidad sería aquel que iguale a las importaciones puestas en un mismo punto de arbitraje, de tal suerte que compitan directamente en un mercado específico. Estos precios de oportunidad serán los que tendría que ver un productor en territorio nacional para determinar la rentabilidad de nueva capacidad de refinación o de ampliación de la existente.

En la Figura 2 se muestra la segmentación de la cadena de suministro de combustibles automotrices, que involucra las siguientes operaciones:

PRODUCTOR/IMPORTADOR. En este rubro de ventas de primera mano podrán participar los productores en territorio nacional (Pemex Transformación Industrial) y los importadores directos, entendiéndose como punto de venta de primera mano las refinerías o el punto de internación del producto terminado, ya sea terminal terrestre, terminal marítima o ducto.

COMERCIALIZADOR. Compra el producto de primera mano y lo revende, ya sea al público en general a través de sus propias estaciones de servicio, o bien a estaciones de servicio de terceros. Deberá contratar los servicios de distribución a quien posea la infraestructura y el permiso de operar por parte de la CRE, así como el de almacenamiento y reparto al propietario de la terminal. Dichas contrataciones se ejecutarán mediante reserva de capacidad en subasta pública o bien de uso general sujeta a disponibilidad. Tiene la obligación de mantener un inventario mínimo, de acuerdo con las políticas definidas por la Secretaría de Energía.

DISTRIBUIDOR. Es el encargado de transportar los productos petrolíferos desde el punto de venta de primera mano hasta las terminales de almacenamiento y reparto, ya sean propias o de un tercero, de acuerdo con las condiciones contratadas por el comercializador.

Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

TERMINAL DE ALMACENAMIENTO Y REPARTO. Recibe el producto propiedad del comercializador, lo almacena y coordina la entrega a las estaciones de servicio, conforme a lo contratado por el comercializador.

ESTACIÓN DE SERVICIO. Compra el producto entregado en sus instalaciones a una empresa comercializadora, lo almacena en sus tanques propios para el despacho en bomba al cliente final.

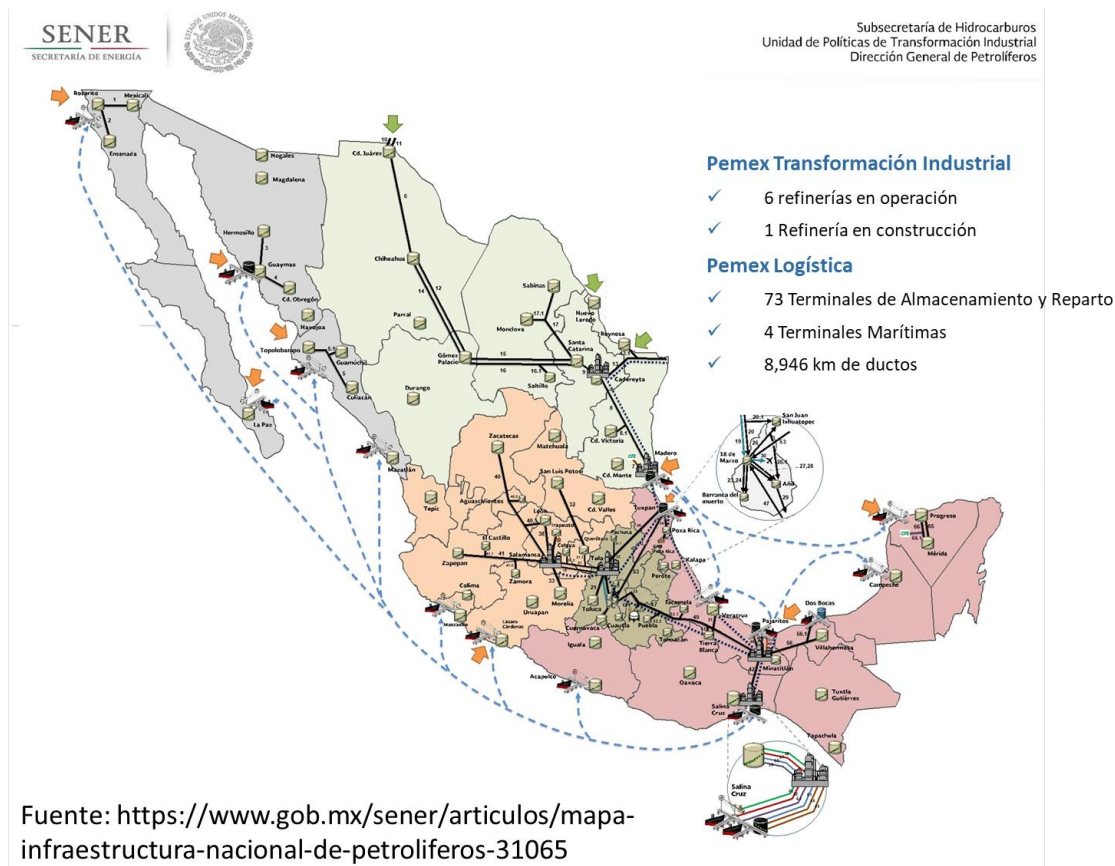


Figura 3. Infraestructura nacional de petrolíferos

La infraestructura existente para la distribución de combustibles automotrices, mostrada en la Figura 3, está limitada. Algunos de los sistemas de ductos operan en el máximo de su capacidad disponible y los tanques de almacenamiento en terminales, principalmente en la costa del Pacífico, fuerzan al sistema a manejar lotificaciones pequeñas, que impiden el uso intensivo de medios de transporte como el marítimo, incrementando los costos de distribución.

El mandato de suministro total de la demanda que tenía Petróleos Mexicanos como monopolio estatal terminó con la Reforma Energética. La visión de la cadena de suministro que tenía



Pemex Refinación, basada en la minimización de costos, cambió por una de maximización de valor. La atención de emergencias ante interrupciones del sistema generaba pérdidas económicas que, en un entorno abierto, pueden dar lugar a la suspensión de operaciones por parte de alguno de los participantes, si éste considerara que las condiciones económicas le fueran desfavorables.

Como medida de mitigación del problema anterior, la Secretaría de Energía elaboró el Proyecto de política de almacenamiento aplicable a gasolina, diésel y turbosina. Con ello pretende incrementar la seguridad energética de México, pero dicha medida podría incrementar tanto los costos financieros como las inversiones en un crecimiento desmedido en algunas zonas, sin garantizar el suministro de productos en todo el territorio nacional.

La redefinición de la red de suministro de combustibles automotrices deberá, entonces, contemplar aspectos que permitan alcanzar la optimización futura de la cadena de suministro, con una reducción en los costos marginales de distribución que se vean reflejados en el precio al cliente final, con un beneficio social neto. La Ley de Hidrocarburos le asigna atribuciones a la Secretaría de Energía para definir los sistemas integrados y a la Comisión Reguladora de Energía para la autorización de su operación y tarifas asociadas.

El diseño de políticas públicas que promuevan la expansión eficiente de la cadena de suministro de combustibles automotrices, así como la toma de decisiones para los diferentes inversionistas que pretendan participar en el sector, representan un gran reto para la planeación energética. Si se considera, además, el nuevo paradigma emanado de la Reforma Energética, el cambio de partido en el Gobierno Federal de 2018 y la incertidumbre en el entorno internacional, el reto de evaluación es inédito en el mundo. La optimización en este panorama de altísima incertidumbre dependerá, en mayor medida, de la definición de los escenarios posibles más que de las técnicas de programación matemática, ampliamente estudiadas.

1.3. Propuesta

Esta tesis plantea los criterios para desarrollar un modelo de optimización para la cadena de suministro de combustibles automotrices, el cual se denominará MOSCA¹. Se pretende que el modelo considere los principales elementos que soporten la toma de decisiones para el inversionista o para el ente emisor de política energética. Es necesario que el modelo sea de fácil comprensión y de ejecución ágil, dado el amplio universo de escenarios que podrían plantearse

¹ Modelo de Optimización del Suministro de Combustibles Automotrices



Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

hacia el futuro, tanto para la demanda de combustibles, tecnologías alternativas, precios y entorno del mercado internacional. Se comparan los resultados del modelo propuesto con los que arroja el modelo utilizado por Petróleos Mexicanos para planeación de sus operaciones e inversiones, conocido como MOSNR². La decisión sobre propuestas de expansión de la infraestructura sería la misma basándose en las corridas del modelo propuesto que en los resultados del MOSNR para el mismo escenario de estudio, proporcionados por la Gerencia de Modelos de Optimización Integral, de la Dirección Corporativa de Planeación, Coordinación y Evaluación para este trabajo.

Inicialmente se propusieron tres escenarios futuros para la demanda de combustibles automotrices, los cuales se describen más adelante. Sin embargo, fue necesario agregar una nueva versión considerando los efectos en la actividad económica derivados del Covid-19. Estos escenarios fueron ejecutados con el pronóstico de precios futuros del Estudio de Mercado de Hidrocarburos 2018, elaborado por el Instituto Mexicano del Petróleo. Como sensibilidad, se establecieron 64 escenarios alternativos de precios para la determinación estocástica del valor esperado.

Los resultados muestran que una reducción en la demanda permite diferir la expansión de la infraestructura de la cadena de suministro, pero el hallazgo más importante fue la diferencia en la señal hacia la nueva infraestructura al modificar la arquitectura de modelación para las nuevas inversiones, ya sea mediante el cobro de una tarifa nivelada o utilizando programación mixta entera (MIP, por sus siglas en inglés).

2. Optimización de la cadena de suministro

La rentabilidad de la cadena de suministro depende fuertemente de la economía de la red de distribución, ya que la máxima eficiencia del sistema se obtendrá en la medida que la operación se aproxime a su funcionamiento óptimo, minimizando, a su vez, el costo total de distribución. Los modelos matemáticos son herramientas convincentes que ayudan a alcanzar este objetivo y se utilizan frecuentemente para la optimización de operaciones industriales y la cadena de suministro de combustibles automotrices no es la excepción.

² Modelo de Optimización del Sistema Nacional de Refinación



2.1. Antecedentes

Se utilizan muchos métodos para optimizar la planificación de operaciones industriales, como lo mencionan Gharaei, Pasandideh y Khamseh (2017) [2]; o bien para optimizar operaciones, inventarios o hasta el diseño de cadenas de suministro completas, según Brüning, Masi, Cordes y Jacobsen (2018) [3]. El problema de optimización de cadenas de suministro no ha sido la excepción. Para ello se encuentran modelos de diferentes tamaños y alcances sumamente diversos, ya sea que se cuente con información precisa o considerando incertidumbre; con diferentes horizontes de tiempo, ya sea en un período o multi-períodos; mediante relaciones lineales, no lineales o enteras; en un escenario determinista o estocástico.

Por un lado se tienen desarrollos como el planteado por Castro y Mostafaei (2017) [4] para la programación de la producción y de la distribución a través de un sistema de poliductos en el corto plazo utilizando modelos con un alto nivel de detalle, basados en algoritmos de programación disyuntiva para resolver un problema de MILP³; o la propuesta de Grossman (2012) [5], que plantea la optimización integral de la planeación y la programación de las operaciones de toda la empresa, mediante algoritmos de descomposición, ramificación y acotamiento. Ambos trabajos incluyen las capacidades disponibles de la infraestructura y la oferta de materias primas, los volúmenes de demanda, los precios y las tarifas de transporte, así como las obligaciones contractuales. Los modelos resultantes suelen ser grandes y, a veces, complejos, y comúnmente se denominan como *Munster models*. Se requiere mucha información para ejecutar tales modelos y sus resultados también contienen enormes cantidades de datos para analizar. El esfuerzo y el tiempo necesarios para configurar el modelo, realizar una ejecución y comprender los resultados pueden resultar complicados y requerir mucho tiempo.

En el otro extremo está el trabajo de Zhang, Sundaramoorthy, Grossmann y Pinto (2016) [6], que proponen la simplificación mediante la utilización de reglas heurísticas para resolver de manera aproximada el problema de planeación y producción, considerando dos escalas diferentes de tiempo de manera simultánea.

Dal-Mas, Giarola, Zamboni y Bezzo (2011) [7] Optimizan las inversiones para la cadena de suministro de etanol ante incertidumbre en los precios. Posteriormente, Giarola, Bezzo y Shah (2013) [8] amplían el panorama para el mercado de los biocombustibles, ya que éste es altamente sensible ante los factores de incertidumbre tecnológica y ambiental. Al buscar la optimización simultánea entre aspectos económicos y ecológicos para el suministro de etanol,

³ Programación lineal mixta entera, MILP por sus siglas en inglés



Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

concluyen que la actitud de los inversionistas ante el riesgo es crucial en la formulación del problema.

Nishi y Yoshida (2016) [9] proponen la optimización de una cadena de suministro que considere las visiones tanto del cliente como del proveedor, ante la incertidumbre de la demanda y de la oferta, aplicando teoría de juegos con un actor líder y un seguidor en equilibrio de *Stackleberg*. Hu y Feng (2017) [10] también abordan la cadena cliente-proveedor y comparan la optimización independiente contra la generación conjunta de valor al aplicar contratos de utilidad compartida. También utilizando la teoría de juegos, Yue y You (2017) [11] plantean un juego no cooperativo líder-seguidor del tipo de *Stackleberg*, pero modifican el problema de bajo nivel del seguidor para permitirle decisiones discretas y lo reformulan aplicando las condiciones de *Karush-Kun-Tucker* al problema convexo, comparando los resultados contra la optimización centralizada.

El problema de expansión de la cadena de suministro es planteado por García-Herreros, Wassic y Grossman (2014) [12], buscando incrementar la resiliencia de la cadena de suministro mediante la combinación de los costos de inversión para su crecimiento y penalizaciones por demanda insatisfecha y considerando la incertidumbre como dato a través de escenarios predefinidos, con una modelación NLMIP⁴. Mitra, Pinto y Grossmann (2013) [13] proponen la planeación de capacidad de una planta industrial con altos consumos energéticos ante la incertidumbre de la demanda y los precios de la energía, buscando la selección de tecnología que minimice los costos totales (operación más inversión) en un horizonte de largo plazo. Santos, Ferreira y Araújo (2016) [14] plantean el crecimiento de la red eléctrica considerando incertidumbre en la demanda, plantean diferentes escenarios de participación de energías renovables y utilizan simulación de Montecarlo en la solución.

La inclusión de variables enteras en la formulación de los problemas de optimización, ya sean lineales o no lineales, ha motivado el desarrollo de algoritmos de solución que agilicen el tiempo de cómputo y que garanticen la estabilidad numérica durante el proceso iterativo. En este sentido se puede destacar el trabajo de Oliveira, Grossmann y Hamacher (2012) [15], quienes proponen la descomposición del problema mediante planos de corte y generan dos modelos, uno maestro que optimiza las inversiones y otro esclavo para minimizar los costos de operación; analizan la convexidad del problema y lo resuelven iterativamente tomando el óptimo de uno de los modelos como cota del otro.

⁴ Programación no lineal mixta entera, NLMIP por sus siglas en inglés



Nakhaii y Soroor (2014) [16] aplican el concepto de optimización robusta para el diseño de una cadena de suministro multi productos con incertidumbre en precios y demanda, pero garantizan el cumplimiento de las metas ecológicas globales en el largo plazo. Hacen diferencia entre las decisiones de diseño, independientes del entorno económico, y de aquellas que dependerán del escenario a analizar. Realizan la optimización secuencial en dos etapas anidadas.

Otros autores que han propuesto algoritmos para la mejora del desempeño computacional durante la solución de los problemas de programación matemática son Apap (2017) [17], quien plantea la descomposición secuencial de escenarios; Garzón, González-Neira y Pérez-Vélez (2017) [18], que realizan la optimización combinatoria con funciones objetivo contradictorias (usuarios vs operadores) con demandas cambiantes a lo largo del día, mediante búsqueda de vecindades variables; Mitra, Garcia-Herreros y Grossmann (2014) [19], que aplican algoritmos de descomposición y generación de escenarios; Mohammed, Wang y Filip (2017) [20], que comparan la optimización multi criterio contra la minimización global de costos como soporte a la toma de decisiones, complementado con un análisis de Pareto; Ruiz y Grossman (2016) [21], que aplican argumentos lógicos a la solución disyuntiva de problemas no convexos; Sampat, Martin y Zavala, (2017) [22], que plantean una formulación para la optimización de una cadena de distribución multi producto usando grafos; Trespalacios y Grossman (2015) [23], que utilizan la relajación de Lagrange para resolver MILP y comparan los resultados con técnicas típicas de ramificación y acotamiento.

Por otro lado, cuando se buscan opciones de crecimiento de la red de distribución, se realiza una planificación a largo plazo. Toda la información que alimenta el modelo proviene de la previsión y depende de los parámetros del escenario que se han fijado previamente. La exploración de nuevas instalaciones en la red de distribución requiere definiciones de la interacción futura con la infraestructura actual, capacidad disponible, tarifas y costos de operación. En este caso, la certeza de los datos para cualquier día específico es irrelevante (es decir, las ventas de gasolina el 11 de junio de 2026 en alguna ubicación), pero el promedio a lo largo del tiempo (semanal, mensual o anual) es suficiente. La optimización para este tipo de análisis pasa a un segundo lugar, y alcanzar la factibilidad en cualquier escenario dado se convierte en el tema central, como lo proponen Bittante, Pettersson y Saxen (2018) [24], que optimizan el reparto marítimo de gas natural licuado considerando una flota heterogénea, planteando diferentes escenarios que representen la incertidumbre en la demanda del energético; o por Azadeh, Raoofi y Zarrin (2015) [25] que gestionan la incertidumbre a través de sensibilidades en modelos multiobjetivo simplificados para optimizar la cadena de suministro de gas natural, considerando aspectos económicos y ambientales de manera simultánea.

Beheshtian, Donaghy, Geddes y Rouhani (2017) [26] abordan la planeación de la cadena de suministro de combustibles automotrices en el mercado de Nueva York, con miras a maximizar la resiliencia del sistema ante catástrofes naturales y actos de terrorismo, mediante la compensación entre los costos de inversión y aquellos derivados por falta de suministro, canalizando los recursos hacia los componentes críticos de la cadena. Concluyen que los escenarios de largo plazo siempre incluyen altos niveles de incertidumbre, ya sean derivados de agentes externos, como fuerzas del mercado o eventos inesperados; provocados por decisiones de analistas o incluso por información incompleta. Lappas y Gounaris (2016) [27] manejaron la incertidumbre poniendo especial énfasis en las variables endógenas y sus efectos, analizando cómo se pueden gestionar los riesgos derivados de decisiones internas. Concluyen que, para un sistema hipotético, en el peor de los escenarios, es mejor determinar la factibilidad a largo plazo para varios escenarios que la solución óptima para uno en particular.

Yuanita, Noorsaman y Wijonarko (2015) [28] plantean un modelo de optimización estocástica para administrar el riesgo de suministro de combustóleo en Indonesia, aplicando cinco parámetros principales mediante simulación de Montecarlo: equidad, independencia, confiabilidad, sostenibilidad y transparencia; en un mercado local subsidiado del cual depende más del 65% de la matriz energética del cuarto país con mayor población mundial.

El tratamiento de las variables aleatorias en la programación estocástica es fundamental en la solución. El manejo matemático estricto de éstas puede resultar en problemas de programación no lineal bastante complejos. Como alternativa, se utilizan escenarios que representen a dichas variables que causan la incertidumbre, ya sea con reglas heurísticas o mediante simulación estadística. Esta clase de métodos se vieron favorecidos el siglo pasado con el desarrollo de las computadoras. McKay y Beckman (1979) [29] hacen una comparación entre el muestreo aleatorio simple, muestreo estratificado y muestreo de hipercubo latino (LHS por sus siglas en inglés), concluyendo en que este último representa una mayor ventaja computacional y reduce la varianza en el espacio muestral.

Morris (1991) [30] plantea que, en un modelo multivariado, la modificación de un parámetro a la vez permitirá estudiar el comportamiento de los resultados en función de ese mismo parámetro y detectar la mejor ecuación de ajuste en el modelo matemático, principalmente en aquellos en los que se observe un comportamiento monotónico. Asimismo, Tang (1993) [31] y Ye (1998) [32] abordan las ventajas de mantener un arreglo ortogonal en la construcción de un hipercubo latino durante la fase de diseño del experimento, con lo cual se garantiza una mejor estimación de las interacciones entre variables y durante la determinación de ajustes no paramétricos.



Carson y Maria (1997) [33] buscan optimizar el ejercicio de simulación, en aras de reducir la utilización de recursos computacionales sin demeritar el resultado. Comparan métodos basados en gradientes, como diferencias finitas, relaciones de verosimilitud, análisis de perturbaciones y de oscilación; métodos estocásticos, basados en la optimización de la esperanza matemática; metodologías de análisis de superficie, basadas en regresiones secuenciales y ascenso acelerado; métodos heurísticos, como algoritmos genéticos, estrategias evolutivas, simulación anidada; y métodos estadísticos, como simulación de Montecarlo y LHS.

Keramat y Kielbasa (1997) [34] demuestran que la utilización de LHS representa ventajas contra una simulación de Montecarlo tradicional para predecir el índice medio de calidad en circuitos integrados, principalmente por la mejor estimación de la varianza. Resultados similares presentan Aistleitner, Hofer y Tichy (2012) [35], que analizan el mercado asiático de derivados mediante LHS para reducir la estimación de la varianza, lo cual comprueban al comparar los resultados contra una simulación típica de Montecarlo. También Martins, Ferreira, Pardal y Morano (2012) [36] evalúan los métodos de simulación de Montecarlo y LHS para estimar la productividad del proceso de soldadura eléctrica por electrodo revestido. Los resultados demostraron la viabilidad de que aplicar ambos métodos podría ayudar en la toma de decisiones sobre los parámetros a especificar dentro de las licitaciones de instalación de tuberías industriales.

Kaewsuwan, Yuangyai, Janjarassuk y Rienkhemaniyo (2018) [37] comparan el desempeño de la simulación de Montecarlo y LHS en el diseño de una cadena de suministro teórica. En ambos casos encuentran que los elementos que pueden causar interrupciones en el sistema no están completamente dispersos, lo que lleva a una gran variación en los valores de la función objetivo. Proponen una mejora que incluye la distancia euclidiana entre los puntos muestrales, reduciendo la desviación estándar hasta en 23%.

Dige y Diwekar (2018) [38] utilizan diferentes técnicas de muestreo para simular la incertidumbre de sistemas de gran tamaño y concluyen que para sistemas con más de 100 variables estocásticas es necesario utilizar métodos mejorados como LHS-Sobol. Sin embargo, el desempeño de la simulación de Montecarlo y de LHS es aceptable por debajo de 40 variables aleatorias.

Ante escenarios de largo plazo con altos niveles de incertidumbre, ya sean derivados de agentes externos, como las fuerzas del mercado o eventos inesperados; causados por decisiones propias o inclusive por tener información incompleta —tecnológica o del entorno—, es mejor garantizar la factibilidad del sistema ante el peor de los posibles escenarios planteados. Así, la optimización futura podrá determinarse al conocer con mayor precisión el escenario, pero se garantiza la operabilidad de la cadena de suministro.



Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

El uso de modelos *Munster* para el análisis de la expansión de infraestructura era una práctica generalizada en las otrora empresas paraestatales, como Pemex Refinación, que basaba estos estudios utilizando el MOSNR. Por lo general, los escenarios se construían utilizando valores medios para la mayoría de los parámetros y sin diferenciar entre períodos de tiempo o incluyendo sólo un período promedio. Por lo tanto, las desviaciones en los pronósticos se convertían en errores en los resultados y se perdía la ventaja del modelado complejo. Para prevenir esta situación es necesario explorar varios escenarios y aplicar un análisis de sensibilidad para probar la solidez de la solución. Sin embargo, la preparación de datos, la ejecución del modelo y el análisis de la solución pueden llevar más tiempo del deseado. Cuanto menor sea el tiempo requerido para la entrada de datos que definan los escenarios, se requerirá un menor esfuerzo para interpretar un análisis de sensibilidad. Esta problemática fue estudiada por van der Zee, Tako, Fishwick, Robinson y Rose (2018) [39], quienes estuvieron de acuerdo en que la mayoría de los problemas de gestión abordados en el modelado podrían caracterizarse como complejos y difíciles de analizar, pero la simplificación en la creación y el empleo de modelos útiles, al centrarse en los elementos del sistema que importan y son factibles, reduce los esfuerzos del estudio.

La Agencia Internacional de Energía Atómica (2019) [40] considera que el modelado de sistemas hipotéticos es un enfoque bastante práctico, eliminando la necesidad de incluir todas las características de los sistemas reales que podrían requerir tiempo y esfuerzo significativos para su formación.

Para reducir los esfuerzos de modelado, fomentar la comprensión del modelo y salvaguardar la eficiencia computacional durante su ejecución, van der Zee (2018) [41] propone que sólo se deben incluir en la estructura matemática —idealmente— los elementos del sistema que responden a los objetivos de modelado, en lugar de utilizar los sistemas completos. La simplificación del modelo se puede hacer agregando o eliminando algunos subsistemas, como proponen Senderovich, Shleyfman y Gal (2018) [42]. Además, Chiang (2010) [43] identificó los elementos críticos que deben mantenerse en el modelo y así poder eliminar etapas no críticas en rutas de productos, las cuales reemplazó con valores constantes. Reiman, McDermott y Reed (2018) [44] propusieron para tal fin la segmentación del modelo, basada en un análisis topológico del sistema.

Casi todos los métodos antes mencionados se podrían aplicar, cada uno con mayores o menores inconvenientes que resolver, a la expansión de la infraestructura de suministro de combustibles automotrices en México. El uso de un modelo más práctico a partir de una simplificación del MOSNR, basada en la identificación de cuellos de botella, agrupación de terminales de almacenamiento y simplificación del proceso de crudo en refinerías, como se explicará más



adelante. Con ello se pretende demostrar que la modelación de los elementos críticos de la red y sus principales puntos potenciales de interrupción, muestran la información suficiente al tomador de decisiones sobre las necesidades de expansión. El enfoque desarrollado parece apropiado para su aplicación en las primeras etapas de estudio para determinar la expansión de la cadena de suministro de combustibles automotrices, ya que permite a los analistas realizar una evaluación comparativa preliminar, además de favorecer, dado su tiempo de ejecución, la exploración de un gran número de escenarios.

Es la primera vez que esta estrategia se aplica a la cadena de suministro de combustibles automotrices en México. La principal contribución de este trabajo es mostrar cómo se seleccionarían los elementos críticos de la compleja red mexicana para construir y/o desarrollar un modelo de optimización simplificado. Contiene los puntos potenciales de interrupción que dan resultados equivalentes al modelo complejo y brinda suficiente información a los tomadores de decisiones sobre las necesidades de expansión de la infraestructura a largo plazo.

2.2. Cadena nacional de suministro de combustibles automotrices

La cadena de suministro de combustibles automotrices en México está liderada por Petróleos Mexicanos. Hasta 2013, la otrora Empresa Subsidiaria Pemex Refinación fue el único organismo responsable del desarrollo de la infraestructura para la cadena de suministro de petrolíferos, lo cual incluía la producción en sus seis refinerías, además de la importación, transporte y almacenamiento de combustibles, así como el manejo de estaciones de servicio, algunas propias y otras en el esquema de franquicia. A raíz de la Reforma Energética y la prohibición para una integración vertical, Pemex se reestructuró como Empresa Productiva del Estado, separando la operación y la infraestructura en dos Empresas Productivas Subsidiarias. En primer lugar, Pemex Transformación Industrial, quien opera y es propietaria de las seis refinerías existentes —más la refinería de Dos Bocas, una vez que concluya el proyecto—, así como el área comercial, que administra el comercio exterior y la Franquicia Pemex. Por otro lado, Pemex Logística, quien opera y administra los seis subsistemas de poliductos, 73 Terminales de Almacenamiento y Reparto (TAR) y cuatro terminales marítimas.

La capacidad de refinación en México alcanzó un máximo operativo de 1.2 millones de barriles de crudo por día en los últimos diez años. Sin embargo, la producción de gasolina y diésel fue inferior a las ventas internas en casi un 40%, según informó la Secretaría de Energía de México (2020) [45]. No obstante que se está construyendo una nueva refinería, al agregar la nueva producción, la oferta nacional seguirá siendo insuficiente. Por tanto, el comercio exterior será necesario para satisfacer la demanda local.

Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

En cuanto a la cadena de distribución, la infraestructura de Pemex Logística, Tabla 1, se ha venido complementando con otros medios de transporte, como autos tanque, carros tanque y buques tanque, cuyo costo unitario de transporte es superior a la tarifa autorizada por la CRE para el transporte por ducto. Este segmento de la cadena de valor ha sido, desde la entrada en vigor de la Reforma Energética, el que mayor interés ha captado entre los inversionistas privados, cuya participación va en aumento con diez proyectos mayores en ejecución, enfocados al almacenamiento de hidrocarburos y que aportan una capacidad operativa de 10.6 MMB; más los correspondientes proyectos en proceso de autorización para la construcción de otras siete terminales con capacidad de 6 MMB.

Tabla 1. Infraestructura de Pemex Logística

Infraestructura (2018)	Noroeste	Noreste	Centro	Centro-Occidente	Sur-Sureste	Total
Terminales de Almacenamiento y Reparto	14	14	10	18	17	73
<i>Capacidad operativa, MMB</i>	<i>4.2</i>	<i>2.6</i>	<i>2.6</i>	<i>3.2</i>	<i>2.0</i>	<i>14.6</i>
Terminales Marítimas		1			3	4
<i>Capacidad operativa, MMB</i>		<i>0.4</i>			<i>7.3</i>	<i>7.7</i>
Poliductos	5	12	14	10	25	66
<i>Longitud, km</i>	<i>695</i>	<i>3,184</i>	<i>1,334</i>	<i>1,194</i>	<i>2,540</i>	<i>8,947</i>
<i>Capacidad operativa, mbd</i>	<i>137</i>	<i>439</i>	<i>1,021</i>	<i>397</i>	<i>1,787</i>	<i>3,781</i>

Fuente: Elaboración propia con información de Sener (https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/416897/Mapa_log_stica_Sener_8_Reg_31-10-2018_Nueva_numeraci_n_VF.pdf)

El segmento con menores barreras de entrada ha sido el de estaciones de servicio, en el que se ha observado la remodelación y el cambio de bandera de muchas instalaciones que antes eran Franquicia Pemex a otras marcas, así como proyectos para la construcción de nuevas estaciones de servicio, pero con suministro del producto desde las TAR de Pemex Logística. Cabe destacar el modelo de negocio desarrollado por Exxon Mobil, que estableció una alianza con la ferroviaria Kansas City Southern, para mandar producto desde sus refinerías en Texas, mediante trenes unitarios, hasta dos terminales propias en San Luis Potosí y San José de Iturbide, desde las que suministra su red de estaciones de servicio.

A medida que aumente la demanda, la dependencia de las importaciones será mayor y se requerirá nueva infraestructura para satisfacer el crecimiento de la cadena de suministro, independientemente del escenario analizado. Por lo tanto, el crecimiento de la infraestructura de la cadena de suministro debe garantizar la viabilidad de la distribución a un costo mínimo.

2.3. Refinación y distribución de petrolíferos

El proceso de refinación de crudo consiste en el tratamiento y transformación del petróleo crudo —materia prima— en productos refinados —petrolíferos— para su uso como combustibles o como insumos industriales. Dentro de la refinería se realizan procesos físicos y químicos, como se aprecia en la Figura 4.

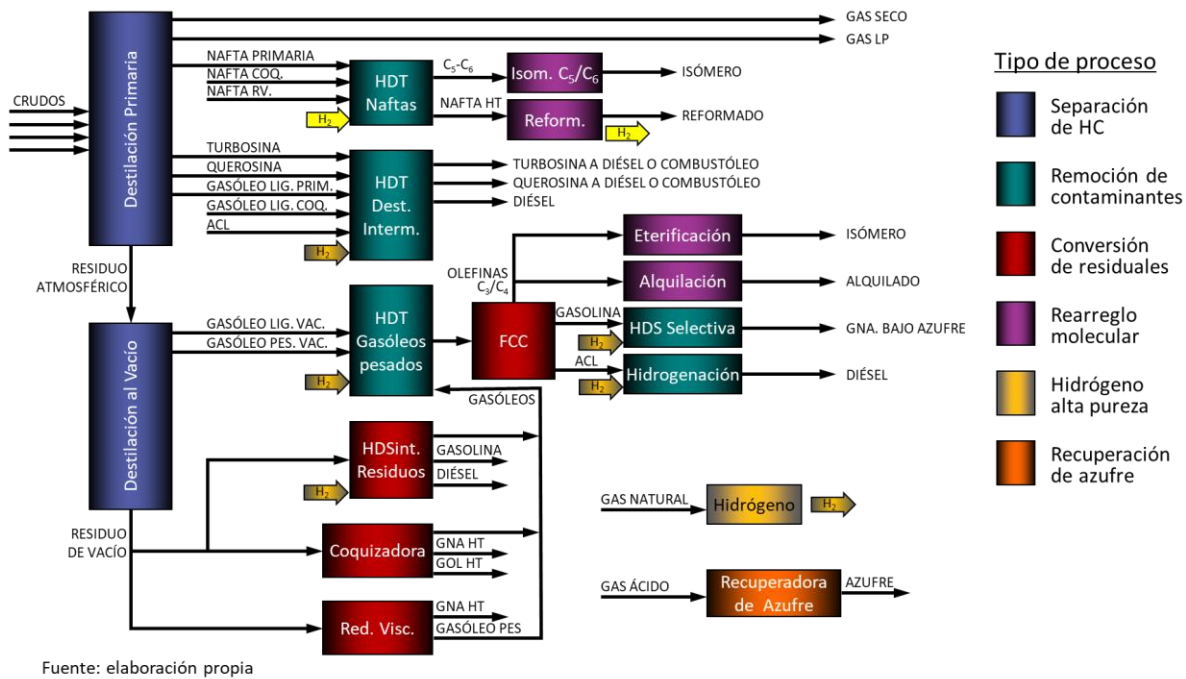
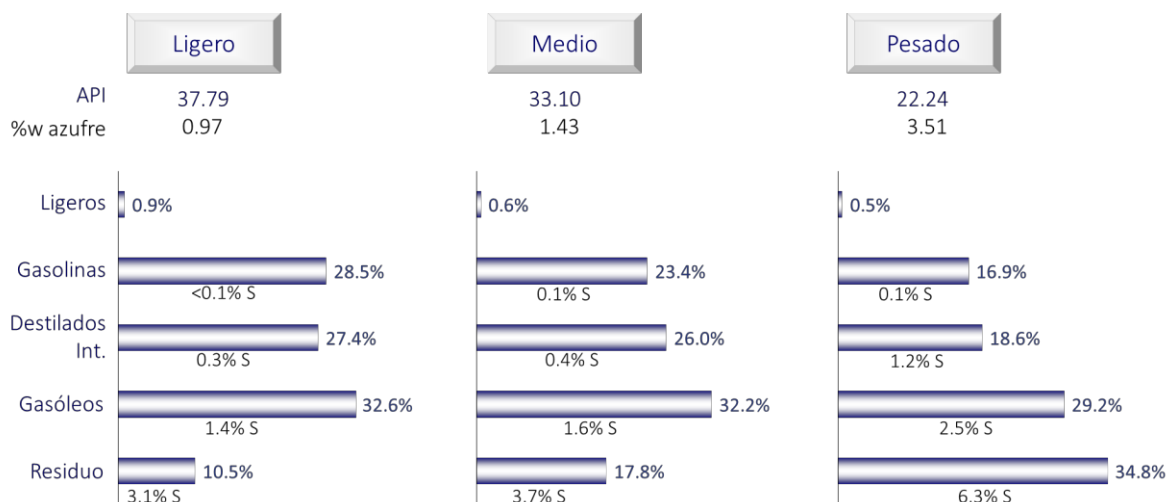


Figura 4. Esquema de los procesos de refinación

La producción de la refinería será función de la calidad de la materia prima alimentada. En la Figura 5 se muestran los rendimientos y calidad que se obtendrían en la destilación primaria para tres tipos diferentes de crudo. Así, una refinería obtendrá mayor cantidad de residuales al procesar un crudo pesado barato que uno ligero de mayor costo. Sin embargo, la mayor producción de productos ligeros —gasolina y diésel— que se obtiene del crudo ligero, podría compensar el sobreprecio de la materia prima.

Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

Otro factor que incide en las proporciones de la canasta de productos de la refinería es su propia configuración, es decir, los procesos de transformación disponibles. La destilación atmosférica separa el crudo en sus componentes básicos. La destilación al vacío permite separar gasóleos del residuo atmosférico. La reformación catalítica incrementa la calidad de la gasolina que se obtuvo durante la destilación. La planta FCC⁵ permite transformar los gasóleos de vacío en gasolina, diésel y olefinas. Estas últimas se transforman en gasolina de alta calidad en la planta de alquilación. La planta coquizadora permite convertir el residuo de vacío en gasolina, diésel y gasóleos. El proceso de *hydrocracking* consiste en la conversión de una fracción pesada en otra ligera, es decir residuo en gasóleo, gasóleo en diésel o diésel en gasolina. Así, se obtienen productos de mayor valor en las refinерías más complejas. Además, existe cierta flexibilidad para modificar las condiciones de proceso y orientar parcialmente la producción hacia la canasta de productos que maximice la utilidad del refinador. En la Figura 6 se muestran diferentes configuraciones de refinерías. Nótese que al incrementarse la complejidad de la refinерía —hacia la izquierda— se reduce la producción de residuales y aumenta la de destilados ligeros —gasolina y diésel.



Fuente: elaboración propia con datos de ensayos técnicos de laboratorio IMP-2010

Figura 5. Rendimientos de destilación para diferentes calidades de crudo

El desempeño económico de una refinería dependerá, más que de los precios absolutos de crudos y petrolíferos, de los diferenciales que existan entre ellos. Se identifican tres indicadores de precios con los que se podrá inferir el comportamiento del margen de refinación, a saber:

⁵ *Fluidized Catalytic Cracking*



CRUDO LIGERO – CRUDO PESADO. Este diferencial, Ecuación (1), indicará la ventaja de procesar una materia prima de menor valor, sacrificando productos ligeros; o bien la conveniencia de pagar por un crudo de mayor valor y obtener una mejor canasta de productos refinados. Un valor alto favorece a refinerías complejas, mientras que un diferencial estrecho tiene efectos similares, independientemente de la configuración. Para el caso mexicano se utilizan los crudos Istmo (ligero/medio) y Maya (pesado):

$$\Delta_C = \$_{Istmo} - \$_{Maya} \quad (1)$$

Unidades de proceso	Compleja con hydrocracker	Compleja con coquizadora	FCC/alkilación	FCC	Hydroskimming
Destilación primaria	✓	✓	✓	✓	✓
Destilación al vacío	✓	✓	✓	✓	✓
Reformación catalítica	✓	✓	✓	✓	✓
FCC	✓	✓	✓	✓	
Alquilación	✓	✓	✓		
Coquización	✓	✓			
Hydrocracker	✓				
Rendimientos					
<ul style="list-style-type: none"> ■ Gasolinas ■ Destilados intermedios ■ Residuales 					
Evolución cronológica ←					
Valor relativo de los productos	1.00	0.98	0.95	0.93	0.84

Fuente: elaboración propia con resultados de corridas de Petrosim 2014

Figura 6. Desempeño relativo de diferentes configuraciones de refinerías

PRODUCTOS LIGEROS – PESADOS. Este indicador, normalmente calculado como el promedio entre los precios de gasolina y diésel menos el precio del combustóleo, Ecuación (2), manda la señal sobre la utilidad relativa entre configuraciones. Diferenciales amplios indican ventajas para las refinerías complejas, mientras que valores pequeños favorecen a los procesos simples.

$$\Delta_P = \frac{\$_{Gasolina} + \$_{Diésel}}{2} - \$_{Combustóleo} \quad (2)$$

CRACK SPREAD. Este diferencial es un indicador de la ventaja de procesar mayor o menor cantidad de crudo dentro de la refinería y cada refinador utiliza el que mejor represente su

Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

configuración. Muchas refinерías, incluyendo el Sistema Nacional de Refinación, utilizan la diferencia entre el precio del crudo y el precio ponderado de los productos de la refinерía. En este trabajo se utiliza el promedio entre los precios de gasolina y diésel contra el precio del crudo Istmo, Ecuación (3).

$$CS = \frac{\$Gasolina + \$Diésel}{2} - \$Istmo \quad (3)$$

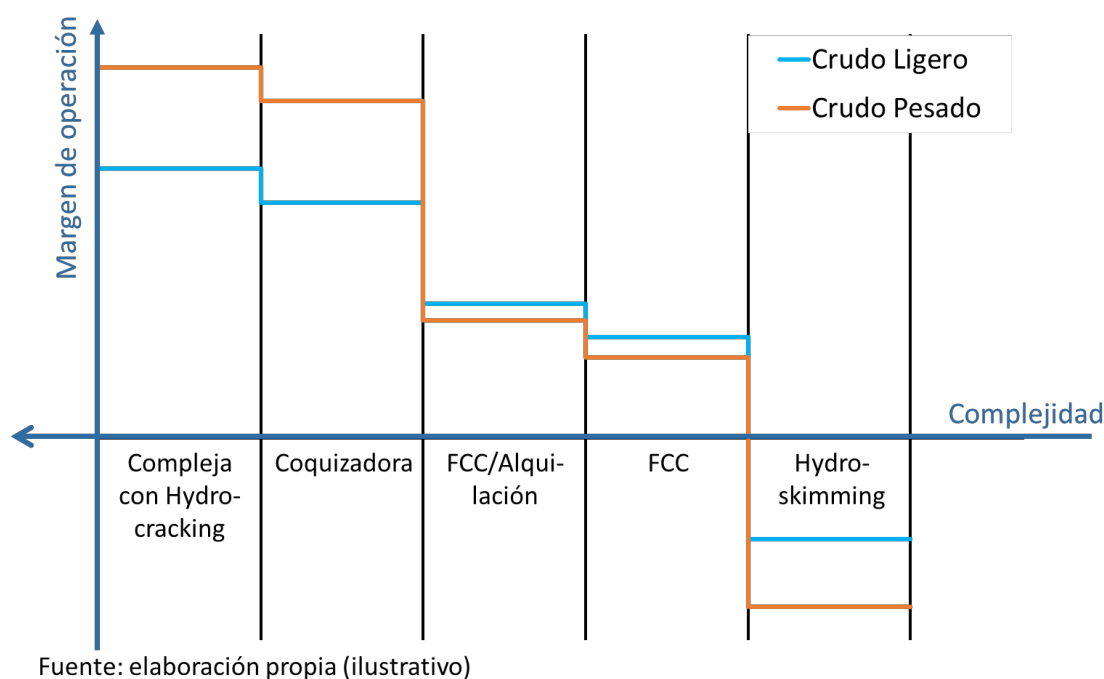


Figura 7. Variaciones en el margen de refinación (ilustrativo)

El impacto de la configuración de la refinерía sobre los márgenes de operación se puede apreciar en la Figura 7. La variación entre los diferenciales de precios antes mencionados se vería como el acercamiento —o la separación— entre las líneas de crudo ligero y crudo pesado. Nótese que para configuraciones sencillas se tienen mejores márgenes con crudo ligero, mientras que para configuraciones complejas es mejor el crudo pesado.

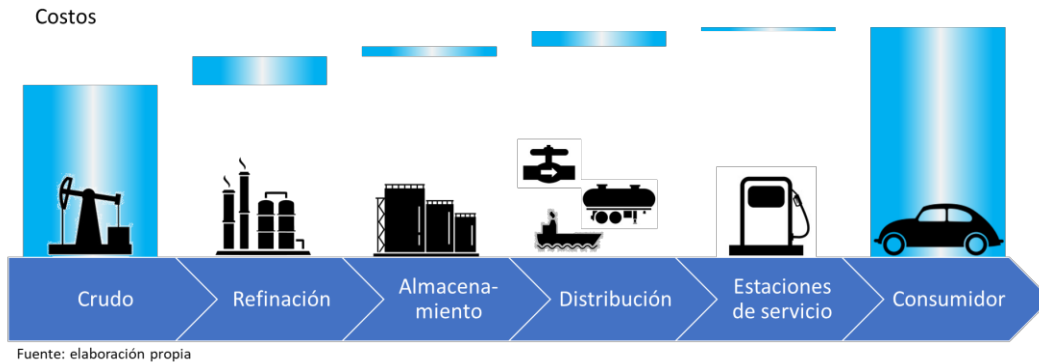


Figura 8. Contribución de costos a lo largo de la cadena de suministro

Para que la producción de gasolina y diésel de las refinерías llegue al usuario final, es necesario que pase a través de la cadena de distribución, incrementando el costo del producto que determinará el precio al público, como se esquematiza en la Figura 8.

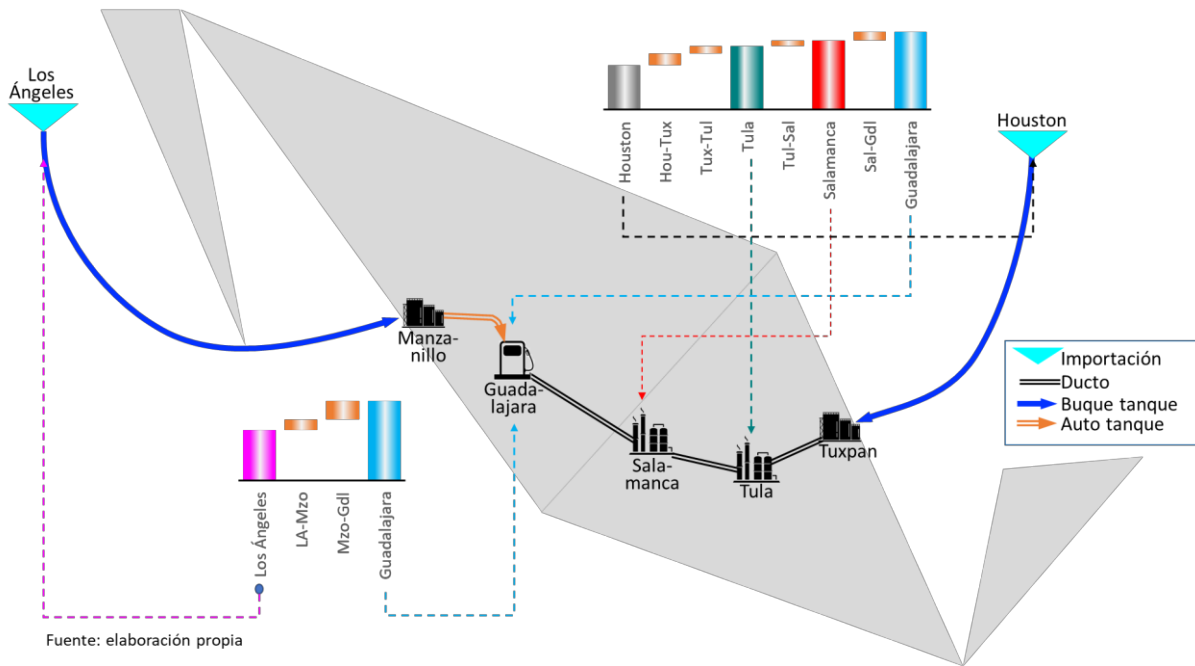


Figura 9. Logística de las diferentes alternativas de suministro a Guadalajara

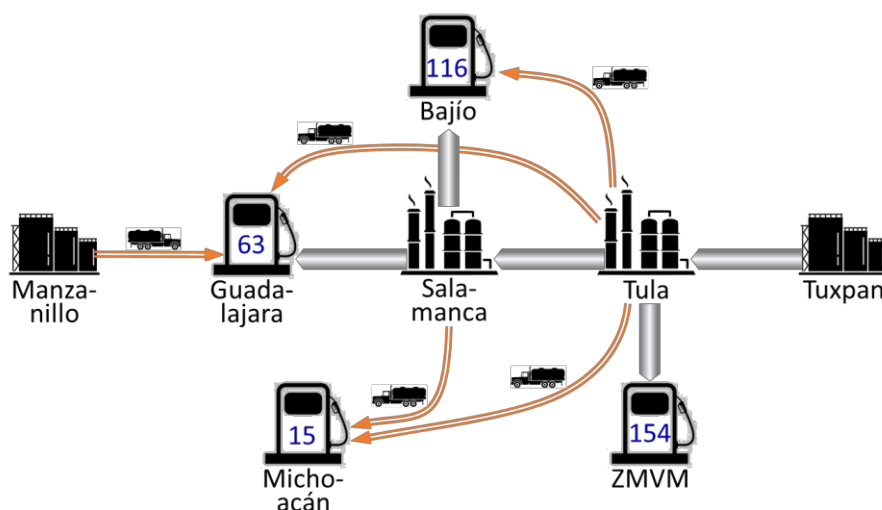
Como se mencionó anteriormente, la producción de las refinерías entrará en competencia con las importaciones, de tal manera que los costos de logística serán determinantes para estimar la rentabilidad de la cadena de suministro, o bien para establecer el precio de equilibrio en un esquema de libre competencia. Para ilustrar esta situación, se analiza el precio de gasolina regular en la zona metropolitana de Guadalajara, considerando diferentes esquemas de

Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

suministro, como se ve en la Figura 9. Se tienen al menos cuatro opciones de suministro hacia Guadalajara:

- Producto importado desde Houston, transporte por buque tanque a la terminal marítima de Tuxpan, almacenamiento en Tuxpan y luego transporte por poliducto desde Tuxpan hasta Tula-Salamanca-Guadalajara.
- Producción en la refinería de Tula y transporte por poliducto de Tula-Salamanca-Guadalajara.
- Producción en la refinería de Salamanca y transporte por poliducto de Salamanca a Guadalajara.
- Producto importado en Los Ángeles, transporte por buque tanque a la residencia de operación portuaria de Manzanillo, almacenamiento en la TAR Manzanillo y luego por auto tanque a la TAR Guadalajara.

Nótese que, si la refinería de Tula puede suministrar el producto (ventas de primera mano) a un mejor precio que la cotización en Houston más la logística Houston-Tuxpan-Tula, será más competitivo que el importador. Por el contrario, si la refinería de Salamanca no puede ofrecer un precio inferior al equivalente Houston-Tuxpan-Tula-Salamanca o Tula-Salamanca, estará fuera de la competencia. Asimismo, la importación desde Los Ángeles compite agregando los costos de logística hasta Guadalajara vía Manzanillo. Esto resulta trivial para una sola localidad, pero debe considerarse que, además de la TAR Guadalajara, el análisis ha de considerar el suministro a todo el territorio nacional, minimizando los costos totales.



Fuente: elaboración propia con datos de www.sie.sener.gob.mx

Figura 10. Demanda promedio 2016 de las zonas Centro, Bajío y Occidente



La competencia entre productores define una parte de la cadena de suministro, pero ante un escenario de escasez en la oferta, la competencia entre nodos por el producto también determina la operación global del sistema. Para ejemplificarlo se presenta un análisis de vulnerabilidad para la Zona Metropolitana de Guadalajara. En la Figura 10 se presenta un esquema de la distribución a las zonas Centro, Bajío y Occidente y la demanda de combustibles automotrices observada en 2016. La producción de las refinerías de Tula y Salamanca es insuficiente para suministrar las demandas del Bajío y de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), de modo que se tendrá que complementar con importaciones. Además, la capacidad de los ductos está limitada, por lo que forzosamente deberá realizarse transporte por auto tanque, pero la decisión no es trivial cuando se trata de minimizar el costo total del sistema.

Si se busca la competitividad en la zona del Bajío o en la ZMVM, el volumen disponible para Guadalajara se verá disminuido y tendrá que complementarse mediante transporte por auto tanque, ya sea desde Tula o mediante importaciones vía Manzanillo. Por el contrario, si minimizamos el costo de suministro a Guadalajara, el volumen hacia las otras zonas se reduce y tendría que utilizarse una opción con mayor costo. Dado que Guadalajara está al final de esa rama de la cadena de suministro, tiene mayor vulnerabilidad que las terminales más cercanas a las refinerías o a las terminales de importación.

2.4. Optimización matemática

Los conceptos de optimización y simulación son frecuentemente interpretados, de manera errónea, como sinónimos. Si bien existe una gran relación entre ellos, sus usos e interpretaciones resultan algo diferentes, aunque en muchas ocasiones complementarios. En la Tabla 2 se resumen ambos términos de manera conceptual y matemática.

Tabla 2. Conceptos básicos de la Investigación de Operaciones

	Modelación	Simulación	Optimización
Conceptual	Símil de la realidad. Grado de complejidad según necesidades	Predice el comportamiento del sistema a ciertas condiciones	Selecciona la mejor alternativa, de acuerdo a un objetivo planteado
Matemático	Conjunto de ecuaciones que trata de reproducir un ente o fenómeno físico	Resuelve las ecuaciones una vez agotados los grados de libertad	Juega con los grados de libertad para seleccionar la mejor alternativa



Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

MODELACIÓN. Como primer paso, definiremos el concepto de modelo como un símil de la realidad. Por ejemplo, un modelo a escala de un avión se parecerá en forma y proporciones al objeto real, pero su funcionamiento dejará mucho que desear; un avión de papel cumplirá relativamente el objetivo de volar, aunque su forma será algo diferente a un avión real; el modelo matemático de un simulador de vuelo tendrá una aplicación práctica para el entrenamiento de los futuros pilotos, pero no tendrá las características físicas del objeto original.

Existen un gran número de ejemplos de modelos que se crean con diferentes objetivos y diferentes niveles de abstracción, por lo que es primordial tener clara la utilización que se dará al modelo antes de crearlo. Desde el punto de vista matemático, un modelo es un conjunto de ecuaciones con las que se pretende representar un ente o fenómeno físico. En este caso también debe plantearse el uso del modelo antes de crearlo, ya que el nivel de complejidad de éste será crucial en los resultados y en el esfuerzo invertido para su solución. Cada una de las incógnitas representará un parámetro característico que se presenta en el ente real, como dimensión, temperatura, presión, tiempo, etc. Las ecuaciones serán la relación que existe entre las variables del sistema.

SIMULACIÓN. El concepto de simulación trata de reproducir la realidad o predecir su comportamiento. Un simulador de vuelo que utiliza el concepto de *realidad virtual* trata de reproducir el entorno en el cual se encontraría el usuario al pilotear un avión de verdad; mientras que un simulador de vuelo para los pasajeros a bordo hace un trazo sobre un mapa, que representa la ruta que recorre el avión, presentando la velocidad, altitud y tiempo estimado de recorrido.

Desde el punto de vista matemático, la simulación se enfoca más en la predicción del comportamiento de las variables características del sistema, dado un estado específico en el que se encuentre. Para ello, se utiliza un modelo matemático y se resuelven las ecuaciones necesarias. Inclusive pueden presentarse casos en que existe incertidumbre sobre los parámetros del sistema, o bien éstos tienen un comportamiento aleatorio. En tal caso se resuelve múltiples veces el modelo, variando los parámetros con incertidumbre dentro de los valores que pudieran tomar y así obtener la esperanza matemática para la solución.

OPTIMIZACIÓN. La optimización consiste en la búsqueda de la mejor alternativa, de acuerdo con un objetivo planteado, pero cumpliendo con un cierto número de restricciones. Un proceso puede optimizarse mediante la experiencia, sin necesidad de utilizar un modelo como herramienta. Una característica importante de la optimización radica en que se tienen varias opciones para resolver el problema, de entre las cuales habrá alguna mejor, de acuerdo con el parámetro de medición indicado. Un problema de optimización, mejor conocido como progra-



mación matemática, juega con los grados de libertad del sistema para encontrar la combinación de las variables de decisión que mejor resultado arrojen para la función objetivo planteada y que cumplan con el conjunto de restricciones que representan al sistema.

$$\begin{array}{ll} \text{Maximizar (o minimizar)} & Z = c(x) \\ \text{Sujeto a} & \begin{cases} f(x) = b_1 \\ g(x) \geq b_2 \\ h(x) \leq b_3 \end{cases} \end{array} \quad (4)$$

La forma general para un problema de programación matemática se expresa mediante el sistema de ecuaciones (4), en donde Z es la función objetivo, $c(x)$, $f(x)$, $g(x)$ y $h(x)$ son relaciones matemáticas entre las variables de decisión x y las constantes b_1 , b_2 y b_3 , que representan límites físicos que restringen al sistema. Las ecuaciones pueden ser lineales o no lineales, mientras que las variables pueden ser continuas o discretas, inclusive binarias.

La función objetivo normalmente es una expresión económica o de proceso, como maximizar ganancias o minimizar costos, maximizar producción o minimizar emisiones, etc. Las restricciones existentes en el sistema representan límites físicos de proceso, como consumo de materiales o capacidad de las instalaciones; comerciales, como contratos de suministro o compromisos con clientes; financieros, como disponibilidad de recursos, riesgo tolerable, etc. Por ejemplo, si queremos minimizar el costo energético de un proceso, al no operarlo no se consume energía y esa sería la solución, pero el sentido común nos indica que no es lo que buscamos. Entonces, el problema debe plantearse indicando los niveles de recursos y necesidades adecuados para el sistema específico. Otras restricciones que generalmente no se indican explícitamente por ser obvias tienen que ver con el significado real de cada variable, como puede ser la no negatividad de la producción o del tiempo utilizado. En el proceso de búsqueda de la solución óptima, se prueban diferentes combinaciones de las variables de decisión y se resuelve el sistema hasta llegar a una alternativa que no se pueda mejorar.

Los métodos de solución para los problemas de programación matemática son tan variados como su propia naturaleza. Existen modelos de programación lineal, en los que tanto la función objetivo como las restricciones están conformados por relaciones lineales; programación cuadrática, cuando las restricciones son expresiones de segundo grado en \mathbb{R}^n ; programación no lineal, donde al menos una de las relaciones está expresada mediante relaciones no lineales; programación entera, cuando todas las variables únicamente permiten variables discretas; programación binaria, con variables del tipo 0 ó 1; programación mixta entera, cuando algunas variables son continuas y otras discretas.

Tabla 3. Principales definiciones de la programación matemática

1 Variable ($x \in \mathbb{R}$)	Multivariable ($x \in \mathbb{R}^n$)
Definición general de óptimo	
Máximo $f(x^*) \geq f(x^* \pm \Delta x); \quad \forall \Delta x$	$f(x^*) \geq f(x^* \pm \Delta x); \quad \forall \Delta x$
Mínimo $f(x^*) \leq f(x^* \pm \Delta x); \quad \forall \Delta x$	$f(x^*) \leq f(x^* \pm \Delta x); \quad \forall \Delta x$
Programación lineal	
Planteamiento	
Problema: Minimizar: cx Sujeto a: $a \leq x \leq b$	Problema primal Minimizar: cx Sujeto a: $Ax \leq b; \quad x \geq 0$ Problema dual Maximizar: wb Sujeto a: $wA \leq c; \quad w \geq 0$
Punto óptimo $x^* = a$ si $c < 0$ $x^* = b$ si $c > 0$	Condiciones de <i>Khun-Tucker</i> 1. $Ax^* \geq b, \quad x^* \geq 0$ 2. $w^*a \leq c; \quad w^* \geq 0;$ 3. $w^*(Ax^* - b) = 0;$ $(c - w^*A)x^* = 0$
Programación no lineal	
Condiciones de optimalidad	
Primera derivada: $f'(x^*) = 0$	Gradiente: $\nabla(x^*) = \left(\frac{df}{dx_1} \quad \frac{df}{dx_2} \quad \dots \quad \frac{df}{dx_n} \right) = 0$
Máximo	
Segunda derivada negativa: $f''(x^*) < 0$	Matriz Hessiana negativa definida: $H(x^*) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} \end{pmatrix} < 0$
Mínimo	
Segunda derivada positiva: $f''(x^*) > 0^*$	Matriz Hessiana positiva definida: $H(x^*) > 0$
Punto de inflexión (punto de silla):	
Derivada de orden superior diferente de cero es impar.	Matriz Hessiana no definida



El tratamiento matemático estricto no forma parte de los objetivos de esta investigación y puede ser consultado en una amplia bibliografía. En la Tabla 3 se resumen los principales aspectos matemáticos para los problemas de programación matemática. Asimismo, los algoritmos de solución quedan fuera del alcance de este trabajo, por lo que tampoco se abordará el tema con mayor profundidad. Basta con mencionar que en los ejercicios de optimización que se realizaron para este trabajo se utilizó GRTMPS⁶, que es un software comercial, con una licencia académica cortesía de Haverly Systems Inc.

2.5. Modelación

Antes de construir un modelo de simulación o de optimización se deben tener claros los alcances y usos de éste. Si bien un mayor nivel de detalle en la modelación ofrece resultados más precisos, también demanda más recursos para su construcción, mantenimiento y operación. También debe considerarse el nivel de certidumbre sobre los datos utilizados y la consistencia entre las diferentes fuentes consultadas y aquellas que servirán para obtener la información necesaria para su ejecución posterior.

En el caso particular de la cadena de suministro de petrolíferos, se pueden encontrar modelos detallados de los procesos de transformación dentro de una refinería, que consideren la cinética química, fenómenos de transporte —de *momentum*, de calor y de masa— y los balances de materia y energía. Sin embargo, la utilización de estos modelos complejos está enfocada, entre otros, al diseño de equipos, diagnóstico operativo del proceso y entrenamiento de los operadores. Para un escenario económico a largo plazo es intrascendente conocer, por ejemplo, la temperatura y presión del efluente de un reactor cuando el catalizador tiene 30% de vida útil. Un modelo más sencillo del proceso será suficiente para conocer los volúmenes promedio que podrá ofertar una refinería ante un escenario dado.

Para el transporte y distribución ocurre algo similar. Se pueden tener modelos que calculan el perfil hidráulico de una tubería a lo largo de toda su trayectoria, caídas de presión y la potencia requerida en el equipo motriz. Este nivel de detalle también resulta excesivo para la toma de decisiones en el largo plazo, en donde el principal interés es saber los volúmenes factibles de transportar de un punto a otro de la red, así como el costo asociado.

Para el almacenamiento de combustibles se puede construir un modelo que considere la capacidad de cada uno de los tanques, el nivel existente en un momento determinado y los

⁶ *Generalized Refining Transportation Marketing Planning System*

Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

flujos de entrada y salida con respecto al tiempo de cada uno de los productos a una terminal. Un modelo así sería sumamente útil en el corto plazo para la programación de operaciones y la lotificación de cada uno de los productos hacia y desde la terminal, así como el medio de transporte a utilizar. Este tipo de modelos también son útiles para determinar el tamaño requerido para una terminal nueva o para la expansión de una existente. No obstante, en un horizonte de largo plazo no es necesario conocer si la gasolina regular llega a la terminal el miércoles a las 19:30 horas al tanque TV-501 o si hay 12 autos tanque programados para el sábado.

Es importante mencionar que, si bien los modelos complejos mencionados anteriormente proporcionan información muy precisa sobre la cadena de suministro, se requiere un gran esfuerzo para su construcción y mantenimiento, así como para el manejo de los datos que se deben suministrar al modelo.

Es común encontrar en la literatura comparaciones entre los tiempos de solución de diferentes modelos, pero poco se menciona acerca del esfuerzo para la construcción de éstos, que requiere una fase de planeación, minería de datos, diseño del modelo y su estructura matemática, programación y pruebas de desempeño. Una vez liberado el modelo, además de comparar los tiempos de solución, es necesario considerar los esfuerzos para la alimentación de datos y creación de escenarios, así como para la lectura y análisis de resultados. Finalmente, la parte que puede resultar más laboriosa es el rastreo de errores e infactibilidades, debidos al planteamiento matemático del modelo o a inconsistencias en los datos que representan el escenario.

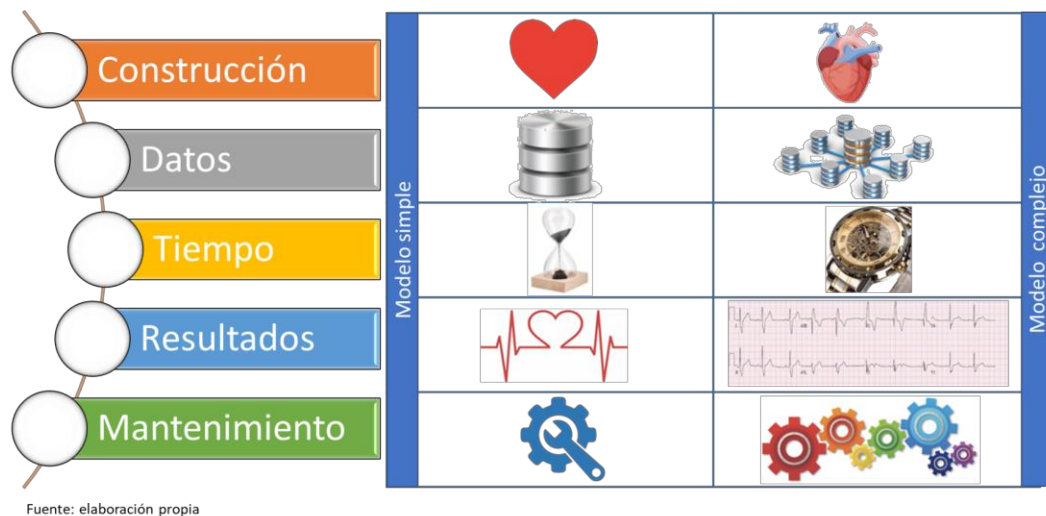


Figura 11. Análisis conceptual de la complejidad del modelo



La decisión sobre la complejidad del modelo, así como sobre la plataforma de modelación —licenciamiento de software o desarrollo propio—, deberá considerar no sólo un análisis de necesidades, sino que también deben tomarse en cuenta los recursos disponibles —humanos, técnicos y económicos— necesarios para su construcción, mantenimiento y operación durante su ciclo de vida. Los principales puntos que se deben considerar se muestran en la Figura 11 y son:

CONSTRUCCIÓN. En esta fase se debe hacer una clasificación adecuada de los datos requeridos, distinguiendo entre aquellos que serán la parte fija del modelo, que representan a la infraestructura y a la tecnología; y los datos variables que representan el entorno económico, como oferta, demanda y precios. Se plantean las relaciones matemáticas entre las diferentes variables del sistema y se capturan utilizando la nomenclatura específica de la plataforma seleccionada. Resulta evidente que al incrementarse el tamaño y alcance del modelo se tendrá un sistema de ecuaciones cada vez más complejo y requerirá de algoritmos de solución más sofisticados, de tal suerte que se tendrá que procurar un equilibrio entre el modelo y el nivel de respuesta esperada. Es recomendable probar la estructura matemática con un modelo pequeño e irlo creciendo paulatinamente, de modo que se puedan detectar errores más fácilmente y probar que el resultado del problema matemático represente adecuadamente el problema real.

MINERÍA DE DATOS. La recopilación de datos es la parte más importante para un modelo. Datos erróneos arrojarán resultados inútiles. Es necesario analizar toda la información y validar que los datos sean representativos del sistema a modelar y que no sean producto de un caso de excepción —por ejemplo, el desempeño de una máquina industrial durante una falla en alguna de sus partes—, en cuyo caso deben ser depurados. También es muy importante seleccionar al menos un juego de datos “testigo”, que se utilice para probar que el resultado del modelo represente de manera razonable el desempeño real del sistema. Además, se deben definir los datos necesarios para representar un determinado escenario —que será requerido durante la fase de operación del modelo— y la estrategia para hacer predicciones o proyecciones hacia el largo plazo.

No es raro que falten datos para la construcción de un modelo o que la certidumbre sobre éstos no esté garantizada. Si así fuera el caso, se puede recurrir a la literatura —buscando sistemas similares al que se está modelando—, o mediante la utilización de modelos más complejos ya probados y validados.

TIEMPO. Las diferentes etapas del ciclo de vida de un modelo matemático (ver Figura 12) consumen tiempo en función de la complejidad del modelo. En la fase de modelación, para la

Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

recolección y análisis de los datos y durante la construcción y pruebas de desempeño del modelo. Una vez liberado, se requerirá tiempo para capacitar al personal que hará uso del mismo, para generar los datos que representen los diferentes escenarios de análisis, tiempo de cómputo para la solución y posteriormente para el análisis e interpretación de resultados. Un aspecto fundamental para tomarse en cuenta desde el diseño del modelo es la prontitud con la que se requerirá una respuesta para apoyar la toma de decisiones.

RESULTADOS. Un modelo de gran tamaño o muy complejo arrojará una gran cantidad de datos, los cuales tendrán que ser analizados e interpretados por el operador del modelo y transmitidos al tomador de decisiones. La posibilidad de generar reportes ejecutivos de manera automática es un esfuerzo que vale la pena realizar durante la fase de modelación o en las etapas tempranas de su utilización. Los resultados del modelo deben ser claros, reproducibles y con el nivel de precisión requerido como soporte de la toma de decisiones, pero principalmente, deben ser oportunos.

MANTENIMIENTO. Los modelos son dinámicos. La información tecnológica puede variar con el tiempo, ya sea por el deterioro natural de los equipos, cambios en especificaciones de productos o materias primas, prácticas operativas o mejoras tecnológicas. Ante cualquiera de estos escenarios, será necesario actualizar el modelo para garantizar que siga representando al sistema de manera razonable. El mantenimiento de un modelo complejo puede resultar tan laborioso —e inclusive más— que la construcción de un modelo nuevo. Es altamente recomendable contar con la documentación soporte del modelo, que incluya la fuente y validez de los datos utilizados, diagramas de flujo, los criterios utilizados para definir y modelar las relaciones matemáticas, los resultados obtenidos para los escenarios de prueba, resumen de la nomenclatura utilizada, etc.



Fuente: elaboración propia, basado en la experiencia del autor

Figura 12. Ciclo de vida típico de los modelos matemáticos



Finalmente, debe considerarse que el perfil de la persona que desarrolla y mantiene el modelo, no necesariamente coincide con el de los usuarios finales. El nivel de entendimiento de las operaciones y del tipo de respuesta que se espera durante su ejecución son fundamentales para el diseño de un modelo práctico y confiable.

3. Metodología

El primer paso para determinar la rentabilidad del crecimiento de la cadena de suministro de combustibles automotrices fue la construcción del modelo de optimización, que dio origen al artículo *A practical model for the supply chain growth optimization for automotive fuels in Mexico (2020)* [46], en el que se hizo una descripción detallada del MOSNR y del MOSCA, se explicó el proceso de simplificación y se demostró la equivalencia entre los resultados de ambos modelos como soporte para la toma de decisiones.

Una vez que se tuvo construido y validado el modelo de optimización, se definieron los escenarios de demanda y de precios a utilizar. Después se definieron las posibles inversiones para el crecimiento de la infraestructura de ductos y finalmente se probaron dos estrategias para el tratamiento de las inversiones.

3.1. Modelo

MODELOS DE REFINERÍAS. Dado el alto nivel de dependencia de las importaciones, la optimización rigurosa de las refinerías queda relegada a segundo plano, pues mientras más producto puedan aportar a la cadena de suministro, su contribución a minimizar el costo total del sistema será mayor. Así que no es necesario recurrir a una simulación rigurosa y ni a la optimización detallada de los procesos de refinación, sino que únicamente se considera una visión simplificada que permita explorar la operación promedio de las refinerías en el largo plazo. Para ello se utilizan los resultados de una herramienta de optimización comercial, como lo describe Grimaldo (2018) [47].

En primer lugar, se hace un cruce de diferenciales amplios y estrechos para crudos, contra diferenciales amplios y estrechos para productos, construyen cuatro escenarios extremos. Con estos juegos de precios se obtuvieron cuatro modos de operación típicos para cada refinería, utilizando el software H/COMET⁷. Se trata de una herramienta comercial, propiedad de Haverly Systems, Inc., la cual ofrece modelos de optimización para diferentes refinerías a nivel

⁷ <https://www.haverly.com/main-products/13-products/11-hcomet>

Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

mundial, basados en información pública de las propias empresas. Integra la base de datos Chevron⁸, con la caracterización fisicoquímica de crudos de todo el mundo y predice la operación de las refinerías basándose en modelos de proceso desarrollados por Jacobs⁹ para sus actividades de consultoría. En el caso del SNR incluye los modelos para las seis refinerías existentes, con las características publicadas por Petróleos Mexicanos en su Memoria de Labores.

Para cada una de las refinerías y cada uno de los cuatro escenarios de precios se optimizó la producción de la refinería. Se realizaron corridas con crudos Istmo y Maya puros, así como con varias mezclas de éstos, de manera que se corroboró que la producción al procesar una mezcla se puede reproducir de manera razonable mediante una combinación lineal de las producciones que se obtienen con los crudos puros, utilizando las mismas proporciones. Con estos resultados se construyó un cubo de datos que, dado un escenario de precios y la mezcla de crudo alimentada, se puede predecir la producción para cada refinería, así como los niveles de utilización de sus plantas principales. En la Figura 13 se ejemplifica esta aseveración.

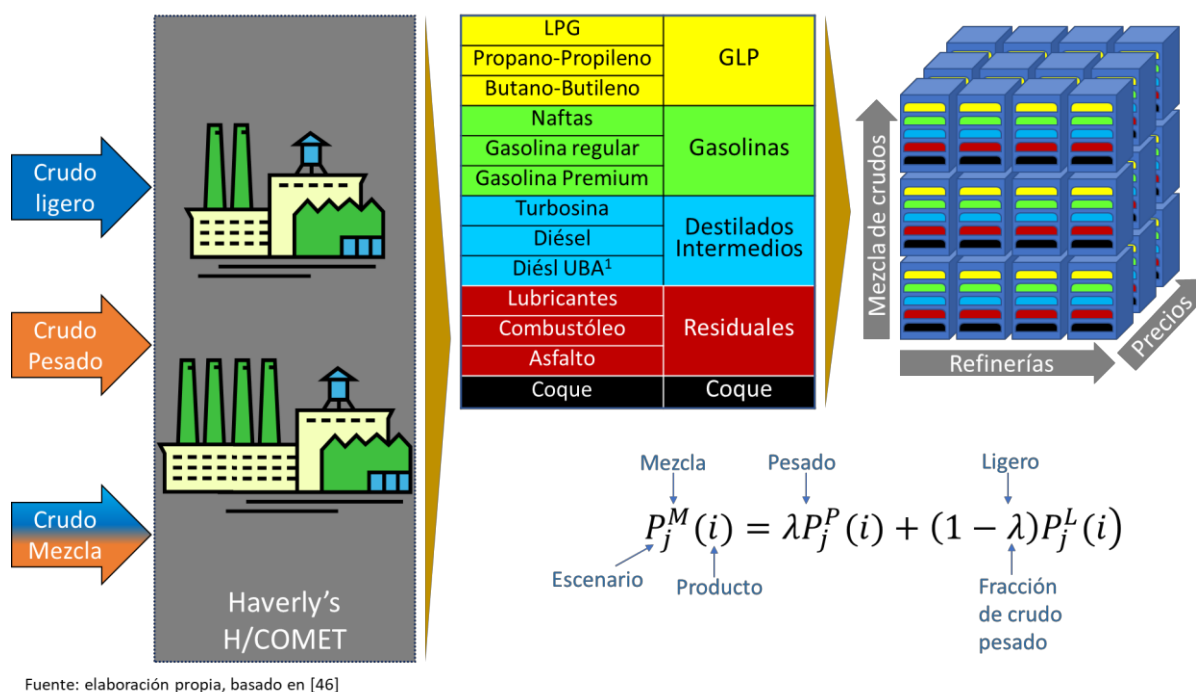


Figura 13. Construcción del cubo de datos de producción de petrolíferos

⁸ Base de datos de análisis típicos de laboratorio para 1850 crudos a nivel mundial

⁹ Empresa líder de consultoría para la industria de refinación



Dado que la mezcla de crudo a procesar en cada refinería es desconocida y su optimización dependerá de los escenarios de precios a explorar, se utilizaron los datos del cubo como matriz tecnológica para desarrollar el modelo simplificado de optimización de refinerías. La primera aproximación para el modelo, sistema de ecuaciones (5), fue simplemente seleccionar como variables de decisión los volúmenes de cada uno de los tipos de crudo en los cuatro modos de operación:

$$\begin{aligned} \text{Maximizar:} \quad & Z = \sum_{p \in P} C p_p P_p - \sum_{\gamma \in Q} C q_\gamma Q_\gamma \\ \text{Sujeto a:} \quad & \\ \text{[Producción]} \quad & P_p = \sum_{\gamma \in Q} A_{\gamma p} Q_\gamma \quad \forall p \in P \quad (5) \\ \text{[Capacidad]} \quad & \sum_{\gamma \in Q} B_{\gamma h} Q_\gamma \leq K_h \quad \forall h \in K \\ & \text{Todas las variables} \geq 0 \end{aligned}$$

En donde:

$C p_p$ = Precio del producto p {LPG, gasolinas, destilados intermedios, residuales, coque}

P_p = Volumen de ventas del producto final p

$C q_\gamma$ = Precio del crudo γ {L1, L2, L3, L4, P1, P2, P3, P4} {{Ligero, Pesado} x 4 precios}

Q_γ = Volumen de crudo γ

$A_{\gamma p}$ = Rendimiento del producto p obtenido del crudo γ (lectura del cubo)

$B_{\gamma h}$ = Capacidad utilizada de la planta h al procesar el crudo γ

K_h = Capacidad máxima de la planta h

Los resultados obtenidos con esta formulación fueron insensibles a los diferentes escenarios de precios, ya que en el óptimo siempre se seleccionaba el modo de operación más eficiente para los crudos puros (por ejemplo, Pesado 3 y Ligero 2) con las combinaciones lineales entre ambos, de modo que el “óptimo” siempre era el mismo.

Una segunda aproximación se muestra en el sistema de ecuaciones (6), la cual consistió en hacer primero la mezcla de crudos y luego la combinación lineal de los cuatro juegos de precios, agregando el índice para controlar los diferentes modos de operación, de tal suerte que, si se seleccionaba el modo λ_m para un crudo, el otro también seleccionara el modo λ_m en la



Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

misma proporción. Para garantizar la combinación convexa de la mezcla, la suma de los modos de operación debe ser la unidad:

$$\begin{aligned}
\text{Maximizar:} \quad & Z = \sum_{p \in P} C p_p P_p - \sum_{\gamma \in Q} C q_\gamma Q_\gamma \\
\text{Sujeto a:} \\
\text{[Crudo]} \quad & -Q_\gamma + \lambda_m q_{m\gamma} = 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} \forall \gamma \in Q \\ m = 1 \dots 4 \end{array} \right. \\
\text{[Modo]} \quad & \sum_{m=1}^4 \lambda_m = 1 \\
\text{[Producción]} \quad & P_p = \sum_{m=1}^4 \sum_{\gamma \in Q} A_{m\gamma p} q_{m\gamma} \quad \forall p \in P \\
\text{[Capacidad]} \quad & \sum_{m=1}^4 \sum_{\gamma \in Q} B_{m\gamma h} q_{m\gamma} \leq K_h \quad \forall h \in K \\
& \text{Todas las variables} \geq 0
\end{aligned} \tag{6}$$

En donde:

λ_m = Modo de operación m {1...4}

$q_{m\gamma}$ = Crudo γ procesado en el modo de operación m

$A_{m\gamma p}$ = Rendimiento del producto p del crudo γ en el modo de operación m

$B_{m\gamma h}$ = Capacidad utilizada de la planta h con el crudo γ en el modo de operación m

Los resultados obtenidos con esta estructura fueron correctos. Sin embargo, se encontraron dos inconvenientes: el primero es que la formulación matemática propuesta para el balance de crudo es no lineal, lo cual conlleva complicaciones en el método numérico durante la solución; y segundo, y más importante, considera que una refinería se podría operar simultáneamente de maneras distintas. Dado que esto no representa una situación operativa realizable en las refinerías, se buscó la manera de seleccionar el modo de operación que maximice el margen promedio de la refinería. Esto se logró cambiando el balance de crudo y el modo de operación por el grupo de ecuaciones (7):

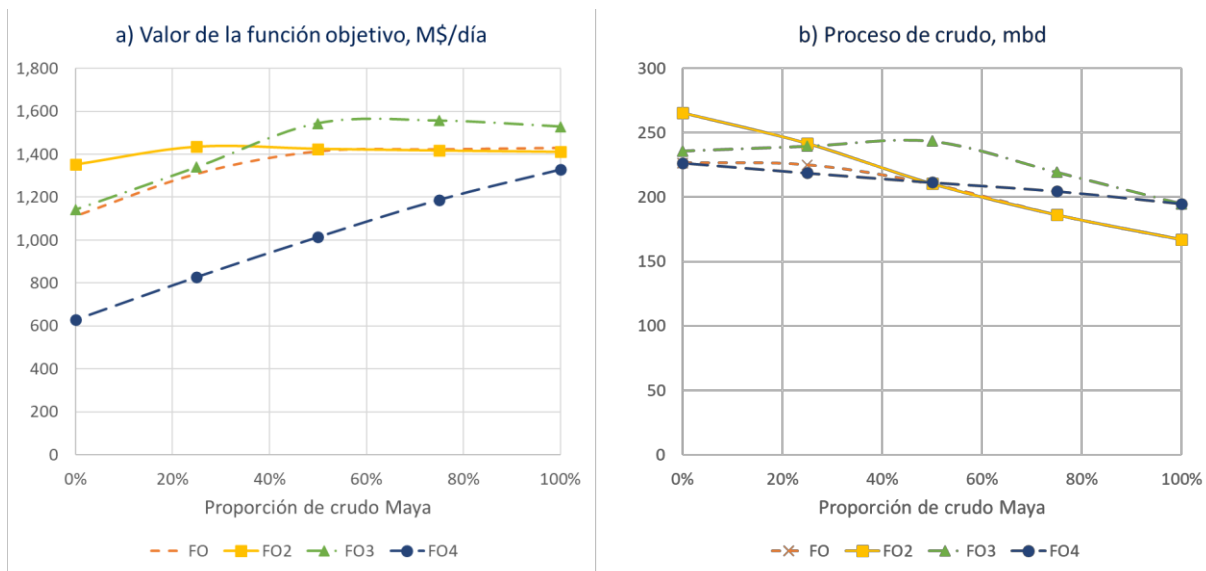


$$\begin{array}{lll}
 \text{[Crudo]} & -Q_\gamma + q_{m\gamma} \leq 999(1 - \lambda_m) & \left\{ \begin{array}{l} \forall \gamma \in \mathbf{Q}, \\ m = 1 \dots 4 \end{array} \right. \\
 \text{[Modo]} & q_{m\gamma} \leq 999\lambda_m & \left\{ \begin{array}{l} \forall \gamma \in \mathbf{Q}, \\ m = 1 \dots 4 \end{array} \right. \\
 \text{[OpÚnica]} & \sum_{m=1}^4 \lambda_m = 1 & \left\{ \begin{array}{l} \lambda_m \in \{0,1\}, \\ m = 1 \dots 4 \end{array} \right.
 \end{array} \quad (7)$$

El control de modo de operación será único al utilizar las variables binarias. Nótese que el flujo de crudo $q_{m\gamma}$ podrá tener valor únicamente si la variable $\lambda_m = 1$.

La estructura matemática resultante es lineal mixta entera y λ_m controla el modo de operación. Si se utiliza el modo de operación m , es decir $q_{m\gamma} > 0$, la ecuación para el modo de operación fuerza a que $\lambda_m = 1$. Al combinar este resultado con el balance de crudo, el volumen de crudo $q_{m\gamma}$ tiene que ser igual al volumen total de ese tipo de crudo Q_γ . Finalmente, la declaración de operación única garantiza que se seleccione uno y sólo uno de los modos de operación. El resultado se comprobó mediante dos optimizadores comerciales (LINGO y Excel), así como realizando la optimización lineal y técnicas de ramificación y acotamiento, coincidiendo el óptimo en los diferentes escenarios estudiados.

Al cambiar el escenario de precios se puede apreciar la sensibilidad del modelo ante estas variaciones, como se ejemplifica para la refinería de Cadereyta con un punto óptimo diferente para cada uno de los cuatro escenarios de precios, como se aprecia en la Gráfica 1.



Fuente: elaboración propia, basado en [46]

Gráfica 1. Optimización de la refinería de Cadereyta

Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

De manera similar se tienen los óptimos para las otras cinco refinerías, más las reconfiguraciones de Tula, Salamanca y Salina Cruz, así como para la refinería de Dos Bocas.

Tabla 4. Nomenclatura utilizada para los sistemas de distribución de combustibles automotrices

Sistema Rosarito		Sistema Norte		Sistema Sur-Golfo-Centro-Occidente	
EN	Ensenada	CY	Cadereyta	AG	Aguascalientes
MX	Mexicali	JU	Cd. Juárez	AÑ	Añil
RS	Rosarito	CH	Chihuahua	AS	ASA
		EP	El Paso	AZ	Azcapotzalco
		GP	Gomez Palacio	BM	Barranca
		KM	KM 0	CB	Charco Blanco
		MV	Monclova	CE	Celaya
		OC	Ojo Caliente	CÑ	Castañito
		RT	Retama	CV	Cuernavaca
		RY	Reynosa	DB	Dos bocas
		RB	Río Bravo	DG	Degollado
		SB	Sabinas	ES	Escamela
		ST	Saltillo	GD	Guadalajara (TAR castillo)
		MY	Santa Catarina	IN	CPI
		MY	Satélite	IR	Irapuato
		VC	Victoria	IX	Derivación SJ Ixh
				LE	León
				MR	Morelia
				PA	Pachuca
				PJ	Pajaritos
				PS	Palo Seco
				PU	Puebla
				QR	Querétaro
				RF	Reforma
				SA	Salamanca
				SJ	San Juan Ixhuatpec
				SL	San Luis Potosí
				SR	TAR Salina Cruz
				SZ	TM Salina Cruz
				Z1	TM Salina Cruz L1
				Z2	TM Salina Cruz L2
				TB	Tierra Blanca
				TO	Toluca
				TU	Tula
				TX	Tuxpan
				VE	Veracruz
				VH	Villahermosa
				ZC	Zacatecas
				ZM	Zamora
				ZP	Zapopan

MODELO DE DISTRIBUCIÓN. La infraestructura para la distribución de petrolíferos se basa en los sistemas de poliductos existentes en territorio nacional, apoyados con transporte por otros medios, ya sea carro tanque de ferrocarril o auto tanque, entre terminales terrestres; o buque tanque para conectar terminales marítimas. La legislación obliga a Pemex Logística, o a cualquier propietario de infraestructura de almacenamiento y distribución, a reservar su uso de largo plazo mediante una subasta en una temporada abierta y ofrecer el remanente, si lo hubiera, en contratos de corto plazo; todo con tarifas reguladas por la CRE. Existen seis sistemas de ductos, los cuales se muestran en la Tabla 4 y de la Figura 14 a la Figura 16.

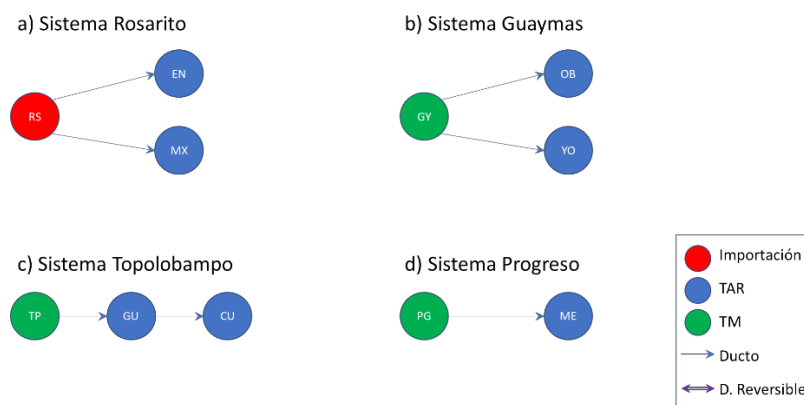


Figura 14. Sistemas de ductos aislados

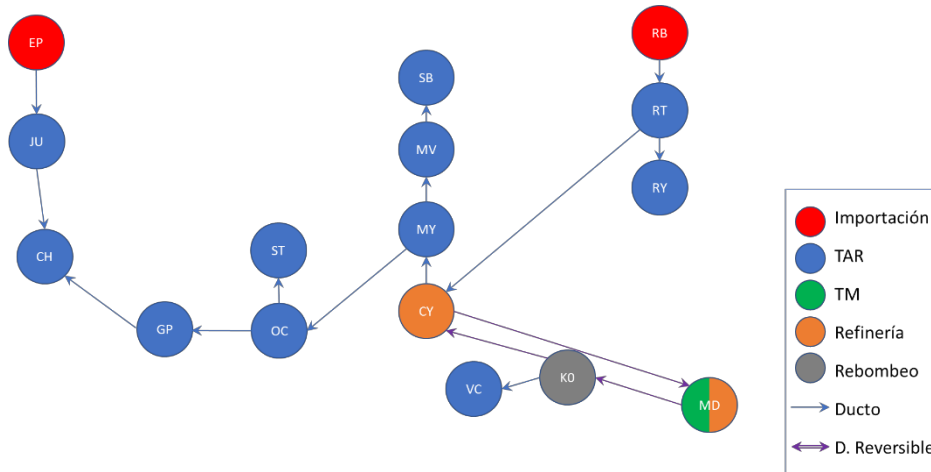


Figura 15. Sistema de ductos Norte

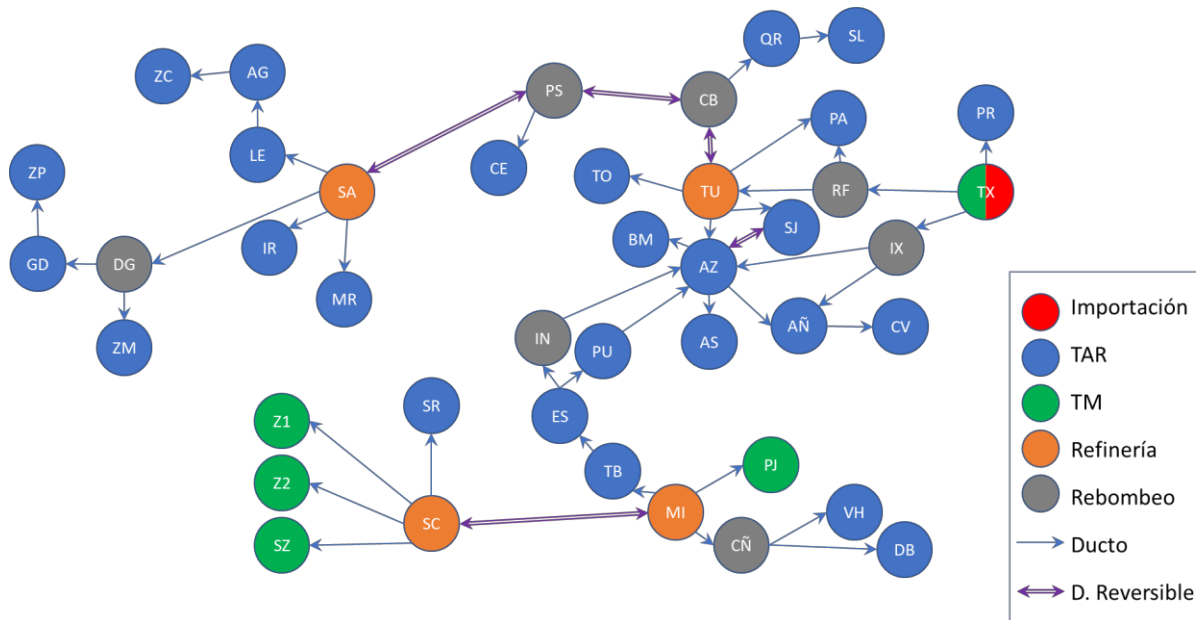


Figura 16. Sistema de ductos Sur-Golfo-Centro-Occidente

Si se realiza un análisis de vulnerabilidad similar al descrito anteriormente para Guadalajara, pero incluyendo Zamora y Zapopan, es evidente que el producto deberá pasar por el arco Salamanca-Degollado para llegar a cualquiera de estas TAR, de modo que la demanda total para estos nodos se puede agrupar en uno solo y la distribución a partir de este punto se vuelve trivial. Asimismo, si se hace un corte en el arco Charco Blanco-Palo Seco se desconecta la refinería de Salamanca y las TAR Celaya, Irapuato, Morelia, León, Aguas Calientes y Zacatecas. En la Tabla 5 se representa la matriz de incidencia para esta parte de la red.

Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

Tabla 5. Matriz de incidencia Bajío-Occidente

Arcos		Variables de flujo																		
		ZM	GD	ZP	DG	PS	SA	IR	MR	SA	LE	ZC	AG	LE	AG	CE	PS	CB	PS	
Balance de materia	Nodos																			
		DG	DG	DG	SA	SA	PS	SA	SA	SA	AG	LE	AG	PS	PS	CB	PS	CB	PS	
Balance de materia	OC	ZM	↓																	
		GD		↓	→															
		ZP			↓															
		DG	→	→		↓														
	BJ	SA				→	→	↓	→	→	→									
		IR							↓											
		CE											↓							
		MR												↓						
		LE													↓					
		AG														→	↓			
		ZC															→	↓		
		PS					↓	→										→	↓	
		CB																	→	↓
																				→

→ Flujo desde el nodo i (-1)
 ↓ Flujo hacia el nodo i (+1)

Nótese que el arco SA-DG (Salamanca-Degollado) conecta la zona Occidente con la zona Bajío. De igual manera, la zona Bajío se conecta con la zona Centro mediante el arco reversible Salamanca-Palo Seco (SA-PS/PS-SA). La solución de las submatrices encerradas en los recuadros únicamente afectará a la solución global en las variables que representan los arcos de interconexión, por lo que se puede convertir esa submatriz en un escalar equivalente.

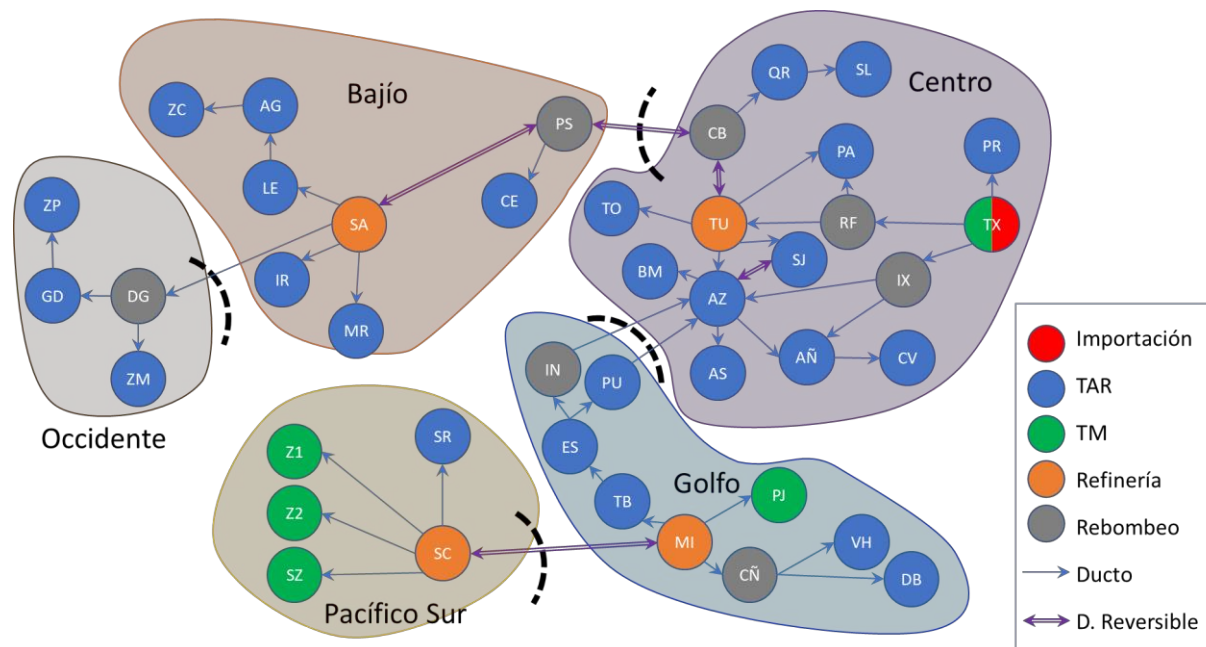


Figura 17. Agrupación de nodos en el sistema de ductos Sur-Golfo-Centro-Occidente

De igual manera, para llegar a las terminales de Puebla, Escamela o Tierra Blanca; o bien las de Dos Bocas, Villahermosa y El Cañito; el producto debió producirse en la refinería de Minatitlán, o bien ingresar por la terminal marítima de Pajaritos, por lo que se pueden agrupar estos nodos en uno solo. Siguiendo un razonamiento similar, se puede hacer una agregación de nodos para todo el sistema de ductos Sur-Golfo-Centro-Occidente, como se muestra en la Figura 17. Con la conjunción de los diferentes nodos se puede tener una versión simplificada de la red, como se muestra en la Figura 18.

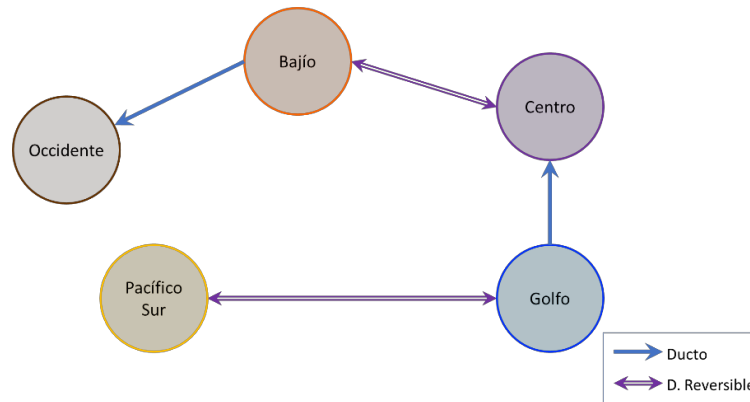


Figura 18. Simplificación del sistema de ductos Sur-Golfo-Centro-Occidente

Para comparar el resultado de la agrupación de los nodos en zonas y visualizar su equivalencia, se resaltan las diferentes opciones de suministro para el mercado de Guadalajara en ambos esquemas (ver Figura 19).

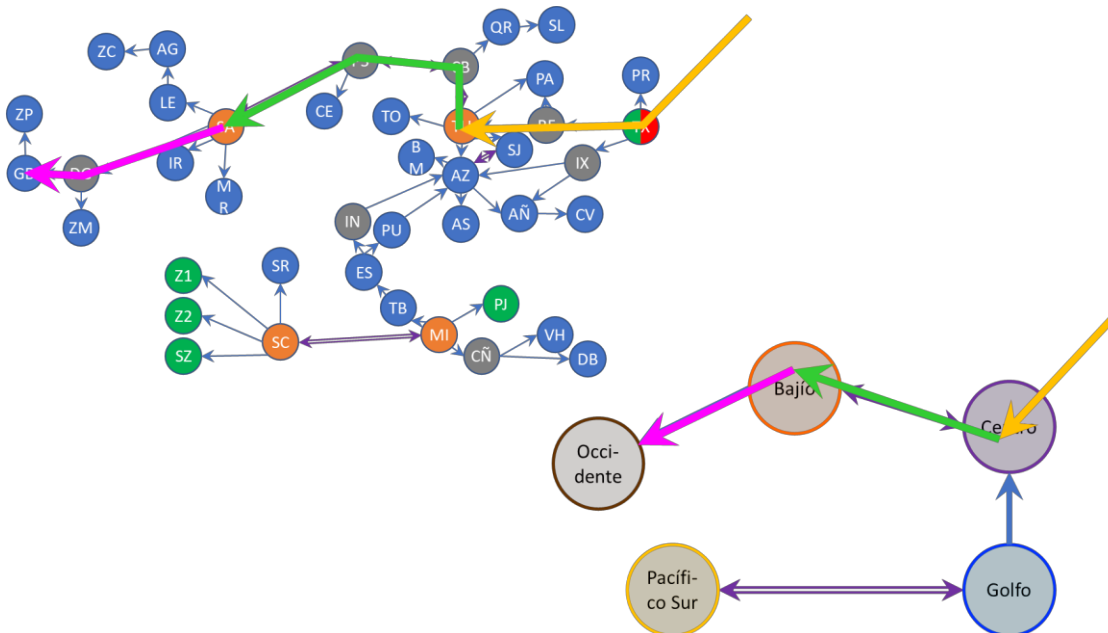


Figura 19. Rutas de suministro a Guadalajara/Zona Occidente

Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

Tabla 6. Matriz de incidencia para el sistema de ductos Sur-Golfo-Centro-Occidente

Arcos		Variables de flujo																																																																																					
		ZM	GD	ZP	DG	PS	SA	IR	MR	LE	CE	PS	CB	AG	ZC	LE	AG	TX	PR	RF	TX	IX	RF	PA	RF	TU	AN	IX	AZ	TU	AZ	TU	CB	PA	TU	ST	TU	TO	CB	QR	SL	AZ	AN	AZ	AS	AZ	BM	AZ	SJ	IN	AZ	AZ	PU	SJ	AN	CV	II	TX	MI	CT	MI	PJ	SC	MI	IN	MI	TB	ES	TB	VE	ES	PU	DB	CT	VH	II	PJ	SC	SR	Z1	Z2	SC	Z2	SC	Z2		
Balance de materia por nodo	Nodos	OC	DG	ZM	GD	ZP	SA	PS	SA	IR	MR	LE	CE	PS	CB	AG	ZC	LE	AG	TX	PR	RF	TX	IX	RF	PA	RF	TU	AN	IX	AZ	TU	AZ	TU	CB	PA	TU	ST	TU	TO	CB	QR	SL	AZ	AN	AZ	AS	AZ	BM	AZ	SJ	IN	AZ	AZ	PU	SJ	AN	CV	II	TX	MI	CT	MI	PJ	SC	MI	IN	MI	TB	ES	TB	VE	ES	PU	DB	CT	VH	II	PJ	SC	SR	Z1	Z2	SC	Z2	SC	Z2
		OC	DG	ZM	GD	ZP	SA	PS	SA	IR	MR	LE	CE	PS	CB	AG	ZC	LE	AG	TX	PR	RF	TX	IX	RF	PA	RF	TU	AN	IX	AZ	TU	AZ	TU	CB	PA	TU	ST	TU	TO	CB	QR	SL	AZ	AN	AZ	AS	AZ	BM	AZ	SJ	IN	AZ	AZ	PU	SJ	AN	CV	II	TX	MI	CT	MI	PJ	SC	MI	IN	MI	TB	ES	TB	VE	ES	PU	DB	CT	VH	II	PJ	SC	SR	Z1	Z2	SC	Z2	SC	Z2
	OC	DG	ZM	GD	ZP	SA	PS	SA	IR	MR	LE	CE	PS	CB	AG	ZC	LE	AG	TX	PR	RF	TX	IX	RF	PA	RF	TU	AN	IX	AZ	TU	AZ	TU	CB	PA	TU	ST	TU	TO	CB	QR	SL	AZ	AN	AZ	AS	AZ	BM	AZ	SJ	IN	AZ	AZ	PU	SJ	AN	CV	II	TX	MI	CT	MI	PJ	SC	MI	IN	MI	TB	ES	TB	VE	ES	PU	DB	CT	VH	II	PJ	SC	SR	Z1	Z2	SC	Z2	SC	Z2	
	BJ	SA	PS	IR	MR	LE	AG	ZC	TX	PR	RF	TU	CB	QR	SL	AZ	AN	AZ	BM	AZ	SJ	IN	AZ	AZ	PU	SJ	AN	CV	II	TX	MI	CT	MI	PJ	SC	MI	IN	MI	TB	ES	TB	VE	ES	PU	DB	CT	VH	II	PJ	SC	SR	Z1	Z2	SC	Z2	SC	Z2																														
	CN	TX	PR	RF	TU	CB	QR	SL	AZ	AN	AZ	BM	AZ	SJ	IN	AZ	AZ	PU	SJ	AN	CV	II	TX	MI	CT	MI	PJ	SC	MI	IN	MI	TB	ES	TB	VE	ES	PU	DB	CT	VH	II	PJ	SC	SR	Z1	Z2	SC	Z2	SC	Z2																																					
	GF	MI	PJ	TB	ES	PU	IN	VE	DB	CT	VH	II	PJ	SC	SR	Z1	Z2	SC	Z2	SC	Z2																																																																		
	PS	SC	SR	Z1	Z2	SC	Z2	SC	Z2																																																																														

→ Flujo desde el nodo i (-1)
 ↓ Flujo hacia el nodo i (+1)

En la Tabla 6 se muestra la matriz de incidencia para todo el sistema de ductos Sur-Golfo-Centro-Occidente. Se puede verificar que los arcos de conexión entre las submatrices encerradas en los recuadros presentan una potencial simplificación para la red de distribución. En los análisis de largo plazo se podrá explorar la vulnerabilidad dentro de esos nodos y, en caso de requerirse expansiones al interior, bastará con un análisis simple de la región sin la necesidad de optimizar el detalle con las interacciones de todo el sistema.

Siguiendo un razonamiento similar, podemos hacer una agrupación de nodos para la zona Norte, como se muestra en la Figura 20. Finalmente, los sistemas aislados se pueden agrupar en un solo nodo cada uno.

La simplificación del modelo de distribución, a partir del análisis de los puntos de mayor vulnerabilidad dentro de la red detallada de poliductos, mediante la agrupación de las diferentes terminales por zonas, se reduce a once regiones de demanda y sus interacciones mediante los diferentes medios de transporte, los cuales se muestran en la Figura 21.

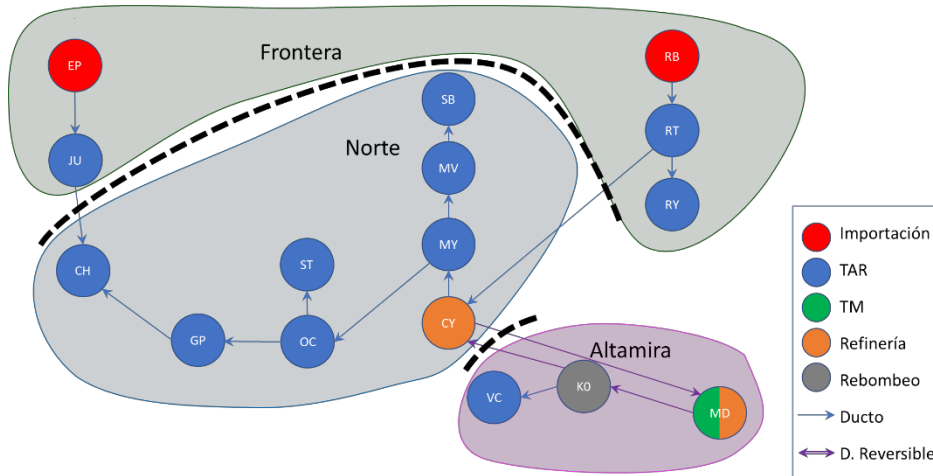


Figura 20. Agrupación de nodos en el sistema de ductos Norte

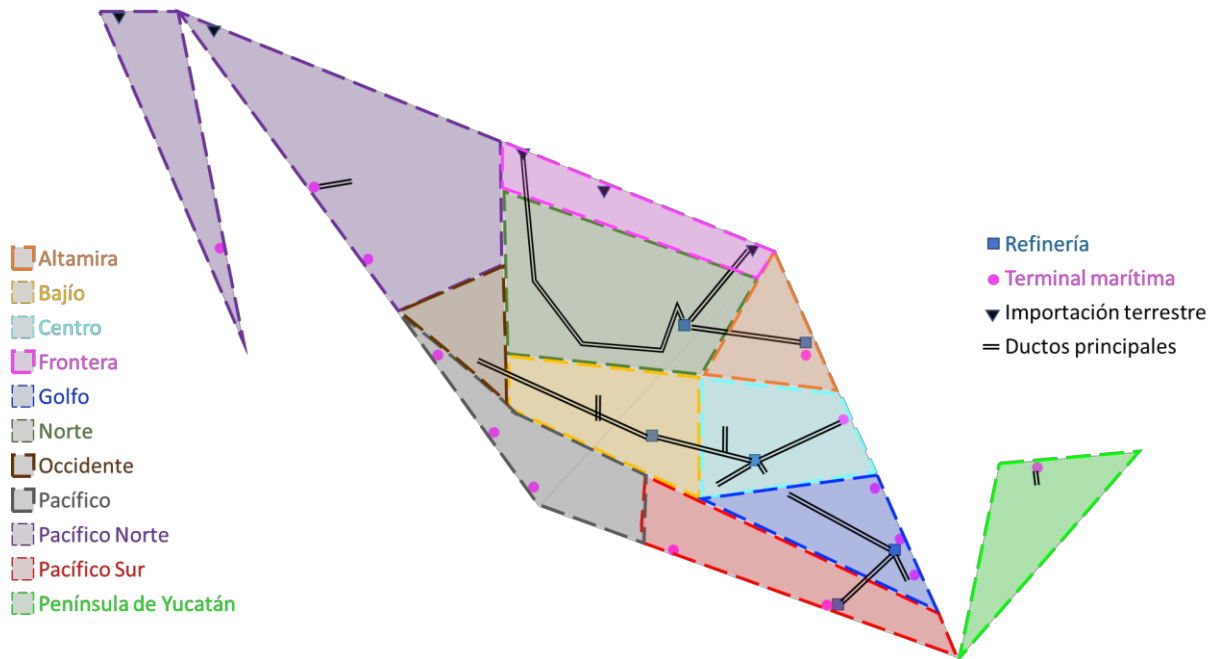


Figura 21. Modelo simplificado con 11 regiones

MODELO INTEGRADO. El modelo matemático, integrado con los modelos de cada refinería, queda como se detalla en el sistema de ecuaciones (8):

$$\text{Maximizar: } Z = \sum_{p \in \mathbf{P}} \sum_{i \in \mathbf{S}} C_{p_{pi}} S_{pi} - \sum_{p \in \mathbf{P}} \sum_{i \in \mathbf{S}} C_{p_{pi}} I_{pi} - \sum_{p \in \mathbf{P}} \sum_{t \in \mathbf{T}} \sum_{\substack{i, j \in \mathbf{S} \\ i \neq j}} F_{ptij} T_{ptij}$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} \text{[Balance]} \quad & \sum_{i \in \mathbf{S}} \sum_{t \in \mathbf{T}} T_{ptij} + I_{pj} = \sum_{k \in \mathbf{S}} \sum_{t \in \mathbf{T}} T_{ptjk} + S_{pj} & \begin{cases} \forall p \in \mathbf{P}, \\ \forall j \in \mathbf{S} \end{cases} \\ \text{[CapDucto]} \quad & \sum_{p \in \mathbf{P}} T_{ptij} \leq K t_{tij} & \begin{cases} \forall p \in \mathbf{P}, \\ t = \text{PIPELINE} \\ \forall i, j, k \in \mathbf{S} \end{cases} \quad (8) \\ \text{[ContDucto]} \quad & T_{ptij} \geq T_{ptjk} & \begin{cases} \forall p \in \mathbf{P}, \\ \forall i, j, k \in \mathbf{S} \end{cases} \\ \text{[BalRef]} \quad & P_p = \sum_{i \in \mathbf{S}} \sum_{t \in \mathbf{T}} T_{ptri} + S_{pr} & \begin{cases} \forall r \in \mathbf{R} \\ \forall p \in \mathbf{P} \end{cases} \end{aligned}$$

Todas las variables ≥ 0

En donde:

\mathbf{T} = {Medios de transporte}

\mathbf{F} = {Tarifa de transporte}

\mathbf{S} = {Regiones (nodos)}

\mathbf{R} = {Refinerías}

S_{pi} = Ventas del producto p en el nodo i

I_{pi} = Importaciones del producto p en el nodo i

T_{ptij} = Volumen transportado del producto p por el medio t del nodo i al nodo j

Es importante señalar que la estructura matemática propuesta sería aplicable al modelo si se consideraran todas las terminales de almacenamiento y distribución y los sistemas de transporte completos. La expansión de la infraestructura se podrá representar agregando arcos o nodos de inversión, en donde se incluya el costo equivalente para el pago del capital y las interacciones con la infraestructura existente.

CRECIMIENTO DEL MODELO. Existen tres diferentes ejes de crecimiento para el modelo: construcción de nueva infraestructura, integración de varios períodos y consideración de la incertidumbre. En este trabajo únicamente se abordan los dos primeros.

El crecimiento en la capacidad de refinación —ya sea por la reconfiguración de las refinerías existentes o por la construcción de nuevas refinerías— se aborda agregando los vectores de



rendimientos para el nuevo proceso e integrando la oferta en el nodo geográfico que corresponda. Nótese que, en el caso de las reconfiguraciones, los nuevos vectores de rendimientos deberán sustituir a los que representa dentro del cubo de datos. El control para la disponibilidad de la nueva infraestructura se puede realizar acotando la capacidad disponible.

Para el crecimiento de la red de distribución se puede considerar la expansión como si se tratara de un nuevo medio de transporte, cuyo costo incluya el pago prorrateado del capital mediante una tarifa nivelada. Este medio de transporte alternativo entrará en competencia con la infraestructura actual de ductos y otros medios de transporte —auto tanque, carro tanque y buque tanque. Será necesario que se abatan los costos de distribución, pues de lo contrario la expansión propuesta quedaría sin utilizarse. Deberán agregarse las restricciones de continuidad en la nueva infraestructura mediante las ecuaciones (9), de tal manera que se garantice que, una vez que se utilice nueva capacidad, ésta se encuentre disponible —y se pague su amortización— en años posteriores.

	$y_{it+1} \geq y_{it}$ $Z = Z - f \sum_{t=1}^n y_{it} I_i$	(9)
--	--	-----

En donde:

- y_{it} variable binaria que indica si se utiliza la infraestructura i en el tiempo t .
- f factor de pago anual equivalente de la inversión
- I_i costo total de inversión en la infraestructura i .

La otra alternativa es agregar directamente el costo de la inversión en el año en que ésta se realice y un crédito equivalente a los años de vida útil remanente —en el último período del horizonte de evaluación— en un modelo multi períodos. Para tal fin, habrá que replicar el modelo para cada período e integrarlos en un mismo modelo. Dado que se trata de ejercicios de largo plazo, no será necesario agregar un control de inventarios para el paso de un período al siguiente, bastará con manejar la demanda promedio de cada uno de los años del horizonte. El principal detalle en este sentido será la construcción de los escenarios de crecimiento de la demanda y generación de entornos de precios, así como las opciones de expansión en la infraestructura.

Un aspecto clave a considerar en la concepción de modelos multi períodos de largo plazo es la definición de la función objetivo, que puede ser la optimización de cada período en términos monetarios corrientes, o bien la maximización del valor presente de todo el escenario,

Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

restando peso en las decisiones conforme éstas se alejan en el tiempo, según la tasa de descuento aplicable. Este concepto se muestra en la Figura 22, que muestra el crecimiento de la demanda y el impacto económico cada vez más pequeño conforme se aleja en el tiempo.

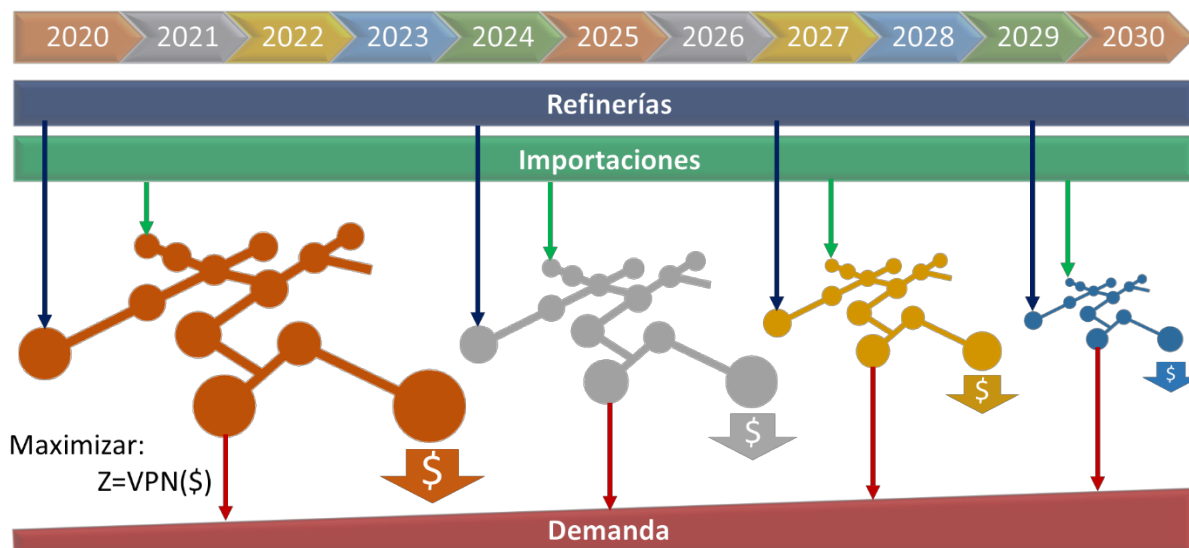


Figura 22. Conceptualización del modelo multi períodos de largo plazo

3.2. Escenarios de largo plazo

Originalmente se plantearon tres posibles escenarios a futuro, considerando la situación nacional y el entorno internacional, los cuales se muestran en la Figura 23. Estos escenarios representan más una narrativa de posibles futuros, similar a la planteada por el Consejo Mundial de Energía [48], con repercusiones en la demanda de combustibles, más que una proyección econométrica de la demanda.

CRECIMIENTO INERCIAL. En este caso se consideró la demanda 2020 como el promedio observado en 2019, más un crecimiento constante equivalente a la tasa media de crecimiento anual observada para los últimos diez años previos. Para gasolina se tenía una tasa media de crecimiento anual (TMCA) de 3.0%, de 2.5% para diésel y un decrecimiento del 5% anual para combustóleo, dadas las restricciones ambientales a nivel mundial y el incremento en la disponibilidad de gas natural. El crecimiento acumulado para 2030 se estimó en 34.4% para gasolinas y 28% para diésel, mientras que el consumo de combustóleo podría caer al 40% de su nivel actual. Estos niveles de crecimiento son similares a los considerados por Petróleos Mexicanos en su Plan de Negocios [49]. Los resultados de este escenario serán utilizados para detectar las necesidades de nueva infraestructura, sus niveles de utilización y la tarifa nivelada necesaria para su amortización.

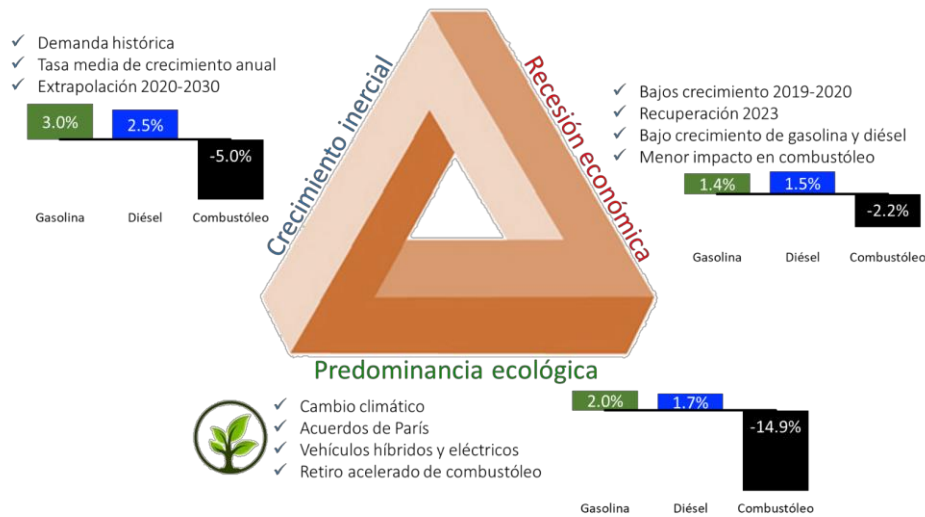
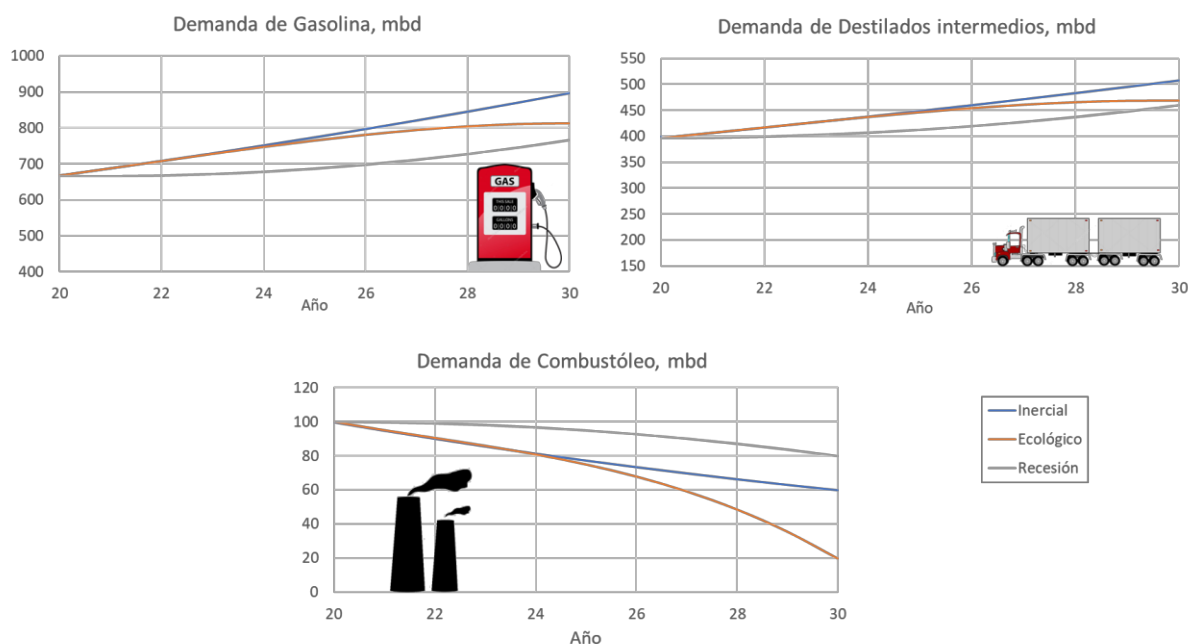


Figura 23. Escenarios propuestos para la predicción de la demanda futura

PREDOMINANCIAS ECOLÓGICA. La presión mundial sobre el cambio climático y los acuerdos de París, de los cuales México forma parte, han presionado el desarrollo tecnológico y comercial de motores eléctricos e híbridos, tanto para automóviles como para vehículos pesados. El crecimiento y la penetración de este tipo de vehículos será intensiva en los próximos años y desplazará parte de la demanda por motores de combustión interna, pero sin alcanzar a revertir la tendencia creciente. Este efecto tendrá mayor repercusión en la demanda de gasolina que en la de diésel, llegando en 2030 a un incremento de 22% en gasolinas y 18% en diésel. Para el combustóleo habrá un descenso acelerado en su consumo, que llegaría hasta el 80% de reducción contra los niveles actuales en diez años.

RECESIÓN ECONÓMICA CON RECUPERACIÓN. Los bajos niveles de crecimiento económico observados durante 2019 y los pronósticos para 2020, tanto del Banco de México como de casas calificadoras, indicaban que el crecimiento económico —y por ende el de la demanda de combustibles automotrices— sería bajo en el corto plazo. Sin embargo, algunas opiniones afirmaban que podría darse una recuperación de la economía a partir de 2023-2024, de modo que la demanda de gasolina y diésel comenzaría a crecer nuevamente, pero sin llegar en diez años a los niveles alcanzados en ninguno de los dos escenarios anteriores. En 2030, la demanda de gasolina habría crecido 15% con respecto a los niveles actuales y la del diésel 16%, pues el autotransporte pesado es menos susceptible a sufrir reducción por crisis económicas. Ante un escenario recesivo, no se observaría una reducción significativa en la demanda de combustóleo, que alcanzaría en 2030 una reducción acumulada del 20% con respecto a los niveles actuales.

Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices



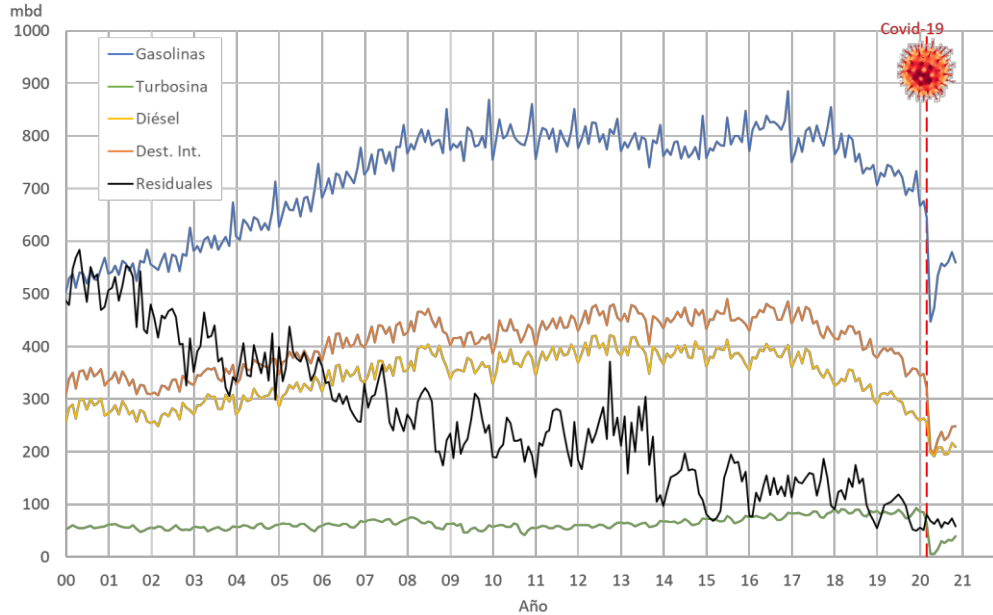
Fuente: elaboración propia

Gráfica 2. Escenarios de demanda de petrolíferos 2020-2030

En la Gráfica 2 se presentan los niveles de demanda para gasolina, diésel y combustóleo, respectivamente, para los tres escenarios originalmente planteados. Sin embargo, la aparición del Covid-19, la declaración de pandemia y sus repercusiones en la actividad económica mundial, obligan a cuestionar las narrativas de futuro que ya se habían explorado, haciendo necesario un cuarto escenario, denominado Pos-Covid.

ESCENARIO POS-COVID. Según Arthur D'Little, en su documento titulado *What's next for the Oil & Gas Sector after COVID-19?* [50], la demanda de petrolíferos en Estados Unidos bajaría en promedio 10 millones de barriles diarios debido a la pandemia de Covid-19, que representa poco más del 50% de la demanda de aquel País.

México no tuvo un comportamiento muy diferente y la caída en la venta de combustibles automotrices reportada para 2020 [45] estuvo muy por debajo de la observada en años anteriores, como se ve en la Gráfica 3. La caída en las ventas de petrolíferos observada en abril de 2020 tuvo una ligera recuperación hasta agosto, pero se mantuvo alrededor de ese volumen hasta final de año. Comparando estos números con el desempeño histórico, se observa que la venta de gasolinas retrocedió a los niveles de 2000, mientras que los volúmenes para diésel y turbosina promediaron en 2020 números por debajo de las ventas de hace veinte años. La reducción en la demanda de combustóleo debido a la pandemia no fue significativa.



Fuente: elaboración propia con datos de www.sie.sener.gob.mx

Gráfica 3. Histórico de ventas nacionales de productos petrolíferos

Por otro lado, diferentes publicaciones especializadas en economía y finanzas¹⁰ coincidían en que la recuperación económica de México a los niveles que tenía en 2018 tardaría entre 4 y 6 años, dependiendo de la evolución de la pandemia.

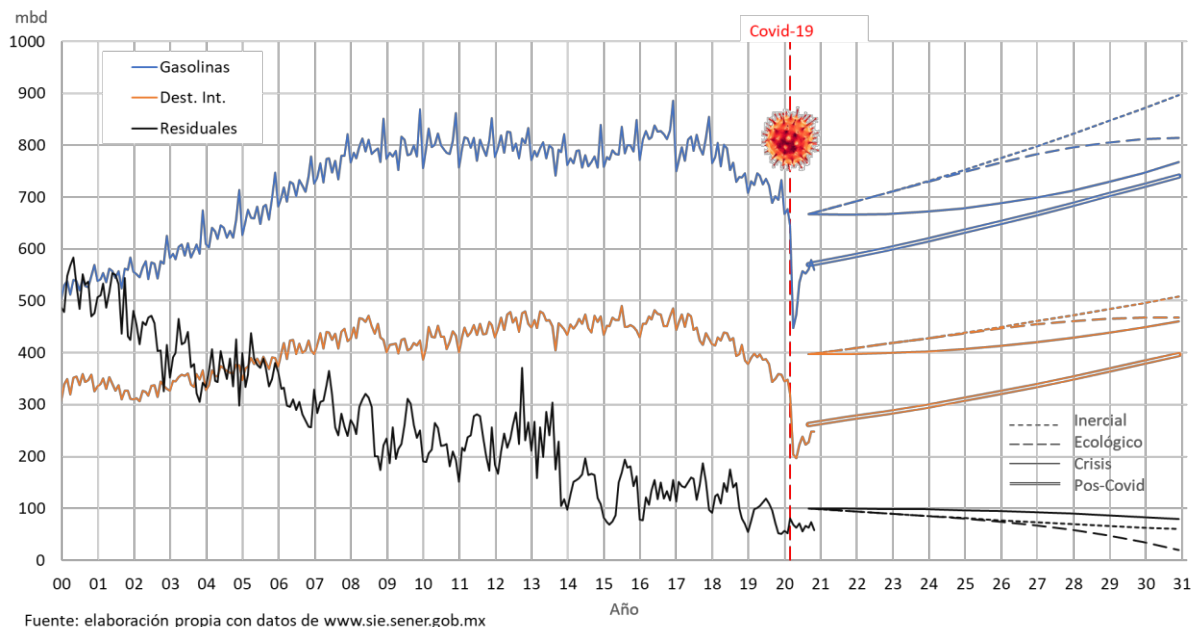
Considerando lo anterior, se partió de niveles de demanda 2020 similares a los valores de agosto y se supuso una TMCA constante para alcanzar los niveles que se tenían en 2018 para el año 2025, tanto para gasolina como para destilados intermedios. La TMCA resultante fue de 2.67% para gasolinas y 4.23% para destilados intermedios. En el caso de residuales, no obstante que se observa una pequeña baja en la demanda, se mantuvo el escenario de recesión económica como pos-Covid. En la Gráfica 4 se muestra el histórico y el nuevo pronóstico junto con los escenarios analizados anteriormente.

Con este nuevo escenario para la demanda de petrolíferos, se realizaron las respectivas corridas del MOSCA, con miras a determinar el impacto del Covid-19 en las necesidades de expansión para la infraestructura de la red de distribución de combustibles automotrices. Es evidente que existe un alto nivel de incertidumbre sobre este ejercicio, pues la recuperación de la actividad económica mundial —y particularmente la de México— dependerá del desarrollo

¹⁰ El Financiero, El Economista, Bloomberg, Financial Times (notas periodísticas octubre 2020)

Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

de vacunas contra el Coronavirus SARS-COV-2, así como de la efectividad en las campañas masivas de vacunación y de la inmunidad que se logre con su aplicación.



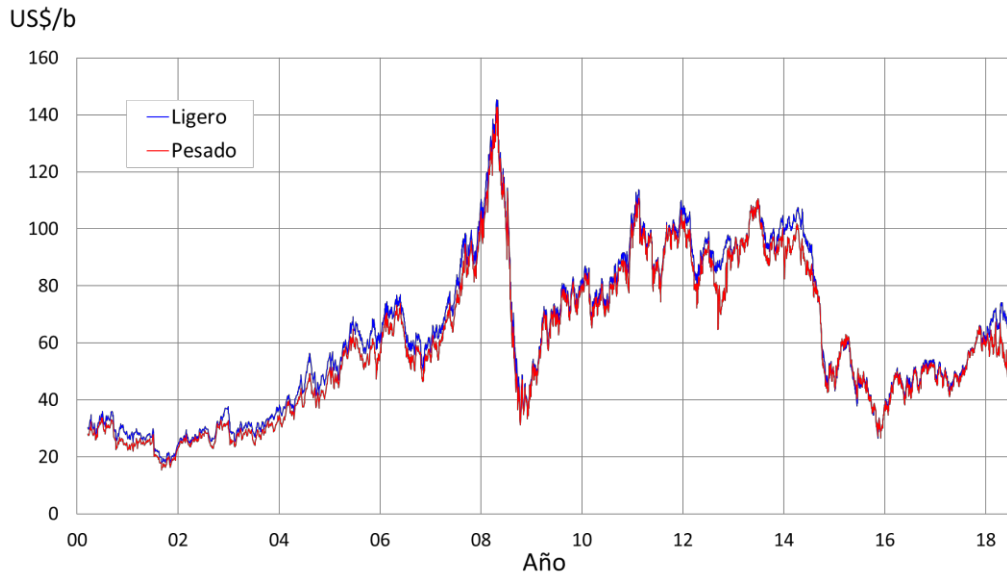
Gráfica 4. Histórico y actualización del pronóstico de ventas 2020-2030 (escenario pos-Covid)

3.3. Escenarios de precios

Los precios para el sector petrolero mexicano, dado el volumen de intercambio con el mercado de la Costa Norteamericana del Golfo de México (USGC) —Houston—, dependerán de los observados en este importante mercado a nivel mundial. La variabilidad de precios de petróleo crudo y productos petrolíferos a nivel mundial depende de aspectos económicos y geopolíticos difíciles de predecir en el largo plazo.

Como ya se mencionó en el apartado 2.3, el negocio de refinación de petróleo depende más de los diferenciales entre precios de crudos, entre precios de productos y del indicador conocido como *Crack Spread*. Considerando lo anterior, se tomaron datos históricos de precios y se analizó el comportamiento de los diferenciales a lo largo del tiempo con la idea de obtener las curvas de distribución de probabilidad y utilizarlas en un generador aleatorio de datos.

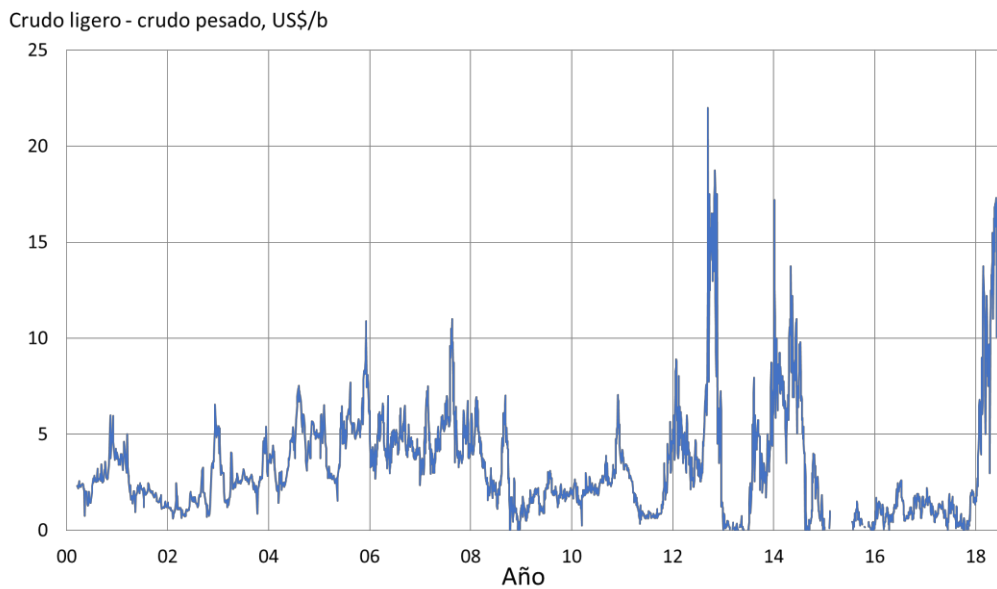
PRECIOS DE CRUDO. En la Gráfica 5 se muestran los precios de crudo ligero y crudo pesado entre 1984 y 2018 (más de 8000 datos). La diferencia entre el precio de crudo ligero y el de crudo pesado se ve en la Gráfica 6. Aunque el diferencial de precio entre los crudos no es constante a lo largo del tiempo, la tendencia para ambos sigue la misma dirección.



Fuente: elaboración propia con datos de www.sie.sener.gob.mx

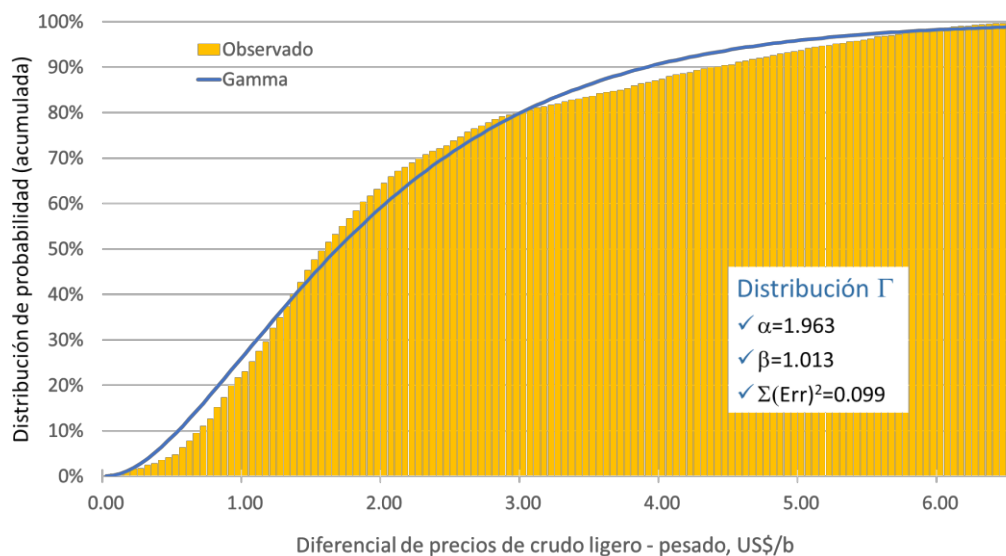
Gráfica 5. Precios históricos de petróleo crudo

Si se ordenan los valores para el diferencial entre los precios de crudo ligero y crudo pesado, puede buscarse una función de densidad de probabilidad —independiente del tiempo— que ajuste razonablemente con los datos históricos. Tras ejecutar el análisis estadístico, el resultado obtenido fue una distribución Gamma con parámetros $\alpha=1.963$ y $\beta=1.013$, con un error —al cuadrado— de 0.099, como se ve en la Gráfica 7.



Fuente: elaboración propia con datos de www.sie.sener.gob.mx

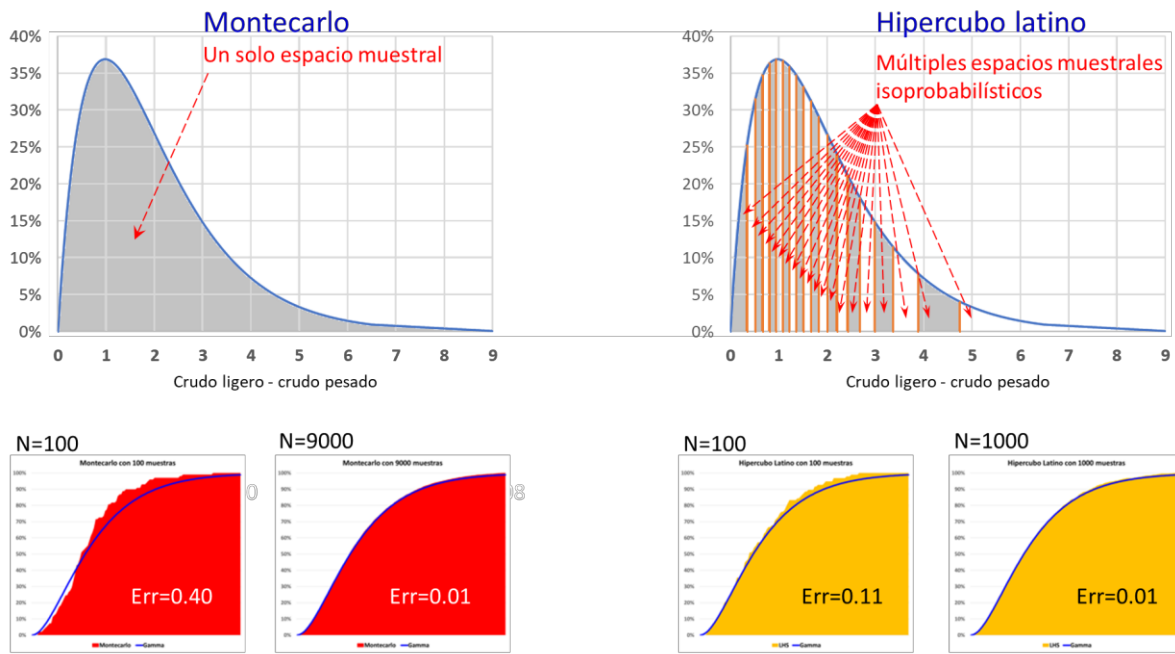
Gráfica 6. Diferencial histórico entre crudo ligero y crudo pesado



Gráfica 7. Ajuste de la distribución de probabilidad Gamma al diferencial de precios de crudo

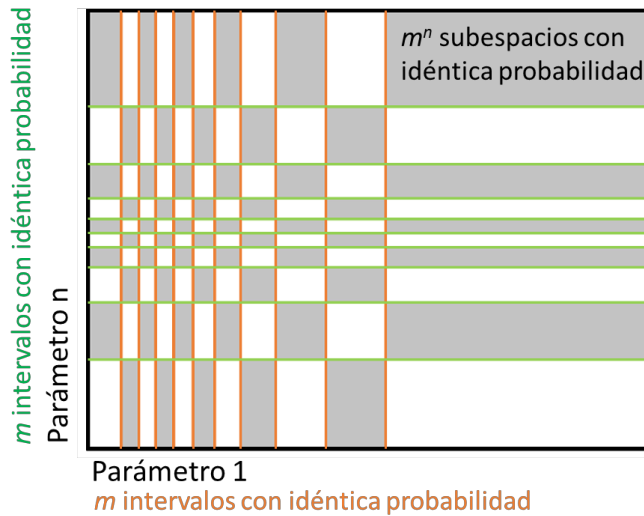
Con este resultado se podrá realizar una generación aleatoria del diferencial de precios, ya sea mediante el método de Montecarlo o de hipercubo latino (LHS). La principal diferencia entre ellos es que el primero considera la generación aleatoria dentro del espacio muestral completo, mientras que en el segundo se divide en subintervalos con la misma probabilidad de ocurrencia cada uno y se genera un punto aleatorio dentro de cada subespacio. El objetivo final es generar una muestra representativa de todo el espacio muestral con un menor número de puntos. En la Figura 24 se muestra un comparativo entre ambos métodos y se puede apreciar que los niveles de error para el LHS son menores para el mismo número de muestras. De hecho, para alcanzar un error de 0.01 se requieren 9000 muestras al utilizar Montecarlo, mientras que este mismo nivel se alcanza con 1000 muestreos de LHS.

Cuando se tiene más de una variable aleatoria, ambas deben variar de manera independiente —salvo que exista evidencia de covarianza—, de modo que el número de ejercicios necesarios para garantizar un error pequeño aumenta exponencialmente. Si se combina este resultado con el método de Morris [30], se puede tener una muestra representativa sin recurrir a un gran número de ejercicios muestrales. En la Figura 25 se aprecia este concepto para dos variables aleatorias, pero sería extrapolable a cualquier dimensión. Al dividir cada parámetro en m subintervalos con idéntica probabilidad de ocurrencia, se genera un espacio muestral hipergeométrico isoprobabilístico. Si se generara un punto por cada subespacio y si la función objetivo es convexa, se garantiza explorar todo el universo posible de soluciones con m^2 muestras.



Fuente: elaboración propia

Figura 24. Generación aleatoria de escenarios

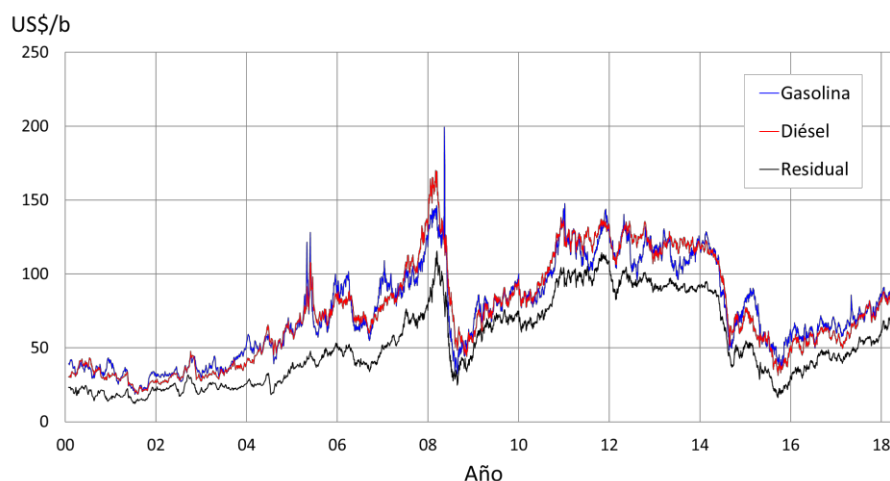


Fuente: elaboración propia

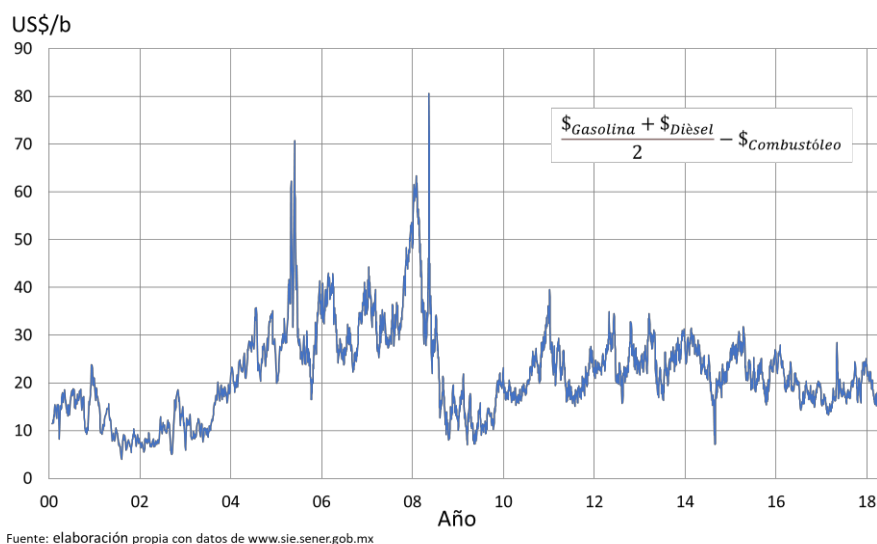
Figura 25. Aplicación del método de Morris al LHS

Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

PRECIOS DE PRODUCTOS. En la sección 2.3 se habló de las ventajas tecnológicas de una refinería compleja sobre otra más simple. Éstas serán más evidentes conforme mayor sea el diferencial entre productos destilados de alto valor y productos residuales de bajo valor. En la Gráfica 8 se muestra la evolución histórica para precios de gasolina, diésel y combustóleo (residual) y en la Gráfica 9 se presenta el diferencial entre productos ligeros y residuales, que ha oscilado desde valores inferiores a 10 \$/b hasta picos superiores a 40 \$/b. Con estos datos se hizo el mismo tratamiento estadístico que con los diferenciales de crudo, obteniendo una función de probabilidad Gamma con parámetros $\alpha=7.396$ y $\beta=3.075$, con un error al cuadrado de 0.019.

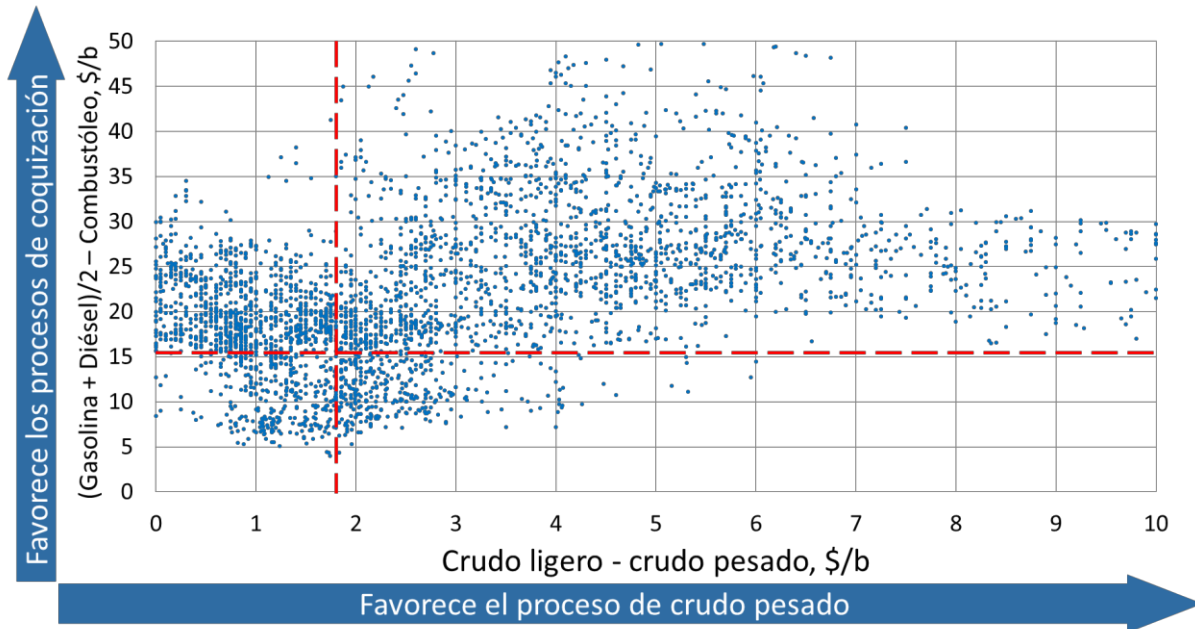


Gráfica 8. Precios históricos de combustibles



Gráfica 9. Diferencial histórico entre productos ligeros y pesados

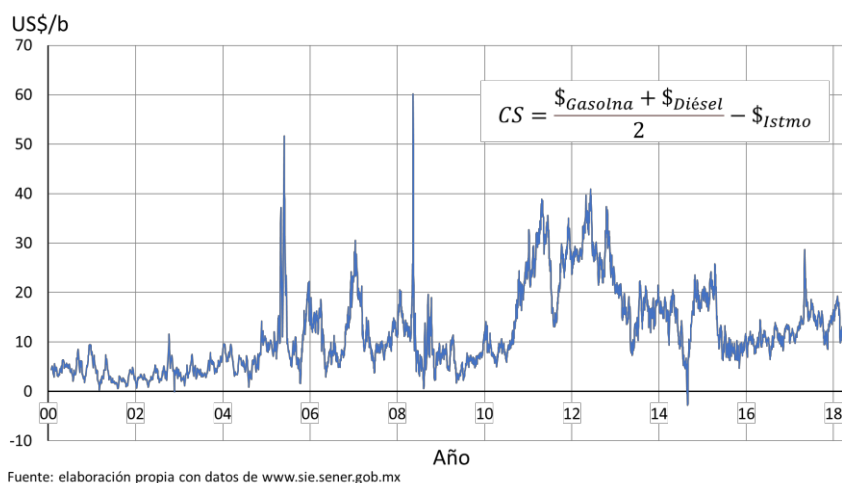
MÁRGENES DE REFINACIÓN. La economía de la industria de refinación está regida por los márgenes relativos, más allá de los valores absolutos de los precios de crudo y de productos. Si se contrasta la dispersión de los diferenciales entre crudos y entre productos, ver Gráfica 10, se puede observar que no existe una clara correlación entre ellos. Los diferenciales amplios son favorables para el proceso de crudo pesado en refinерías complejas, mientras que diferenciales estrechos indican que una refinерía simple con crudo ligero puede tener un buen desempeño económico.



Fuente: elaboración propia con datos de www.sie.sener.gob.mx

Gráfica 10. Diferenciales históricos (crudos vs productos)

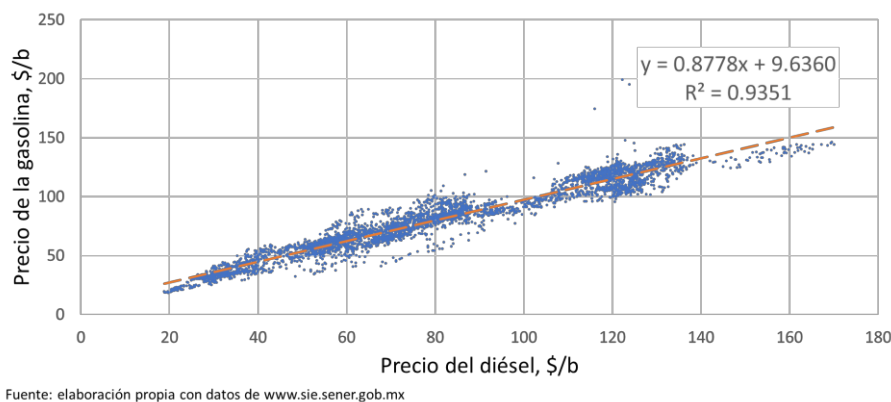
El indicador que puede aproximar este efecto en los márgenes de refinación y predecir la ventaja de procesar mayor o menor cantidad de crudo en una refinерía es el *Crack Spread*, definido mediante la ecuación (3). Se puede tomar como referencia un crudo puro o mezcla de ellos, según la dieta típica que se procese en la refinерía. Para este trabajo se utiliza el cálculo con crudo ligero y se muestra en la Gráfica 11.



Gráfica 11. Crack Spread para crudo ligero

Aplicando el análisis estadístico de los datos se ajusta una distribución Gamma con parámetros $\alpha=5.696$ y $\beta=10.428$, con un error al cuadrado de 0.082.

Adicionalmente, analizando los datos históricos, se observa una correlación casi lineal entre los precios del diésel y la gasolina, como se muestra en la Gráfica 12, de tal suerte que, al conocer el promedio de ambos precios a partir del precio de crudo ligero y del Crack Spread, se podrá determinar el de cada uno de ellos por separado.



Gráfica 12. Correlación entre precio de gasolina y diésel

GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE PRECIOS. Una vez que se conocen las funciones de distribución para los diferenciales clave, se requiere partir de un precio base para crudo ligero, el cual puede ser tomado de la expectativa observada en el mercado de futuros o de pronósticos elaborados por empresas especializadas. Una vez establecido el nivel de precio del crudo ligero, se generan valores aleatorios para cada uno de los tres indicadores y, a partir de ellos, se construye un escenario completo de precios. Partiendo del precio promedio observado para el



crudo ligero (57.80 \$/b) y la función Gamma para el diferencial de crudos, el precio crudo Maya se calcula como sigue:

$$P_{Maya} = P_{Istmo} - \Gamma_{Crudo}^{-1}(z) \tag{10}$$

Los precios de gasolina y diésel se determinan utilizando el factor *Crack Spread* y el precio del crudo Istmo en conjunto con la correlación lineal entre ambos:

$$P_{Gasolina} = \frac{1.7556(P_{Istmo} - \Gamma_{Crack}^{-1}(z)) + 9.636}{1.8778} \tag{11}$$

$$P_{Diésel} = \frac{2(P_{Istmo} - \Gamma_{Crack}^{-1}(z)) + 9.636}{1.8778} \tag{12}$$

Para el combustóleo se calcula su precio a partir del diferencial entre productos y el promedio entre los precios de gasolina y diésel:

$$P_{Combustóleo} = \frac{P_{Gasolina} + P_{Diésel}}{2} - \Gamma_{Prod}^{-1}(z) \tag{13}$$

Para hacer una mejor predicción del valor esperado de la función objetivo, se utiliza la propuesta de Morris y se verifica que el resultado es convexo. En este caso se puede reducir de manera significativa el espacio muestral mediante la técnica de LHS antes descrita. Utilizando la función Gamma con los parámetros obtenidos, se dividió el espacio muestral en cuatro subespacios con idénticos valores de probabilidad y se construyó el hipercubo con $4^3=64$ subespacios —todos con la misma probabilidad de ocurrencia— y se tomó como representativo el punto medio de cada subespacio. Este resultado se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7. Determinación de LHS para escenarios de precios

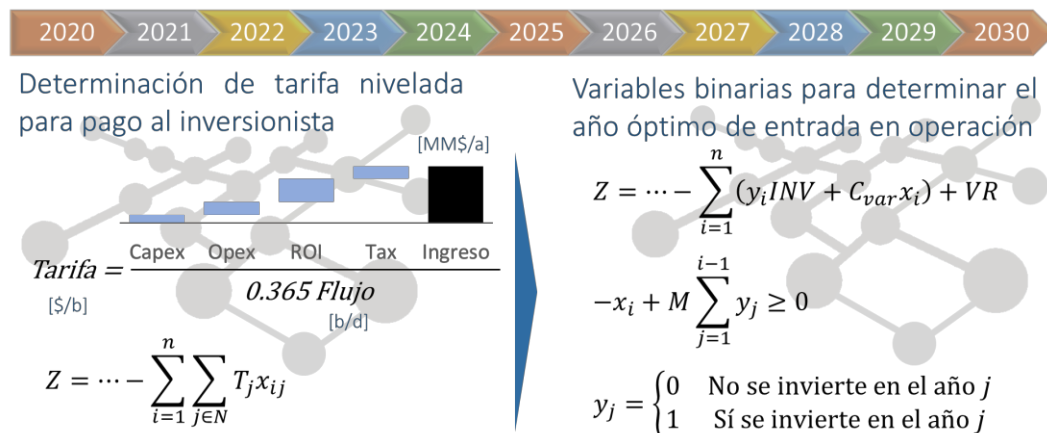
Cuartil	Rango de probabilidad	Z	Diferencial de crudos, \$/b	Diferencial de productos, \$/b	Crack Spread, \$/b
I	0-0.25	0.125	2.59	23.54	8.43
II	0.25-0.50	0.375	5.61	33.14	16.61
III	0.50-0.75	0.625	9.15	42.08	25.75
IV	0.75-1	0.875	15.66	55.98	42.02

Se ejecutó el MOSCA con cada una de estas combinaciones de precios y para los diferentes escenarios de demanda, es decir 256 corridas para cada versión del modelo que se probó (con la infraestructura actual y habilitando las posibles opciones de expansión de la red).

3.4. Inversiones para la expansión de la red

El primer paso para la expansión de la red fue detectar los sistemas de ductos que están saturados o cercanos a su nivel máximo. Para ello se realizaron corridas con el modelo de un solo período, considerando la infraestructura actual y la demanda de 2030. Para los sistemas saturados se agregaron nuevas opciones de suministro hacia las zonas con déficit de producto, mediante nuevos sistemas de ductos con tarifa cero, para balancear el sistema. Se repitió la corrida con los nuevos sistemas y se mantuvieron en el modelo aquellos con altos niveles de utilización futura, como proyectos potenciales de expansión de la red de suministro de combustibles automotrices. Esta versión del modelo se convirtió a multi períodos.

Como se mencionó en la sección 3.1, la propuesta original para el manejo de la nueva infraestructura se basó en el cálculo de una tarifa nivelada que permitiera cubrir los gastos de operación y la amortización del capital. Alternativamente se probó una estructura MIP, que permitiera optimizar el año de inversión, para verificar la validez de la primera propuesta. En la Figura 26 se esquematiza esta disyuntiva.



Fuente: elaboración propia

Figura 26. Alternativas para el manejo de inversiones

DETERMINACIÓN DE TARIFAS NIVELADAS. En primer lugar, se requiere un estimado de costos para la infraestructura propuesta. La inversión se estima mediante reglas heurísticas, de acuerdo con la capacidad necesaria (diámetro del ducto) y distancia entre origen y destino. La heurística utilizada se basa en la actualización propuesta por Schoots, Rivera-Tinoco, Verbong



y van der Zwaan [51], con los datos de Rui, Metz, Reynolds, Chen y Zhou. [52]. El análisis de los casos que se analizaron arrojó los costos unitarios de inversión para la tubería, agregando los costos por estaciones de bombeo que se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Heurística para la inversión de ductos

Diámetro, pulgadas	Flujo máximo, mbd	Inversión, MMUS\$/mi	Costo estaciones de bombeo, MMUS\$/100mi
10	20	0.596	7.935
12	30	0.760	10.328
16	55	1.094	15.315
24	120	1.746	25.430

Por ejemplo, el enlace de la zona Pacífico (PC) a la zona Occidente (OO) tendría que ser desde Manzanillo hasta Guadalajara, con una distancia de 296km. La capacidad utilizada para este sistema en las corridas preliminares del MOSCA estuvo entre 27 y 55 mbd, de modo que se requerirá un ducto de 16", con una inversión de:

$$1.094 \frac{MMUS\$}{mi} \times 296km \times \frac{1 mi}{1.609km} = 201.2MMUS\$ \quad (14)$$

Para recorrer una distancia de 185 millas serán necesarias dos estaciones de bombeo, con un costo de 15.3MMUS\$ cada una (30.6MMUS\$). A estos costos tendrá que agregarse el desarrollo de la ingeniería, que es alrededor del 8% del costo total de inversión (18.6MMUS\$). También tendrán que sumarse los costos asociados a los derechos de vía, que en promedio son US\$15,000 por kilómetro (en este caso 4.4MMUS\$), para una inversión total de 254.8MMUS\$.

Los costos de operación y mantenimiento pueden calcularse como un factor de la inversión inicial, usualmente entre el 10% y 12% para plantas de proceso y alrededor del 6% para sistemas de ductos. En este caso serían 13.9MMUS anuales.

Con estos datos se determinará el requerimiento de ingresos para que un inversionista cubra todos los gastos y obtenga el rendimiento esperado sobre su inversión para cada uno de los 30 años de vida útil de la infraestructura nueva.

Las tarifas resultantes varían significativamente año con año, por lo que se requiere calcular una tarifa nivelada, con la cual se obtendría exactamente el mismo valor presente neto que con las tarifas obtenidas para cada año, de manera similar al cálculo aceptado por la CRE.

Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

Tabla 9. Memoria de cálculo de tarifa PC-OC (Manzanillo-Guadalajara)

Análisis de tarifas de transporte de combustibles							
Sistema PC-OO							
Premisas							
Corredor de enlace	Manzanillo-Guadalajara						
Plazo del contrato, años	30						
Años para depreciación	30						
Tasa de descuento, %	10% Lineamientos SHCP						
Impuestos, %	35% Ley ISR						
Rentabilidad del inversionista antes de impuestos, %	15%						
Costos OMA, %Inversión por año	6% Paramétrico						
CAPEX, MMUSD	254.80 Paramétrico						
Concepto	Cantidad	Uni	MM\$/U	MM\$			
EPC Ducto	183.965	mi	1.094	201.18			
Estaciones de rebombeo	2.00	EB	15.315	30.63			
Ingeniería	8%	Inv.		18.55			
Derechos de vía	296	km	0.015	4.44			
Total				254.80			
Infraestructura requerida		Inicial	Tasa de crecimiento				
Capacidad requerida, mbd	33.4	27	3%				
Diámetro del ducto, pulgadas	16						
Capacidad máxima. mbd	55						
Distancia origen-destino, km	296	https://www.google.com.mx/maps/dir/Manzanillo					
Horizonte de evaluación							
	0	1	2	3	...	29	30
Demanda de servicios de transporte							
		27.0	27.8	28.6		55.0	55.0
Base de activos, MMUSD							
Valor anual	254.80						
Valor acumulado	254.80	254.80	254.80	254.80		254.80	254.80
Depreciación		8.49	8.49	8.49		8.49	8.49
Depreciación acumulada		8.49	16.99	25.48		246.31	254.80
Valor de la base de activos		246.31	237.81	229.32		8.49	0.00
Costos Operación, Mantenimiento y Administración, MMUSD							
Costos OMA		13.91	13.91	13.91		13.91	13.91
Total		13.91	13.91	13.91		13.91	13.91
Requerimiento de Ingresos, MMUSD							
Costos OMA		13.91	13.91	13.91		13.91	13.91
Depreciación		8.49	8.49	8.49		8.49	8.49
Rendimiento sobre la inversión (neto de impuestos)		24.63	23.78	22.93		0.85	0.00
Base neta de activos		246.31	237.81	229.32		8.49	0.00
Impuestos		13.26	12.81	12.35		0.46	0.00
Total		60.30	58.99	57.68		23.71	22.40
Tarifa US\$/b-d		6.12	5.81	5.52		1.18	1.12
Tarifa nivelada, US\$/b	3.88						



El requerimiento de ingresos para cada año se calcula como sigue:

1. Establecer el flujo que tendrá el ducto durante cada año. Es posible que el nuevo ducto no esté lleno desde el inicio, pero irá incrementándose su ocupación conforme la demanda vaya aumentando. Estos datos deberán llenarse de manera manual para cada sistema propuesto.
2. Determinar el valor de la base de activos para cada año, que será el monto total de inversión menos la depreciación acumulada, que en este caso será lineal a 30 años.
3. Determinar el rendimiento sobre la inversión, que resultará de aplicar la tasa de descuento al valor de los activos e irá disminuyendo cada año.
4. Cálculo de impuestos, que considera la diferencia entre la rentabilidad que desean los inversionistas y la tasa de descuento, aplicada al valor de los activos y multiplicando por la tasa del ISR establecida en la Ley del Impuesto sobre la Renta de 35%.
5. Se suman el rendimiento sobre la inversión, la depreciación, los impuestos y los costos de operación y mantenimiento para obtener el total de ingresos requeridos para hacer viable el proyecto.

Tabla 10. Resultado de las tarifas niveladas para los sistemas propuestos

Sistema	Corredor de enlace	Capacidad requerida, mbd	Diámetro del ducto, pulgadas	CAPEX, MMUSD	Tarifa nivelada, US\$/b
PC-OO_16	Manzanillo-Guadalajara	40	16	255	3.88
PC-OO_12	Manzanillo-Guadalajara	33.4	12	178	3.22
AL-CN	Madero-San Luis Potosí	100	16	354	3.43
CN-PC	Cuernavaca-Acapulco	80	16	251	2.44
GM-CN	Dos Bocas-Azcapotzalco	140	16	357	3.47
NT-BJ	Cadereyta-Zacatecas	80	12	314	5.56
GM-TX	Dos Bocas-Tuxpan	100	16	268	2.59
TX-CN	Dos Bocas-Tuxpan	120	16	250	2.43

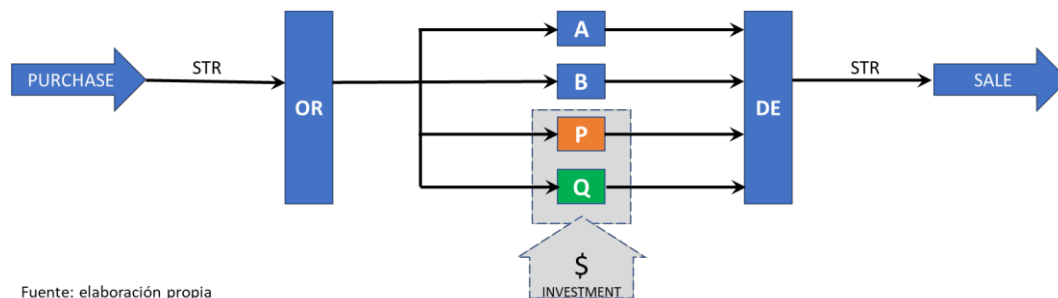
Como ejemplo, en la Tabla 9 se muestra una imagen del libro de Excel para el cálculo de la tarifa nivelada para el ducto PC-OO de 16". Nótese que la capacidad requerida (33.4mbd) está ligeramente por arriba de la capacidad máxima de un ducto de 12", por lo que se seleccionó el de 16", con una tarifa de 3.88 US\$/b. Sin embargo, podría resultar más económico instalar un ducto de 12" y transportar el excedente mediante pipas que construir el ducto de mayor capacidad. Para evaluar este impacto se calcula la tarifa para un ducto de 12" operando a su máxima capacidad a lo largo de todo el horizonte. El resultado es 3.22 US\$/b y esta opción será mejor que el ducto de 16" con mayor capacidad, pero subutilizado.

Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

De manera similar se determinaron las tarifas niveladas para las otras opciones de expansión de la red de distribución, las cuales se resumen en la Tabla 10.

DETERMINACIÓN DEL AÑO ÓPTIMO DE INVERSIÓN. Dado que la demanda es creciente con respecto al tiempo, la necesidad de transportar producto es menor en los primeros años. Esto podría repercutir en una baja utilización de los ductos al inicio de su operación, con menores ingresos para el inversionista —dado que cobra una tarifa unitaria— y pérdida de rentabilidad para el proyecto. Para analizar este efecto se desarrolló una versión del MOSCA que optimice el año para la inversión, basado en la arquitectura que a continuación se describe:

Suponga que hay cuatro opciones para satisfacer una demanda fija de cierto producto para un horizonte de largo plazo, como se ve en la Figura 27. A representa las instalaciones actuales, B es la contratación de un tercero mediante el pago de una tarifa, P es la inversión en una determinada tecnología o capacidad (P) y Q representa la inversión en otra tecnología o capacidad Q. Cada opción A, B, P & Q podría ser una fábrica, una máquina, tubería o cualquier dispositivo para transformar (o transportar) los materiales disponibles en los demandados; cada uno con su propio costo de operación y capacidad.



Fuente: elaboración propia

Figura 27. Modelo de prueba para determinar el año óptimo de inversión

El balance de material para cada período está determinado por:

$$x_{Ai} + x_{Bi} + x_{Pi} + x_{Qi} \geq D_i \quad (15)$$

Donde x_{Fi} es la cantidad de producto suministrado desde la instalación F (A, B, P, Q) en el período i , y D_i es el requisito para este período. Todos los montos pueden ser diarios o anuales. El costo de operación se calcula como:



$$Op x_i = (x_{Ai} O_A + x_{Bi} f_B + x_{Pi} O_P + x_{Qi} O_Q) d_i \quad (16)$$

Donde O_F es el costo de operación de la instalación F (A, P, Q) por unidad; f_B es la tarifa unitaria pagada al proveedor externo, d_i representa cuántas veces ocurren los flujos durante el período (1 para base anual, 365 para base diaria) y $Op x_i$ es el costo total de operación en el período i . El resultado está en \$/anuales.

Las nuevas instalaciones de P y Q requieren inversión de capital, pero no ambas y no necesariamente desde el primer año. Entonces, es necesario optimizar la selección de tecnología y el mejor período para el gasto de capital. La inversión se realiza en el año k y las nuevas instalaciones estarán disponibles durante el horizonte restante. Así, la nueva disponibilidad de capacidad se asocia a las variables binarias y_k y w_k , que serán iguales a uno si la inversión se realiza en el año k , cero en caso contrario.

Las restricciones de capacidad de las instalaciones actuales para cada período están representadas por:

$$x_{Ai} \leq C_A \quad (17)$$

$$x_{Bi} \leq C_B \quad (18)$$

Mientras que la capacidad de las nuevas instalaciones deberá considerar la existencia de éstas mediante el uso de las variables binarias:

$$x_{Pi} \leq C_P \sum_{j=1}^i y_j \quad (19)$$

$$x_{Qi} \leq C_Q \sum_{j=1}^i w_j \quad (20)$$

Donde C_F representa la capacidad disponible de la instalación F (A, B, P, Q) en la misma base unitaria que el balance de materiales. Nótese que, si la inversión P se realiza en el año k , $y_k = 1$ y la capacidad disponible se establece en cero antes del período k , y en C_P para el resto del horizonte. Un razonamiento similar se aplica a la inversión Q. Los gastos de capital deben agregarse al flujo de caja en el año k , incluyendo —si fuera el caso— un crédito por el valor residual al final del horizonte de evaluación, de la siguiente manera:

$$Inv_i = y_i K_P + w_i K_Q \quad (21)$$

$$R_{20} = K_P \frac{k-1}{20} + K_Q \frac{j-1}{20} \quad (22)$$

Donde Inv_i es el gasto de capital en el período i , K_P y K_Q son la inversión en tecnologías P y Q, respectivamente, y R_{20} es el valor residual al final del horizonte, asumiendo un esquema de depreciación lineal a 20 años, considerando que se invierte en la tecnología P en el año ky en la tecnología Q en el año j . Es importante decidir si la inversión debe ser sólo una vez y sólo en una de las tecnologías disponibles. En este caso, esta situación estaría controlada por:

$$\sum_{i=1}^{20} (y_i + w_i) \leq n \quad (23)$$

Donde n es el número máximo de unidades nuevas que se pueden instalar.

El flujo de caja se calcula para cada año como el costo de la cadena de suministro:

$$M_i = Op_x_i + Inv_i - R_i \quad (24)$$

Donde M_i es el flujo de caja en el año i . Tenga en cuenta que $R_i = 0$ excepto para $i = 20$.

Entonces, el problema consiste en minimizar el valor presente del costo de la cadena de suministro:

$$\text{Minimizar: } Z = \sum_{i=1}^{20} M_i \frac{1}{(1+t)^i} \quad (25)$$

Donde Z es la función objetivo y t es la tasa de descuento para el cálculo del valor presente.

Para desarrollar el modelo, primero se construyó una hoja de cálculo en Excel con todos los flujos de efectivo, variando manualmente el año para la inversión a lo largo de todo el horizonte. Posteriormente se determinó el año óptimo para cada una de las inversiones de manera gráfica, como se muestra en el ejemplo de la Figura 28, en donde el año óptimo para la inversión es 5 para la tecnología P y 7 para la tecnología Q.

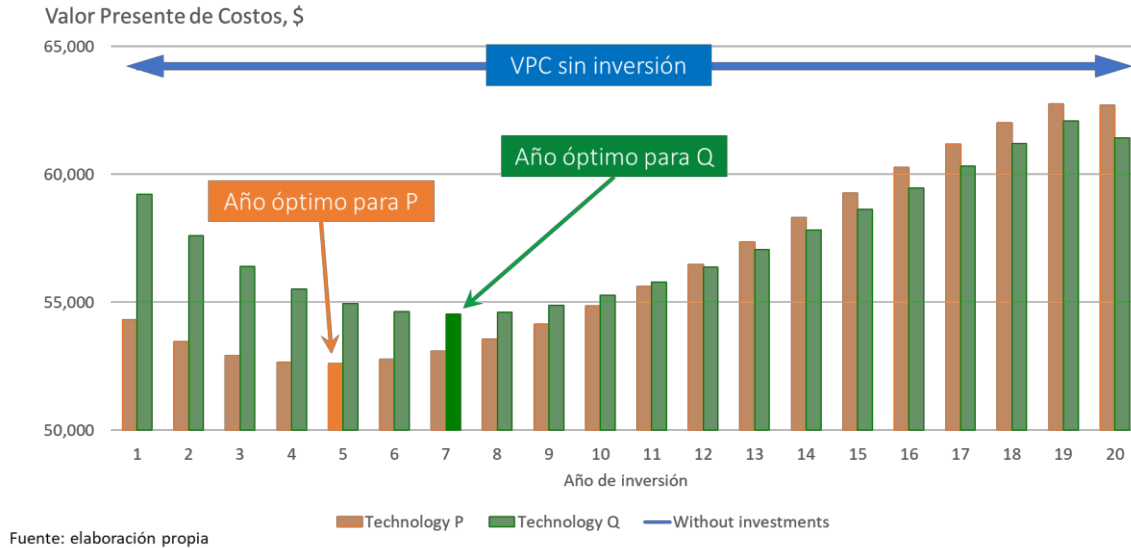


Figura 28. Resultados para determinar el año óptimo de inversión (ejemplo)

La estructura propuesta para el modelo MIP se programó en LINGO y se realizaron pruebas variando los parámetros en la hoja de Excel y en el modelo MIP, las cuales fueron exitosas. Inclusive se comparó el valor presente acumulado año con año para el caso óptimo. El siguiente paso fue modelar esta propuesta en GRTMPS y se agregó una estructura equivalente para cada una de las opciones de inversión consideradas en el MOSCA, como alternativa en vez del pago de la tarifa nivelada.

Para el cálculo del valor residual en GRTMPS no se consideró una depreciación lineal, sino el cálculo de una inversión con un valor presente equivalente a un número de pagos fijos iguales a los años de servicio del activo en cuestión. La anualidad equivalente, Ae , para la inversión, Inv , en un activo con vida útil, n , estará dada por:

$$Ae = Inv \left(\frac{i(1+t)^n}{(1+t)^n - 1} \right) \quad (26)$$

Cuando la inversión se realiza en el año k , deberán realizarse $n-k+1$ pagos equivalentes hasta el final del del horizonte de evaluación. El valor presente de las amortizaciones faltantes, VP_k , será:

$$VP_k = Ae \left(\frac{(1+t)^{n-k+1} - 1}{i(1+t)^{n-k+1}} \right) \quad (27)$$

En MS-Excel se utilizan las fórmulas $Ae=PMT(t, n, Inv)$ y $VP_j=PV(t, n-k+1, Ae)$, o bien $Ae=PAGO(t, n, Inv)$ y $VP_k=VA(t, n-k+1, Ae)$ para la versión en español.



3.5. GRTMPS, la herramienta

GRTMPS es el líder en software para la planeación y optimización de refinerías, plantas petroquímicas, sistemas energéticos y de manufactura. Esta tecnología de vanguardia ofrecida por *Haverly Systems, Inc.* es ideal para resolver modelos de planeación complejos y no lineales. Se trata de una de las plataformas más utilizadas en la industria petrolera desde 1962, con más de 100 clientes en todo el mundo, incluidas las 10 principales empresas petroleras a nivel global.

La arquitectura de GRTMPS se basa en el lenguaje de modelación OMNI, desarrollado por Larry Haverly [53], que ofrece un modelado generalizado y empaquetado. El código OMNI no cambia de una refinería a otra, sino que únicamente se modifican las tablas de datos operativos particulares para cada una. Así, se deberá modelar la estructura básica para una sola refinería y ésta será adaptada para un grupo de refinerías. De igual manera se establecerá un modelo de período único que fácilmente podrá convertirse en su versión de períodos múltiples. El modelo puede tener cualquier número de crudos, productos, calidades, unidades de proceso, etc., dependiendo únicamente de cómo se ingresen los datos. En cuanto a la estructura matemática, el modelo generalizado permite incluir MIP o el manejo de recursividad de no linealidades gracias a la versatilidad del lenguaje OMNI. La recursividad también se conoce como Programación Lineal Sucesiva.

Los problemas de optimización generalmente se plantean con variables y ecuaciones. GRTMPS se basa en una filosofía de actividades y restricciones. Esto se centra en la construcción de modelos que son estables y dan resultados prácticos y sólidos, en contraste con ser simplemente matemáticamente correctos. La concepción sobre el proceso, más allá del sistema de ecuaciones, permite un mejor entendimiento del modelo y de sus resultados.

GRTMPS permite seleccionar el motor de optimización entre Cplex, Xpress o HS/LP (motor de programación lineal de *Haverly Systems*). Para un manejo de la generación de matrices y las ecuaciones no lineales de forma recursiva, el sistema utiliza un algoritmo denominado gSLP© (programación lineal sucesiva generalizada), el cual ofrece una convergencia, solidez y velocidad inigualables para resolver modelos del mundo real, mediante un motor de recursividad no lineal que se mantiene en desarrollo constante y decidido, combinando recursividad adherente, recursividad distributiva y algoritmos sofisticados de solución de ecuaciones no lineales.

Se decidió utilizar GRTMPS en este trabajo por dos motivos. El primero es que GRTMPS es utilizado por Petróleos Mexicanos desde 2016, año en que se migraron los diferentes modelos



de planeación y programación MOSNR y MOGAS¹¹ que originalmente fueron modelados en PIMS¹². Al utilizar como base para la calibración del MOSCA los resultados del MOSNR, resulta práctico utilizar la misma plataforma. La segunda, y la de mayor peso, es que Haverly ofreció una licencia gratuita por tres años, a título personal, para la realización de este trabajo.

4. Resultados

Se tiene un gran número de corridas del MOSCA. En primer lugar, se presentan los resultados para el caso determinista con tarifa nivelada, en donde se podrá ver claramente el impacto en la solución al cambiar los escenarios de demanda. Después se presenta un análisis similar, pero con el modelo MIP, en el que se puede apreciar la diferencia entre ambos paradigmas en la modelación. Después se hace un análisis de las corridas estocásticas, considerando el valor esperado de las diferentes variaciones, para apreciar los impactos derivados de los diferentes esquemas de precios.

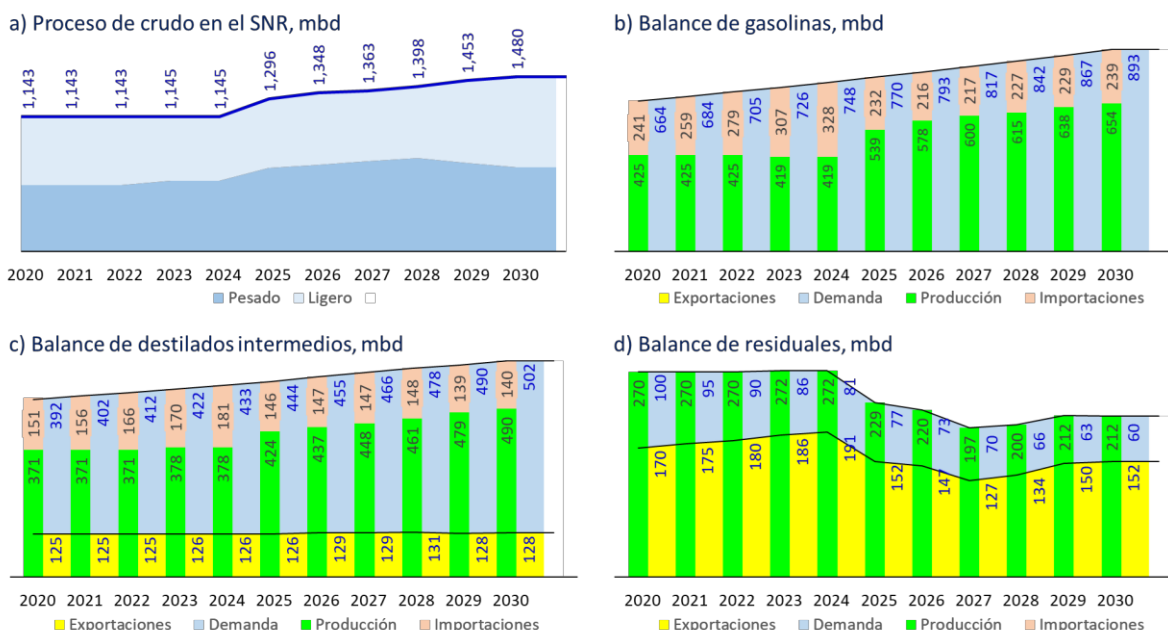
4.1. Tarifa nivelada

Las variables operativas para el modelo con tarifa nivelada y el escenario inercial se muestran en la Gráfica 13. Se puede observar que el proceso de crudo se incrementa a partir de 2025, que entran en operación la refinería de Dos Bocas y la Reconfiguración de Tula. Sin embargo, la producción de gasolina y de destilados intermedios sigue siendo insuficiente y se requieren importaciones para suministrar la creciente demanda. También se observa que la producción de residuales —y por ende las exportaciones— disminuye con la operación de las refinerías de alta conversión. Nótese que para destilados intermedios hay importaciones y exportaciones. Esto se debe a que parte de la producción del SNR no cumple con la especificación de ultra bajo azufre (15 ppm) y debe exportarse hacia otros mercados. En caso de lograr cumplir con la especificación, la autosuficiencia en esta familia de productos estaría muy cercana.

¹¹ Modelo de Optimización de Gas Natural

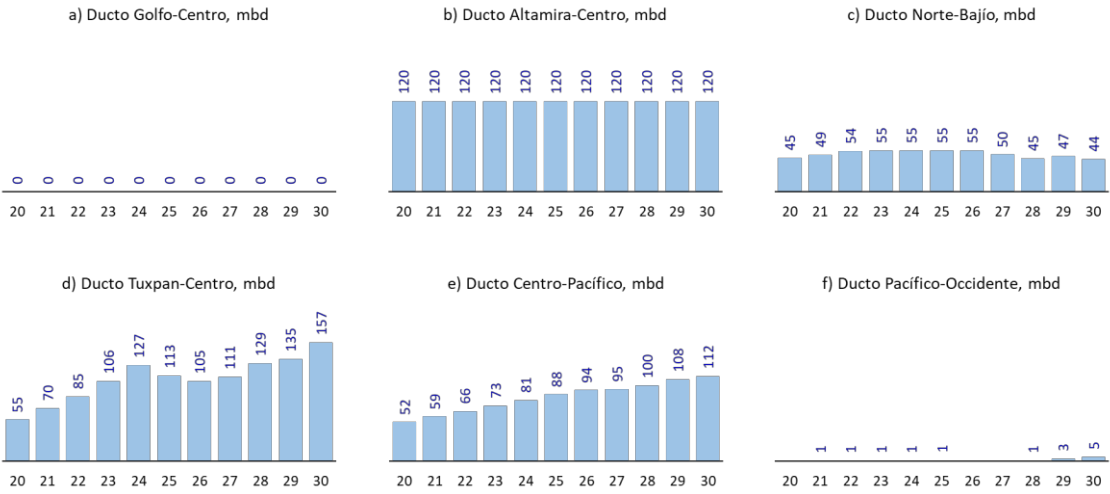
¹² Process Industry Modeling Systems, de AspenTech

Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices



Gráfica 13. Principales variables operativas, escenario inercial con tarifa nivelada

Además del balance global del sistema, también deben considerarse los balances locales en cada una de las zonas y las transferencias entre éstas, para verificar el uso de la infraestructura. En la Gráfica 14 se presenta la utilización a lo largo del horizonte para los seis sistemas propuestos para la expansión de la red de distribución de combustibles automotrices. Puede verse el detalle en la Figura 29 (movimientos óptimos para 2021) y en la Figura 30 (movimientos óptimos para 2030). Nótese el efecto que tiene la entrada en operación de los proyectos de producción (reconfiguración de Tula y nueva refinería de Dos Bocas), con mayores volúmenes de producción. Sin embargo, la reducción en las importaciones fue apenas marginal, lo cual indica que el incremento de la oferta apenas fue suficiente para cubrir el crecimiento de la demanda. Este efecto también se ve en la expansión del sistema Tuxpan-Centro —que crece de 70 mbd en 2021 a 157 mbd en 2030— y Centro-Pacífico —que prácticamente duplica su volumen, así como en el uso de buque tanque entre la refinería de Dos Bocas y la TM Tuxpan.



Gráfica 14. Utilización de la nueva infraestructura con tarifa nivelada y escenario inercial

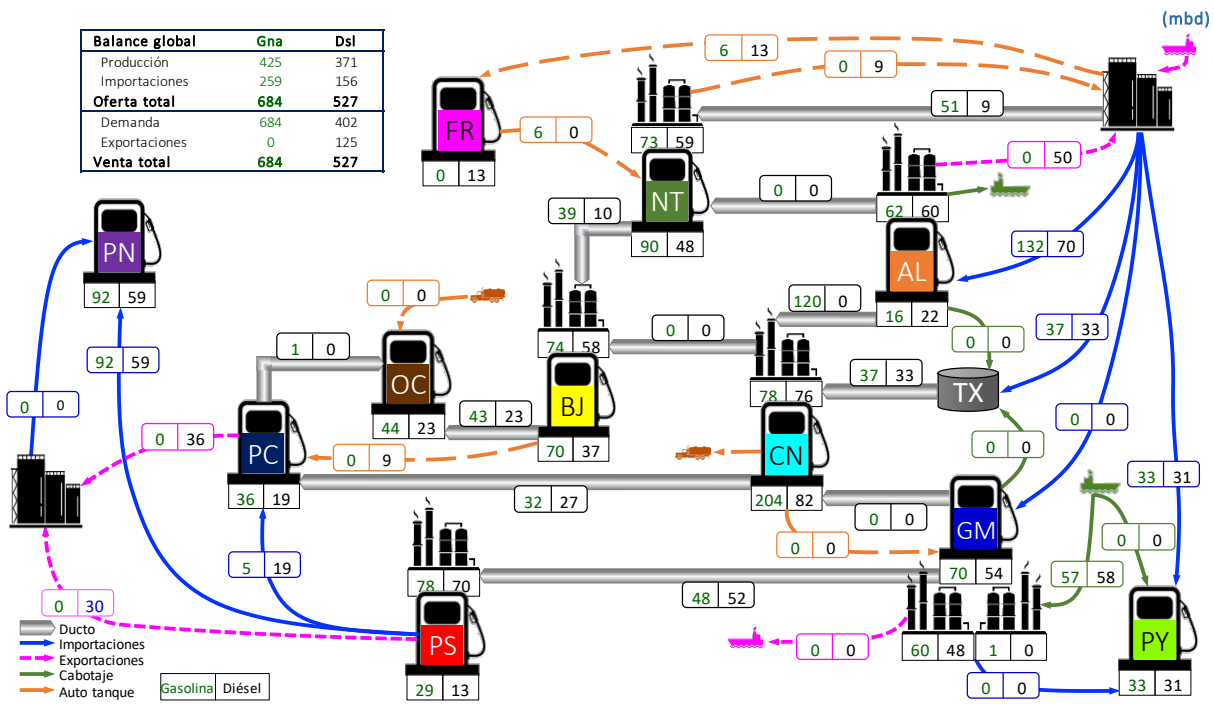


Figura 29. Distribución óptima 2021 con tarifa nivelada y escenario inercial

Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

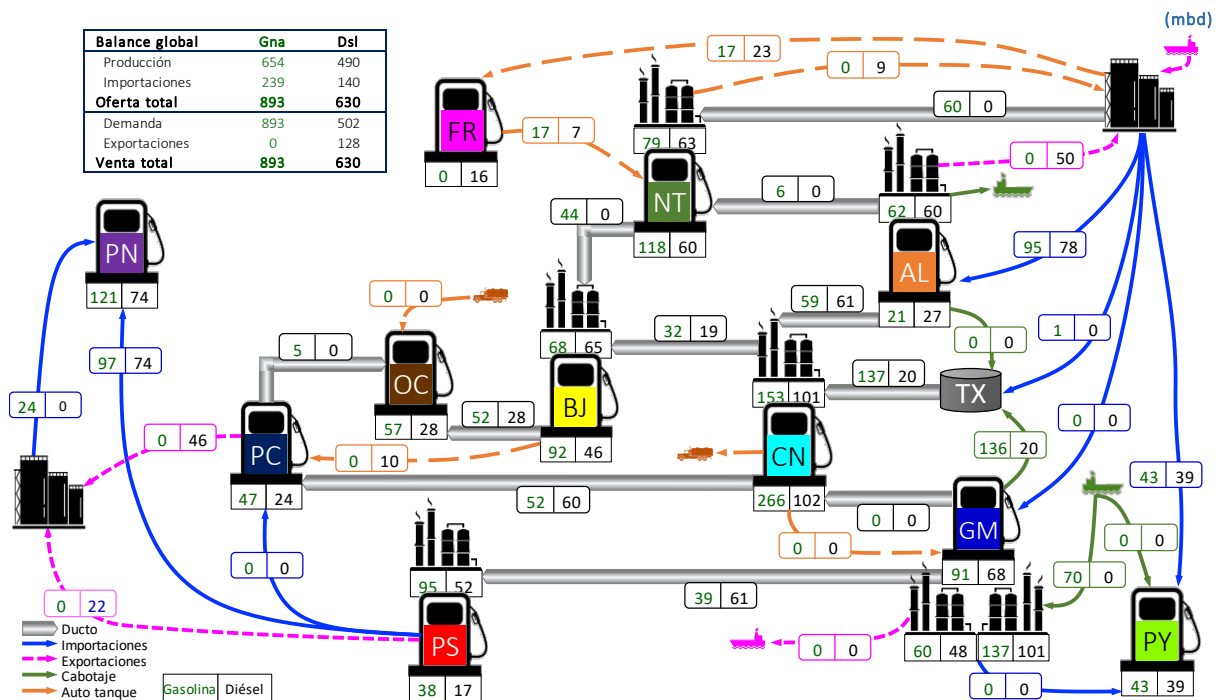
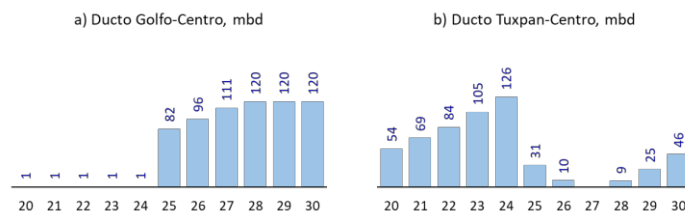


Figura 30. Distribución óptima 2030 con tarifa nivelada y escenario inercial

Como sensibilidad al escenario anterior se propuso la construcción adicional de un ducto que suministre directamente a la zona Centro, en vez del cabotaje a la TM Tuxpan y la ampliación del sistema Tuxpan Centro. En la Gráfica 15 se ve claramente el cambio en 2025 del modo de operación de ambos sistemas y en la Figura 31 se muestra el detalle para 2030. En este caso se ve claramente cómo la importación de gasolinas hacia Tuxpan queda en ceros y el apoyo a la zona Centro se obtiene desde la refinería de Dos Bocas mediante el sistema Golfo-Centro.



Gráfica 15. Sensibilidad Golfo-Centro con tarifa nivelada y escenario inercial

Ante este par de alternativas de apoyo a la zona Centro desde la refinería de Dos Bocas surge la duda de cuál sería la mejor opción. El análisis del comportamiento y variaciones en la función objetivo —que representa el valor presente del costo total de suministro de la demanda de combustibles automotrices en el horizonte 2020-2030— es necesario para resolver

dicho cuestionamiento. En la Gráfica 16 se ven las variaciones de la función objetivo entre ambas opciones.

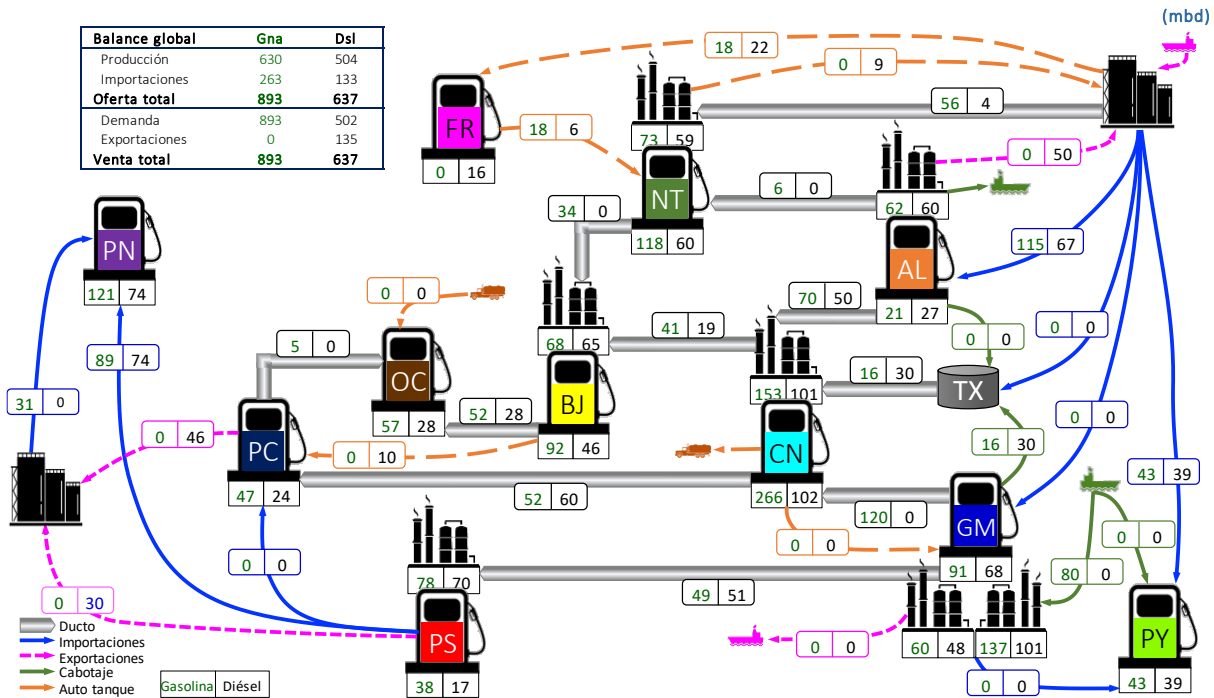
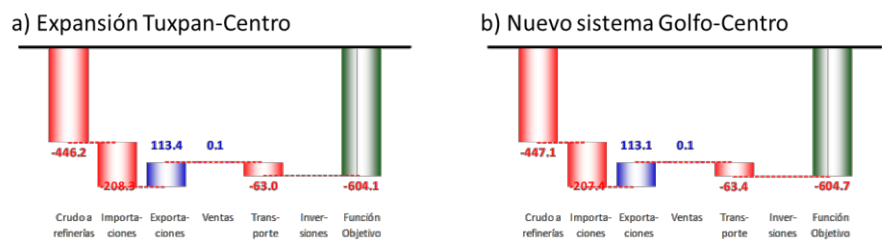


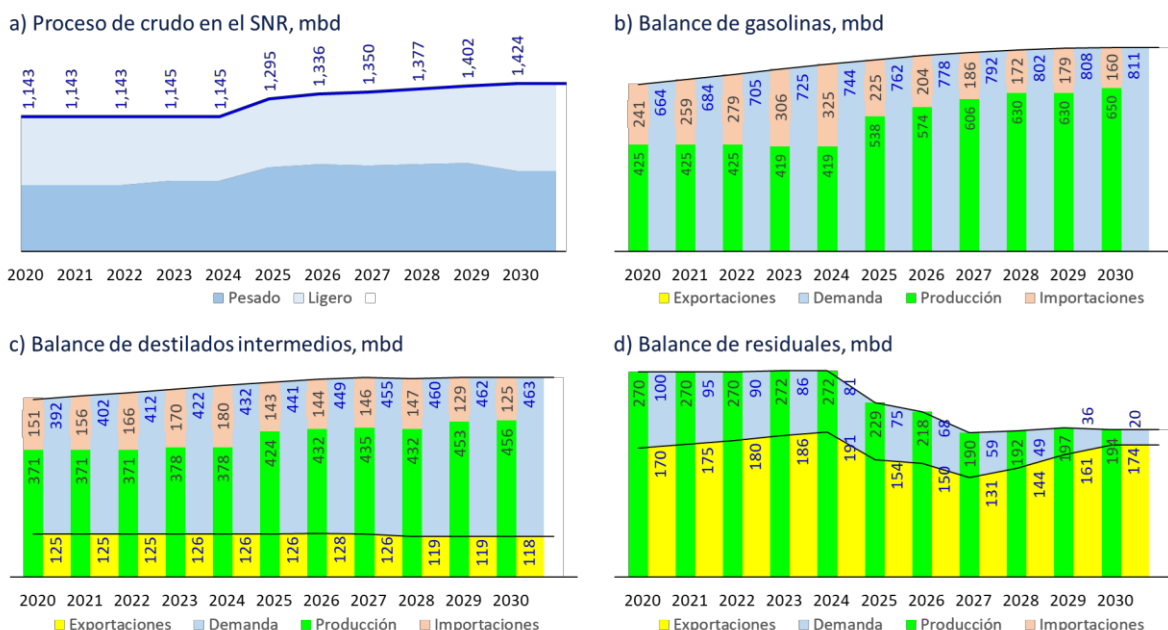
Figura 31. Sensibilidad Golfo-Centro 2030 con tarifa nivelada y escenario inercial



Gráfica 16. Construcción de la función objetivo, valor presente MM\$/d

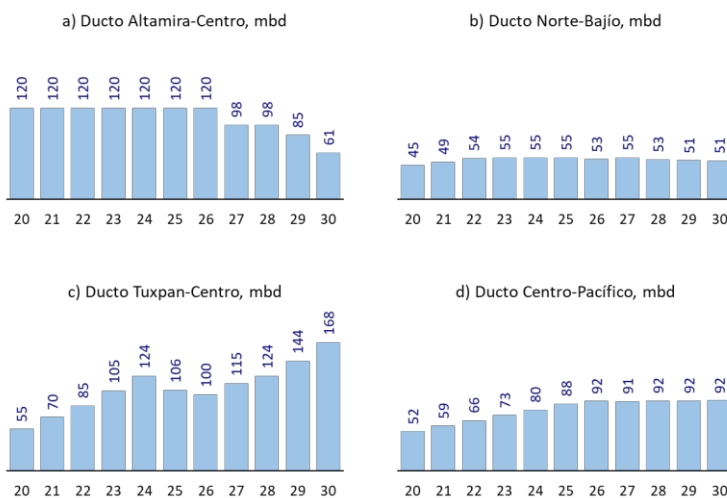
Para entender el impacto que tienen los cambios en la demanda sobre las variables operativas, se analizan los diferentes escenarios planteados. Para el escenario ecológico, Gráfica 17, se puede apreciar una reducción en el proceso de crudo derivado de la reducción acelerada en la demanda de residuales, ya que su desalojo está limitado, además de tener un alto costo. Con la entrada en operación de Dos Bocas se reduce el proceso de crudo en la refinería de Tula. Aunque la demanda de gasolina y destilados intermedios es menor, la dependencia de las importaciones sigue siendo un tema relevante.

Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices



Gráfica 17. Principales variables operativas, escenario ecológico con tarifa nivelada

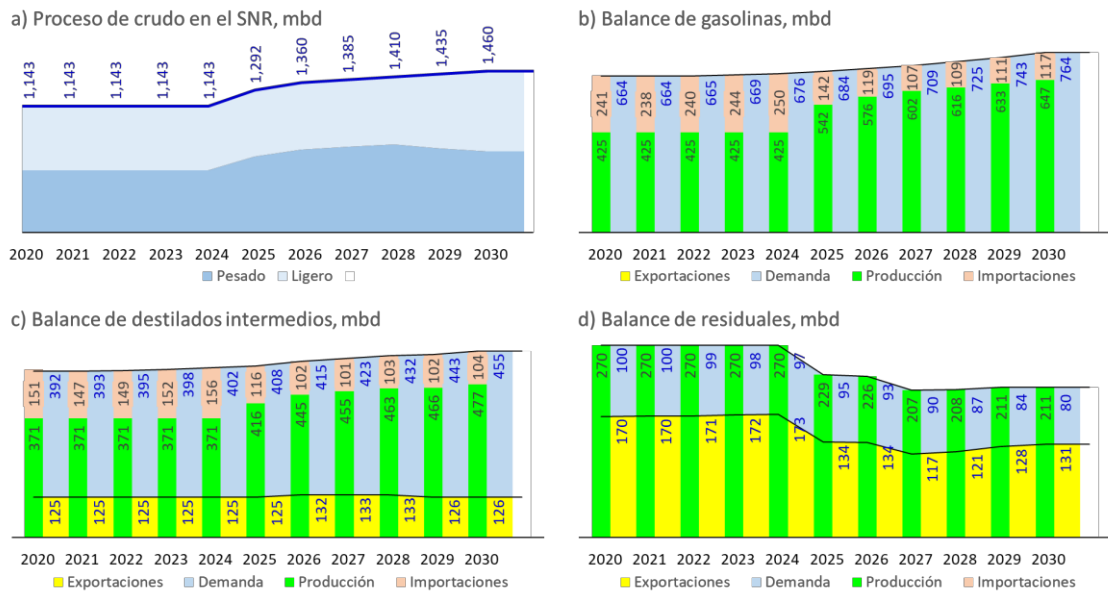
En cuanto a la utilización de la nueva infraestructura, Gráfica 18, se puede apreciar un patrón similar, aunque una menor demanda de combustibles automotrices hace que se reduzca la utilización de los sistemas Altamira-Centro y Centro-Pacífico hacia el final del horizonte de evaluación.



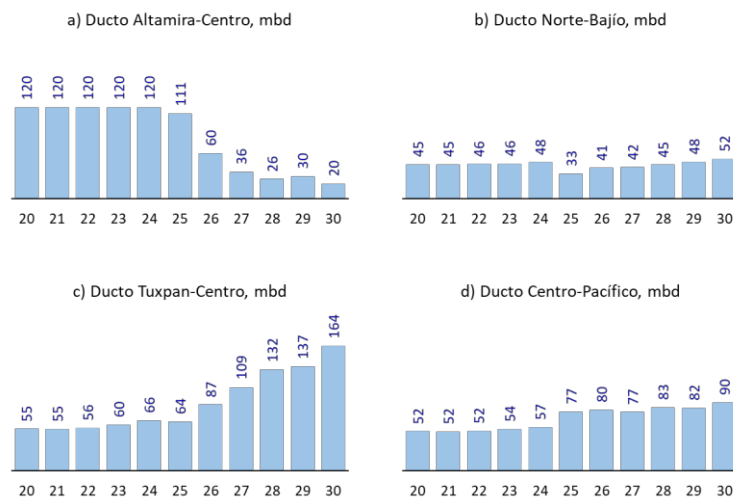
Gráfica 18. Utilización de la nueva infraestructura con tarifa nivelada y escenario ecológico

Las variables operativas para el escenario de crisis, Gráfica 19, muestran una reducción importante de las importaciones, no así del proceso de crudo y producción de las refinerías. En cuanto al crecimiento en la red de distribución, Gráfica 20, la utilización del sistema Altamira-

Centro deja de utilizarse al entrar en competencia con la producción de la refinería de Dos Bocas. Es evidente que la construcción de este ducto perdería la rentabilidad al dejar de utilizarse en el corto plazo. En su lugar se podría incrementar el flujo Tuxpan-Centro con apoyo de importación o cabotajes desde Altamira. Esto queda más claro con la Figura 32, que muestra los movimientos de 2024, justo un año antes de iniciar las operaciones de la reconfiguración de Tula y sin la refinería de Dos Bocas. Puede observarse que el ducto Altamira-Centro se alimenta prácticamente con producto de importación



Gráfica 19. Principales variables operativas, escenario de crisis con tarifa nivelada



Gráfica 20. Utilización de la nueva infraestructura con tarifa nivelada y escenario de crisis

Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

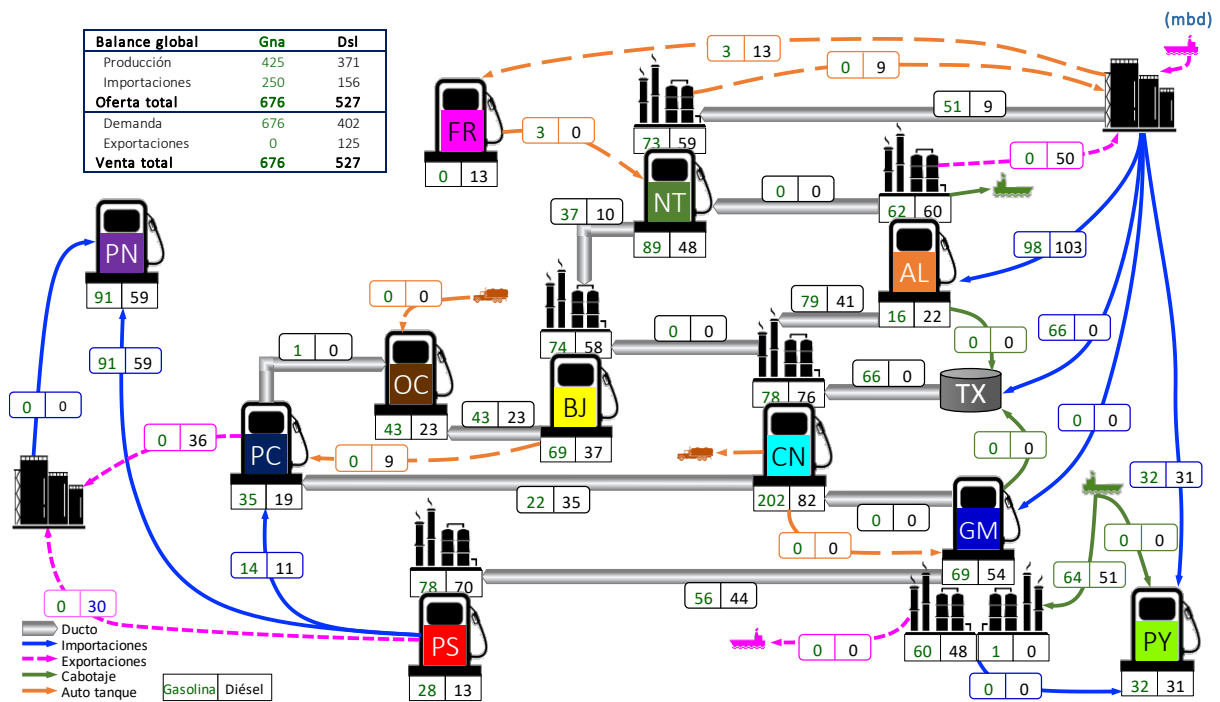
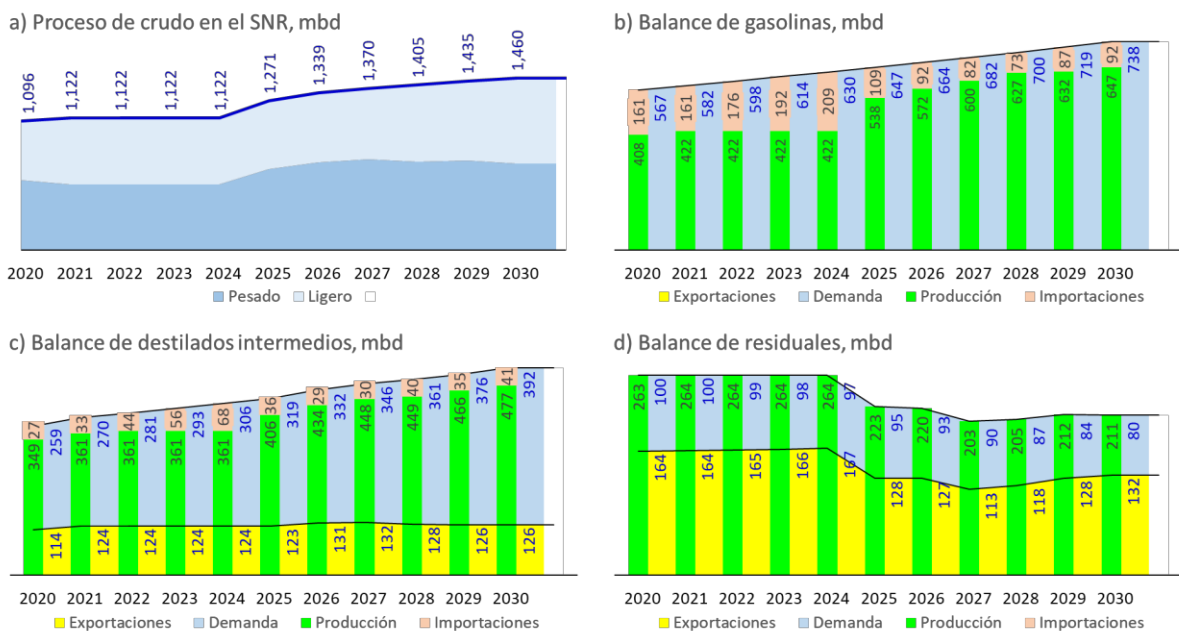


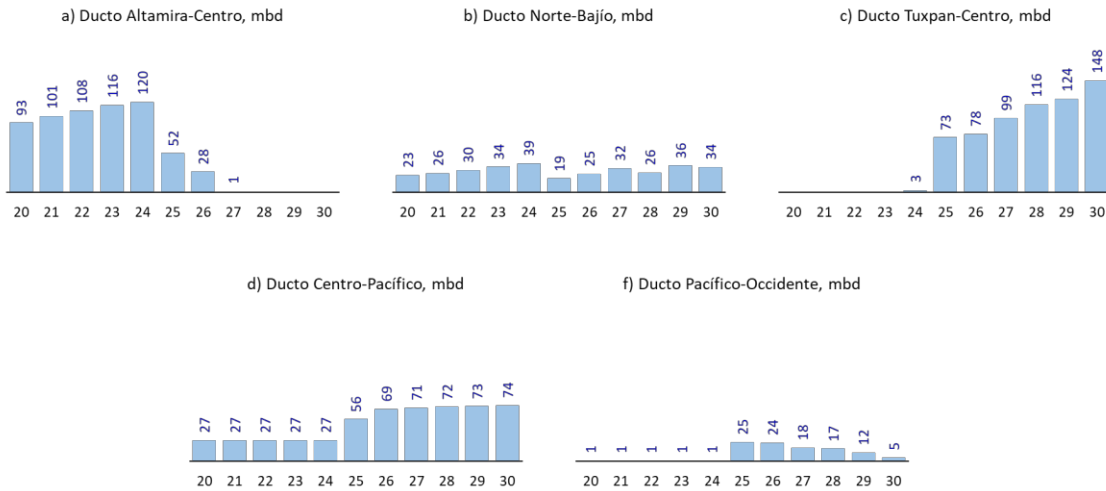
Figura 32. Distribución óptima 2024 con tarifa nivelada y escenario de crisis

La reducción de la demanda en el escenario pos-Covid conlleva una baja utilización del SNR sin incrementar las importaciones. Las variables operativas, Gráfica 21, se ven más relajadas y la utilización de los nuevos sistemas, Gráfica 22, prácticamente deja de ser necesario



Gráfica 21. Principales variables operativas, escenario pos-Covid con tarifa nivelada

Nótese que este escenario es el único que utiliza el sistema Pacífico-Occidente, pero más que como apoyo a la Zona Metropolitana de Guadalajara, lo hace para colocar los excedentes de producción de la refinera de Dos Bocas, que no tienen demanda en la zona Centro. En la Figura 33 se muestran los movimientos de 2025 para este escenario.



Gráfica 22. Utilización de la nueva infraestructura con tarifa nivelada y escenario pos-Covid

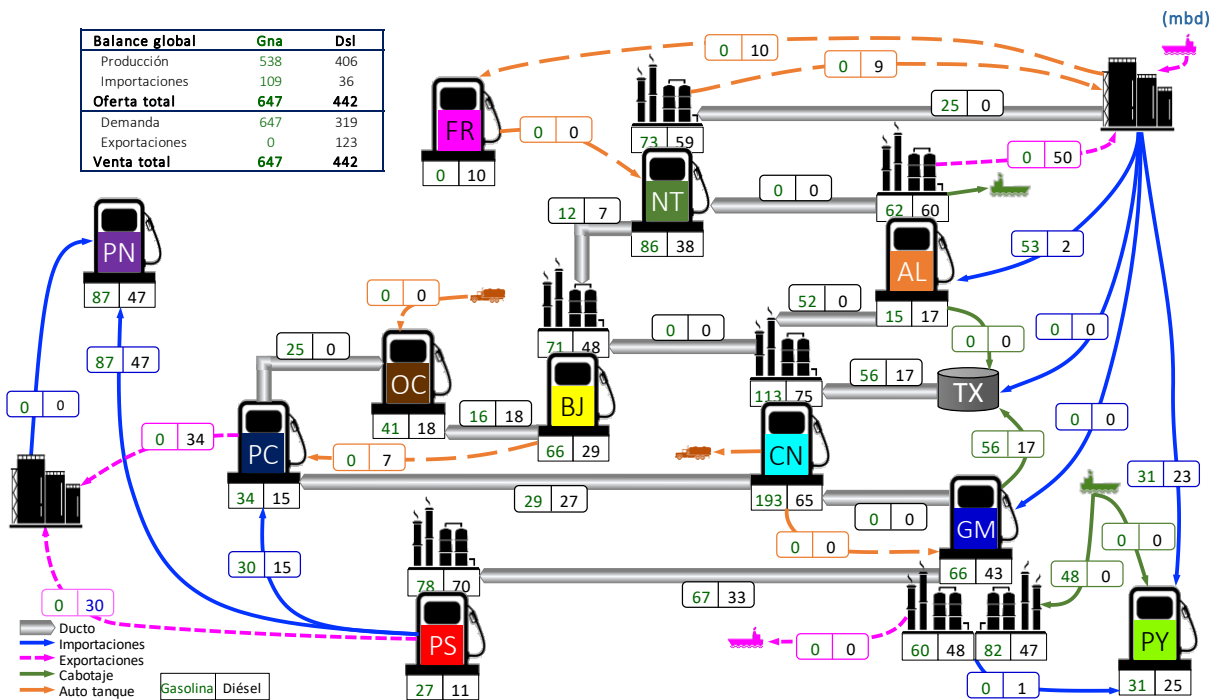
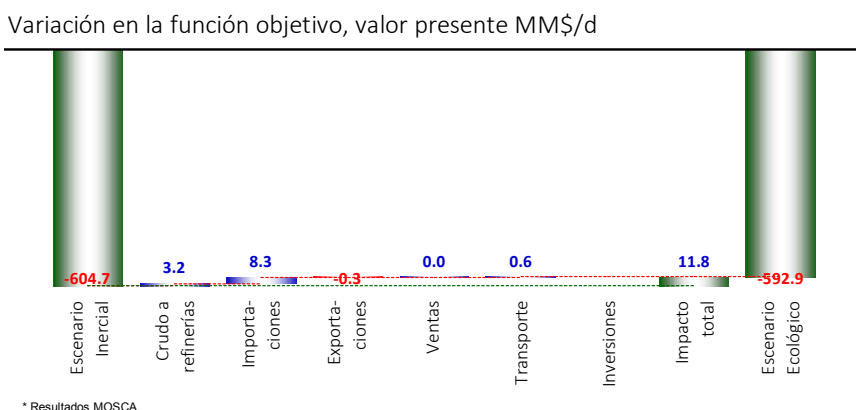


Figura 33. Distribución óptima 2025 con tarifa nivelada y escenario pos-Covid

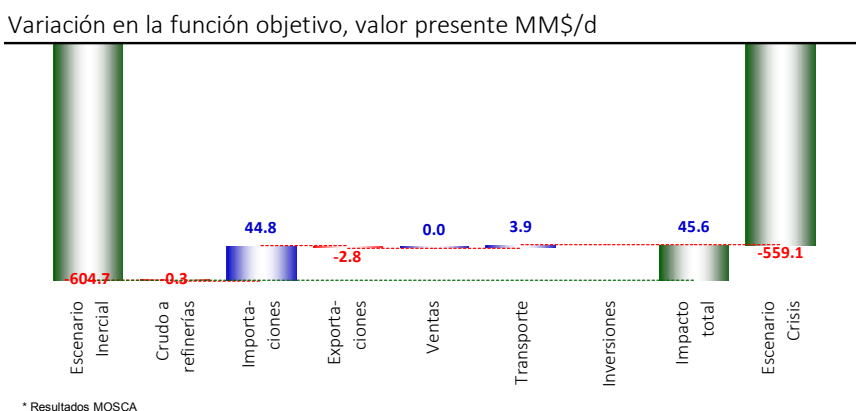
Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

Desde el punto de vista económico, podemos analizar el efecto del cambio de demanda al comparar la construcción de la función objetivo para dos corridas. Por ejemplo, al comparar los escenarios inercial y ecológico, Gráfica 23 , se tiene un menor costo de suministro de la demanda de 11.9 millones de dólares diarios, principalmente debido a la menor importación de productos (-7.8%). Cabe señalar que la función objetivo representa el costo de suministro de la demanda y no incluye los ingresos por la venta interna de combustibles automotrices, cuyo volumen debe cumplirse al nivel pronosticado.



Gráfica 23. Impacto económico con tarifa nivelada por el cambio de escenario de Inercial a Ecológico

El impacto económico del escenario que consideraba una crisis económica con respecto al inercial, Gráfica 24 , representa 45.6 millones de dólares diarios, equivalentes a las importaciones de productos. El ahorro en el transporte se compensa con un menor volumen de exportaciones.



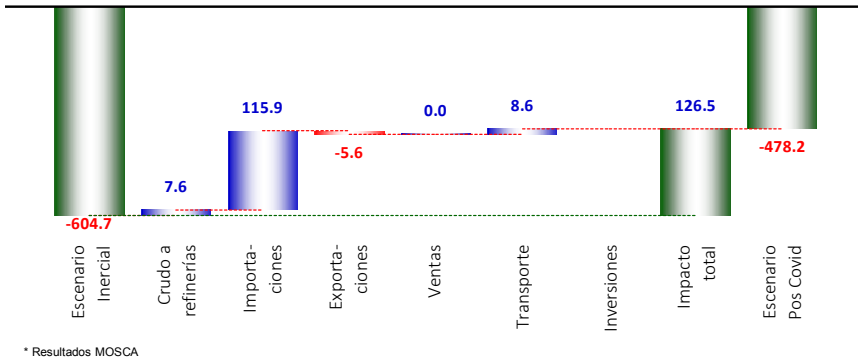
Gráfica 24. Impacto económico con tarifa nivelada por el cambio de escenario de Inercial a Crisis

En cuanto al escenario pos-Covid, Gráfica 25 , el costo de suministro de la demanda de combustibles automotrices se reduce en 78.2 millones de dólares diarios, compuestos por ahorros



en las importaciones (62%), menor proceso de crudo en refinerías (24%), mayores excedentes para exportación (8%) y el ahorro en los costos de transporte (6%).

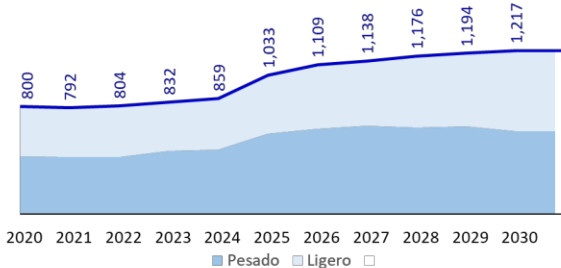
Variación en la función objetivo, valor presente MM\$/d



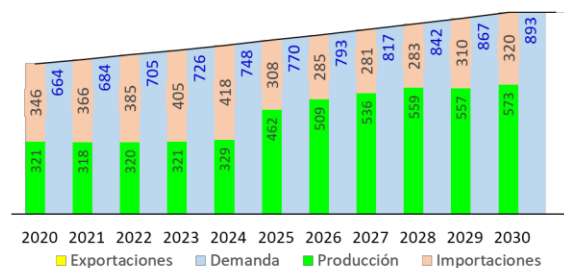
Gráfica 25. Impacto económico con tarifa nivelada por el cambio de escenario de Inercial a pos-Covid

La reducción en el costo de suministro de combustibles automotrices no debe interpretarse como un beneficio para la red, sino que se trata del efecto de una perspectiva diferente del país, en la que una reducción en la demanda es consecuencia de un menor crecimiento económico —incluso contracción— nada deseable para las finanzas nacionales.

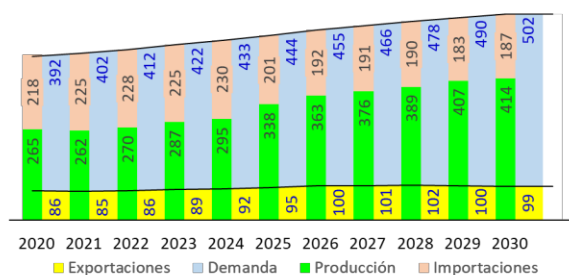
a) Proceso de crudo en el SNR, mbd



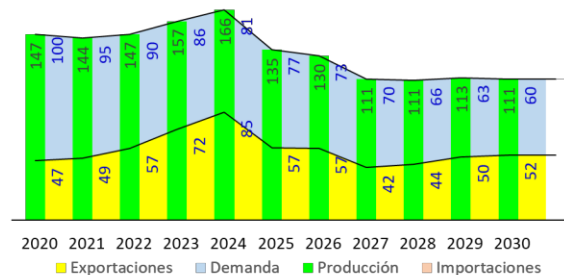
b) Balance de gasolinas, mbd



c) Balance de destilados intermedios, mbd



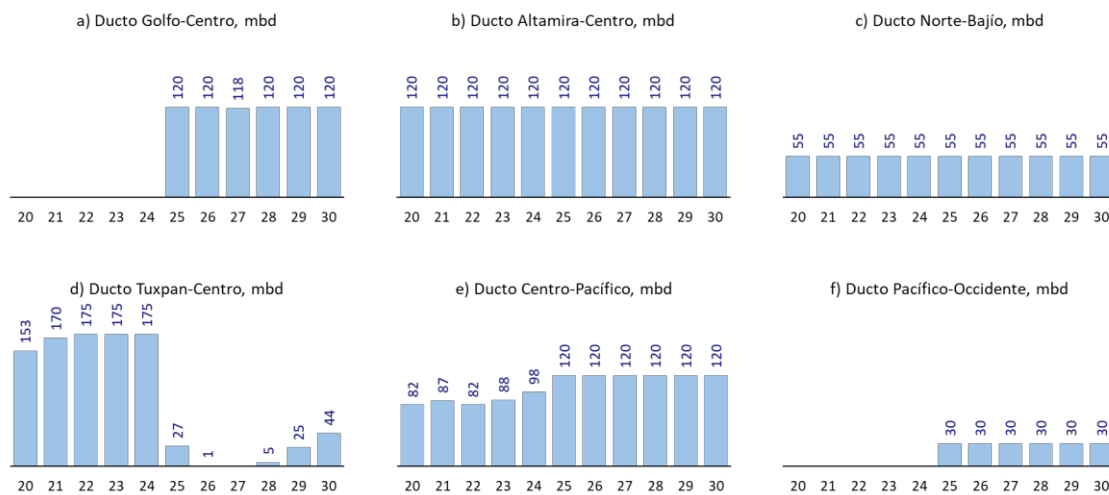
d) Balance de residuales, mbd



Gráfica 26. Principales variables operativas, escenario inercial con MIP

4.2. Programación Mixta Entera

Cuando se analizaron los resultados preliminares, se encontró que algunos de los sistemas de ductos propuestos no se utilizaban a toda su capacidad, por lo que el ingreso de un posible inversionista sería menor y tendría que hacerse un ajuste en la tarifa nivelada y repetir todo el ejercicio. Para evitar esta situación se analizan ahora los resultados que arroja la versión del modelo que considera MIP en el manejo de las inversiones.



Gráfica 27. Utilización de la nueva infraestructura con MIP y escenario inercial

Lo primero que se observa al checar las variables operativas para el escenario inercial en la Gráfica 26, es una reducción en el proceso de crudo, pues el modelo busca llenar los nuevos ductos una vez que se ha realizado la inversión, en vez de un crecimiento gradual en su utilización. Esta situación puede constatarse en la Gráfica 27, donde claramente se ve la utilización del ducto Tuxpan-Centro al inicio del horizonte y en 2025 la inversión en el sistema Golfo-Centro una vez que inicia operaciones la refinería de Dos Bocas. También se ve la conveniencia de invertir en el ducto Pacífico-Occidente en las mismas fechas, cuando el balance de producción es suficiente para hacerle llegar producto desde esta zona, en vez de utilizar la ruta actual desde la zona Bajío. Esto se puede corroborar comparando los movimientos del caso óptimo en 2021, Figura 34; y en 2030, Figura 35. También se aprecia que las importaciones por Tuxpan se reducen al arrancar el sistema Golfo-Centro.

Aunque el valor presente del costo de suministro de la demanda de combustibles automotrices varía muy poco con respecto al calculado mediante la tarifa nivelada, Gráfica 28, el desglose de la función objetivo sí muestra diferencias significativas, con un ahorro en las compras de crudo que se compensa con el impacto del comercio exterior —mayores importaciones y menores exportaciones—, más una reducción en los costos de transporte.

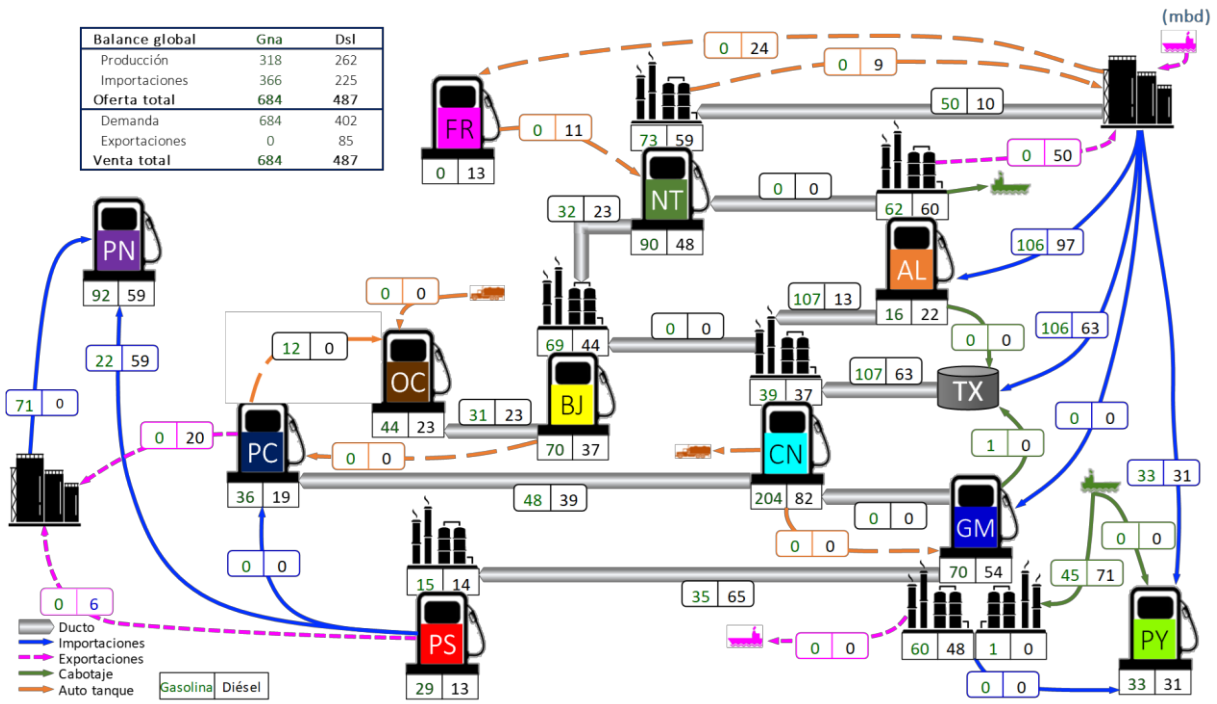


Figura 34. Distribución óptima 2021 con MIP y escenario Inercial

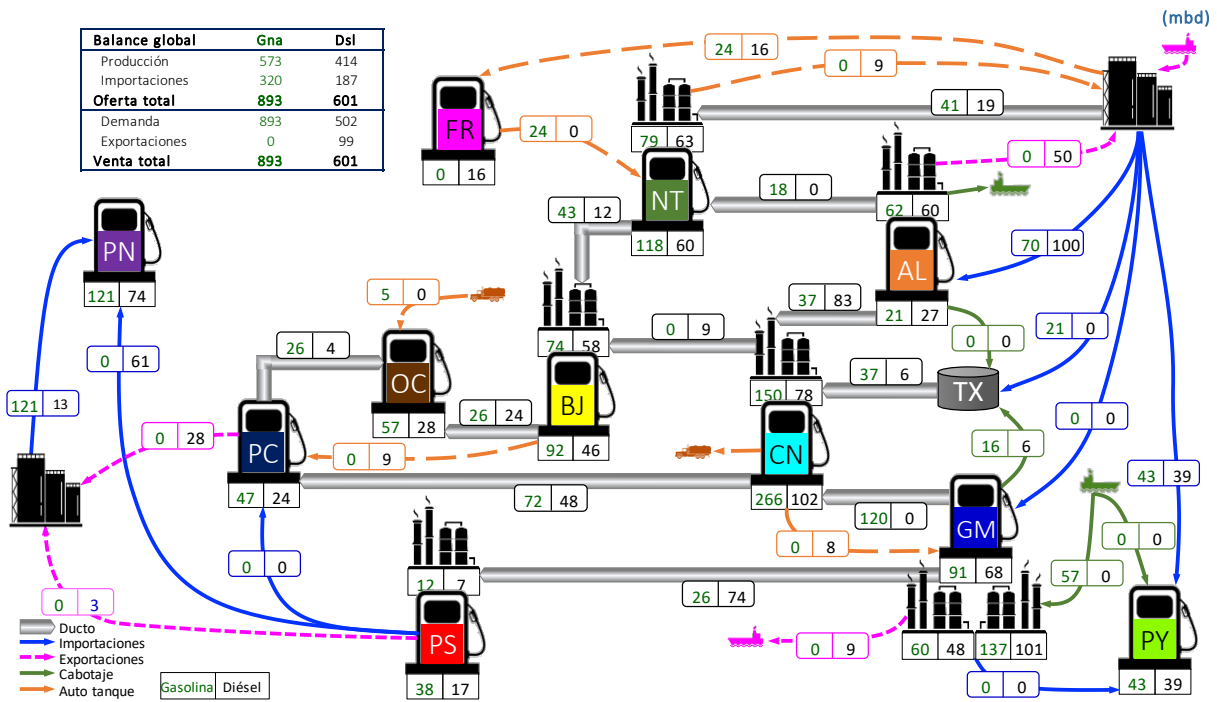
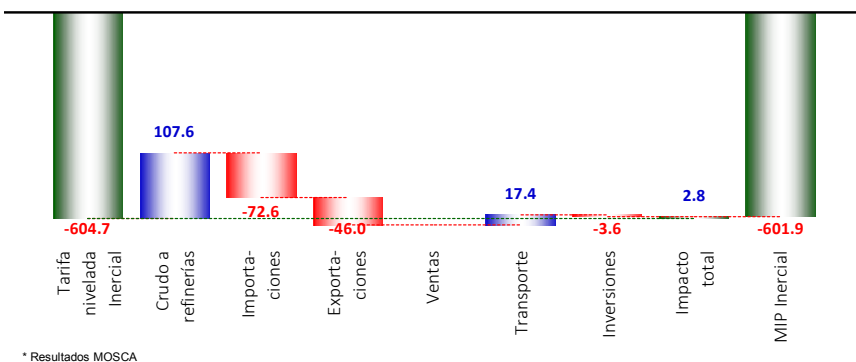


Figura 35. Distribución óptima 2030 con MIP y escenario Inercial

Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

Partiendo de un análisis más detallado de los resultados de ambas versiones del modelo y las diferencias entre la logística óptima, resulta de mayor utilidad la solución obtenida con el modelo MIP como soporte a la toma de decisiones sobre la expansión de la red de distribución, ya que se obtiene el año idóneo para la realización de las inversiones, mientras que al utilizar la tarifa nivelada no arroja esta información.

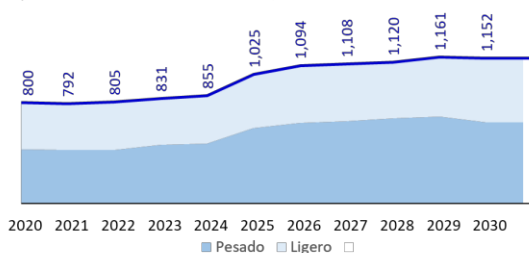
Variación en la función objetivo, valor presente MM\$/d



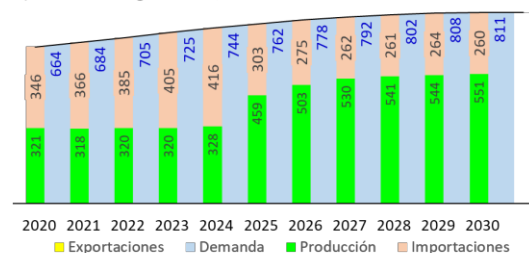
Gráfica 28. Impacto económico del cambio de tarifa nivelada a MIP, escenario inercial

Las variables operativas y la utilización de los sistemas de ductos también son sensibles a los diferentes escenarios de demanda y las inversiones pueden diferirse conforme el crecimiento en el consumo de combustibles automotrices sea menor.

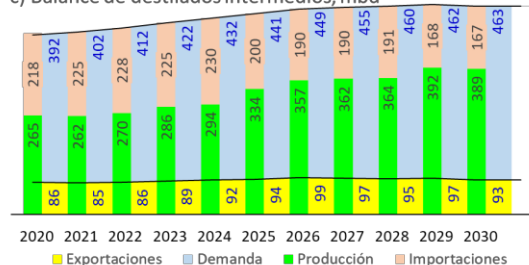
a) Proceso de crudo en el SNR, mbd



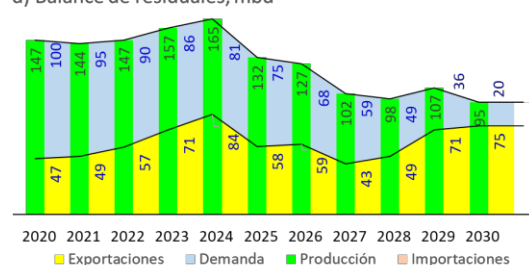
b) Balance de gasolinas, mbd



c) Balance de destilados intermedios, mbd



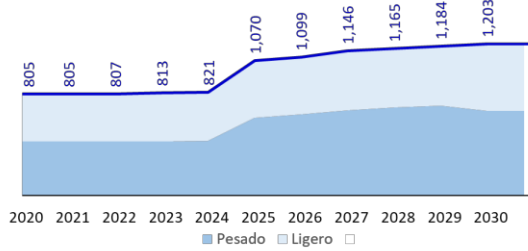
d) Balance de residuales, mbd



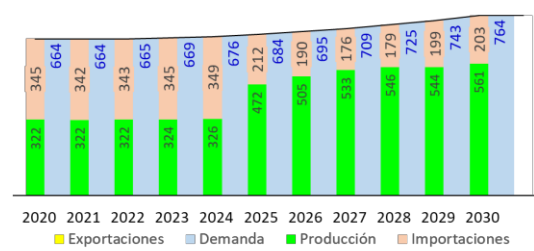
Gráfica 29. Principales variables operativas, escenario ecológico con MIP

De la Gráfica 29 a la Gráfica 31 se pueden apreciar las variables operativas para los escenarios ecológico, de crisis y pos-Covid, respectivamente. Destaca una mayor reducción en el proceso de crudo que al utilizar el modelo con tarifa nivelada y, por consiguiente, un impacto moderado en las importaciones.

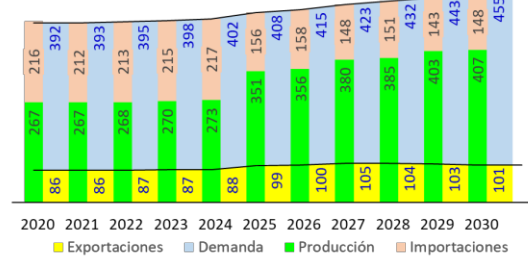
a) Proceso de crudo en el SNR, mbd



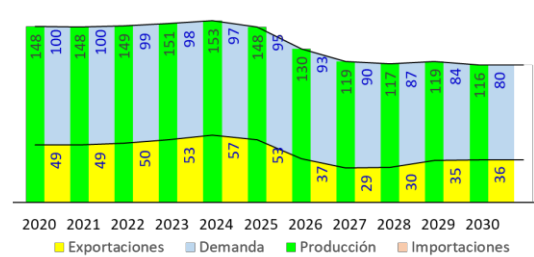
b) Balance de gasolinas, mbd



c) Balance de destilados intermedios, mbd

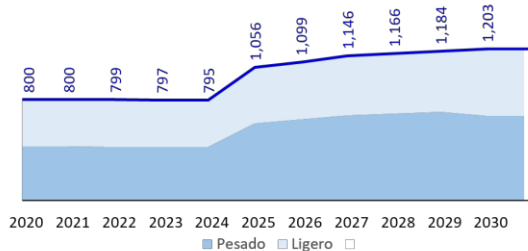


d) Balance de residuales, mbd

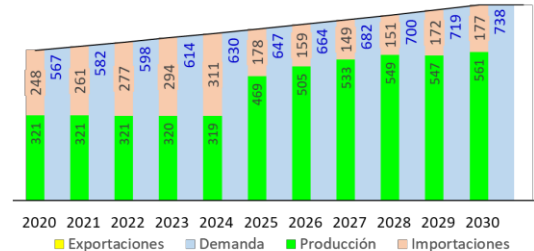


Gráfica 30. Principales variables operativas, escenario de crisis con MIP

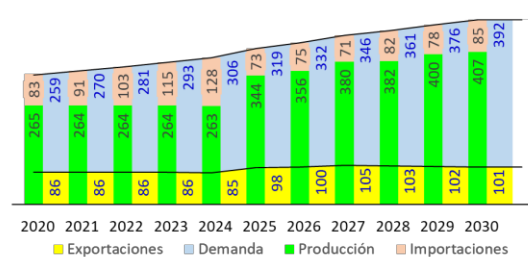
a) Proceso de crudo en el SNR, mbd



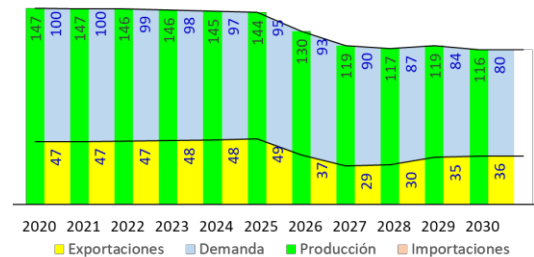
b) Balance de gasolinas, mbd



c) Balance de destilados intermedios, mbd



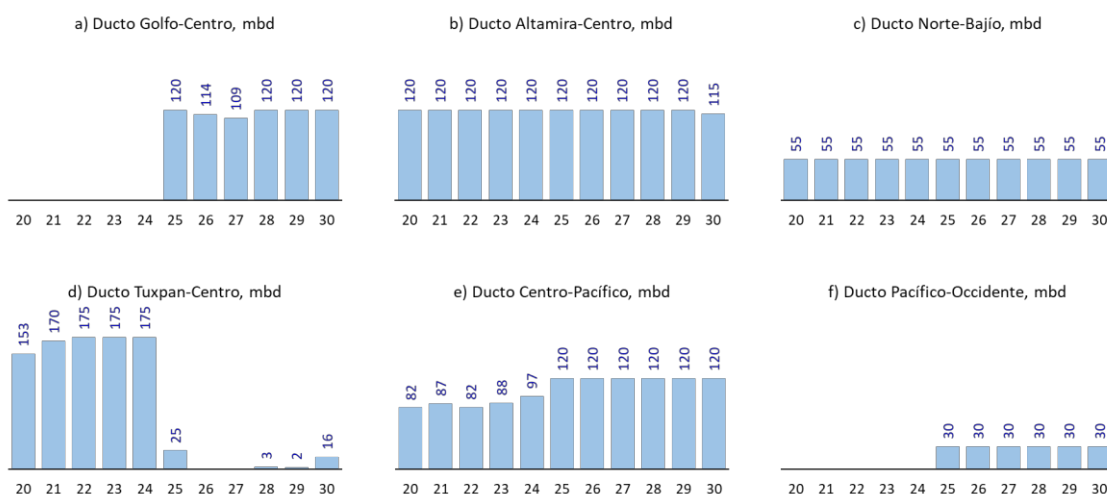
d) Balance de residuales, mbd



Gráfica 31. Principales variables operativas, escenario pos-Covid con MIP

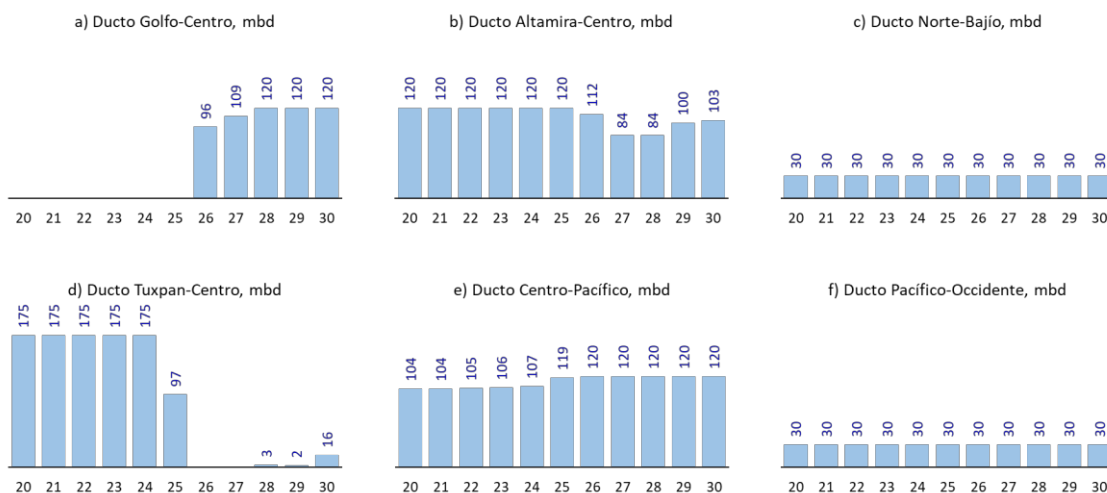
Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

En cuanto a la utilización de la nueva infraestructura, se presentan los resultados de la Gráfica 32 a la Gráfica 34 para los escenarios ecológico, de crisis y pos-Covid, respectivamente. Puede apreciarse cómo los sistemas de ductos dejan de utilizarse a plena capacidad, los cambios en el año óptimo de inversión e inclusive la reducción en el diámetro del ducto Norte-Bajío de 12” en los escenarios inercial y ecológico, a 10” en los escenarios de crisis y pos-Covid.

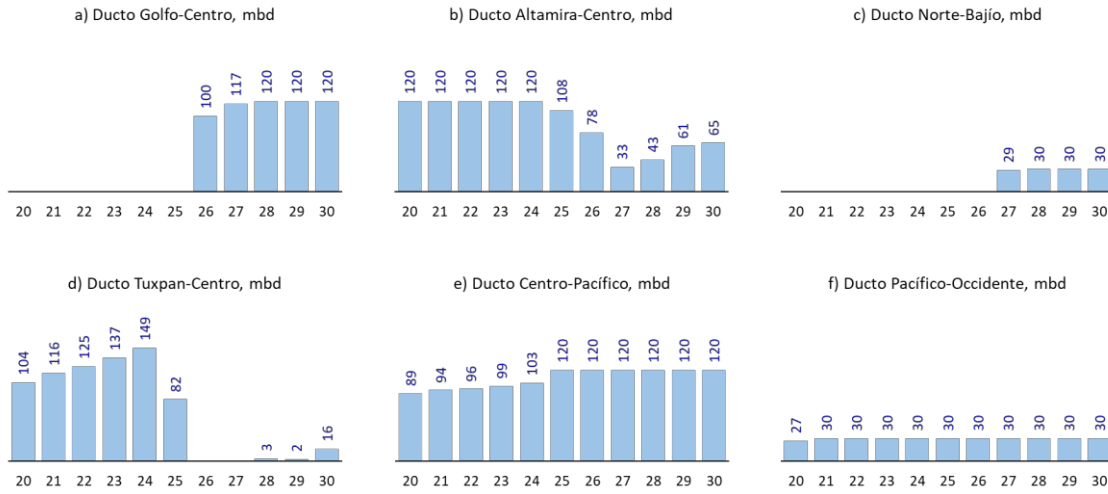


Gráfica 32. Utilización de la nueva infraestructura con MIP y escenario ecológico

La reducción de la demanda en los escenarios de crisis y pos-Covid permiten diferir la decisión sobre los sistemas Centro-Pacífico, Norte-Bajío y Pacífico-Occidente. No así para el sistema Golfo-Centro, dado que siempre se requerirá de infraestructura de transporte para hacer llegar la producción de la refinería de Dos Bocas a la Zona Centro, ya sea mediante un ducto nuevo en esta ruta o triangulando vía Tuxpan.

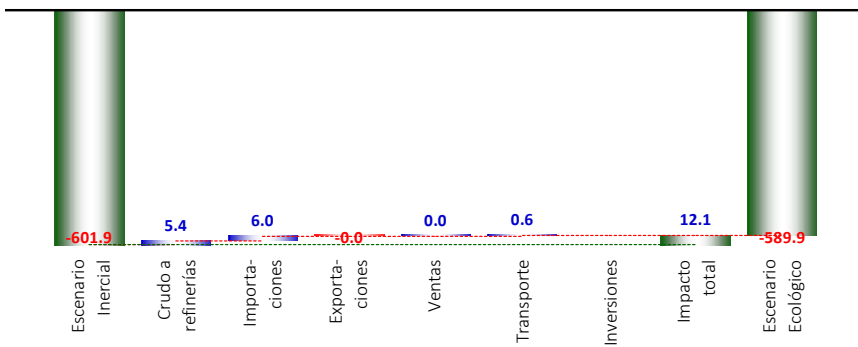


Gráfica 33. Utilización de la nueva infraestructura con MIP y escenario de crisis



Gráfica 34. Utilización de la nueva infraestructura con MIP y escenario pos-Covid

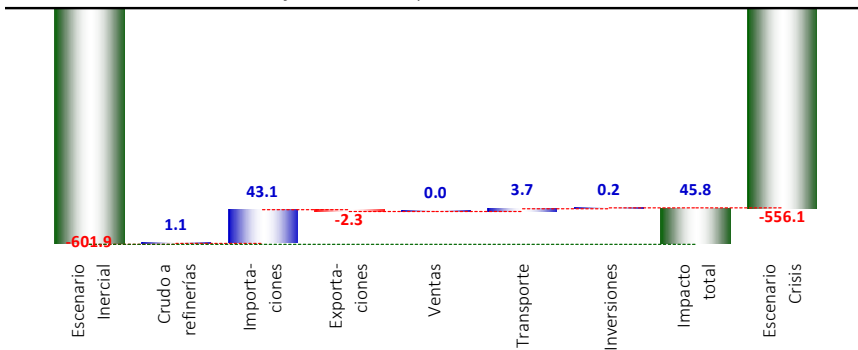
Variación en la función objetivo, valor presente MM\$/d



* Resultados MOSCA

Gráfica 35. Impacto económico con MIP por el cambio de escenario de inercial a ecológico

Variación en la función objetivo, valor presente MM\$/d



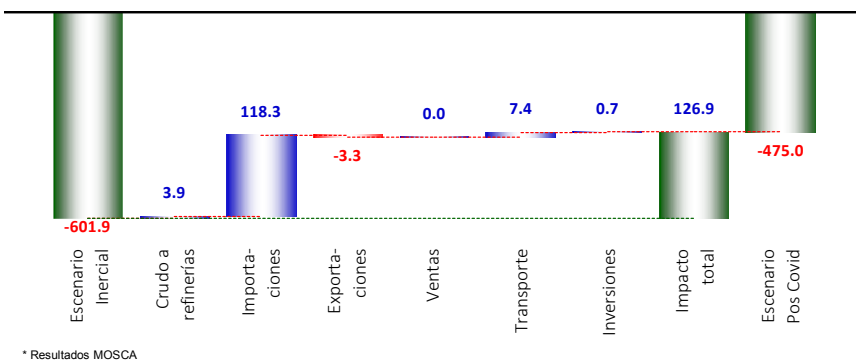
* Resultados MOSCA

Gráfica 36. Impacto económico con MIP por el cambio de escenario de inercial a crisis

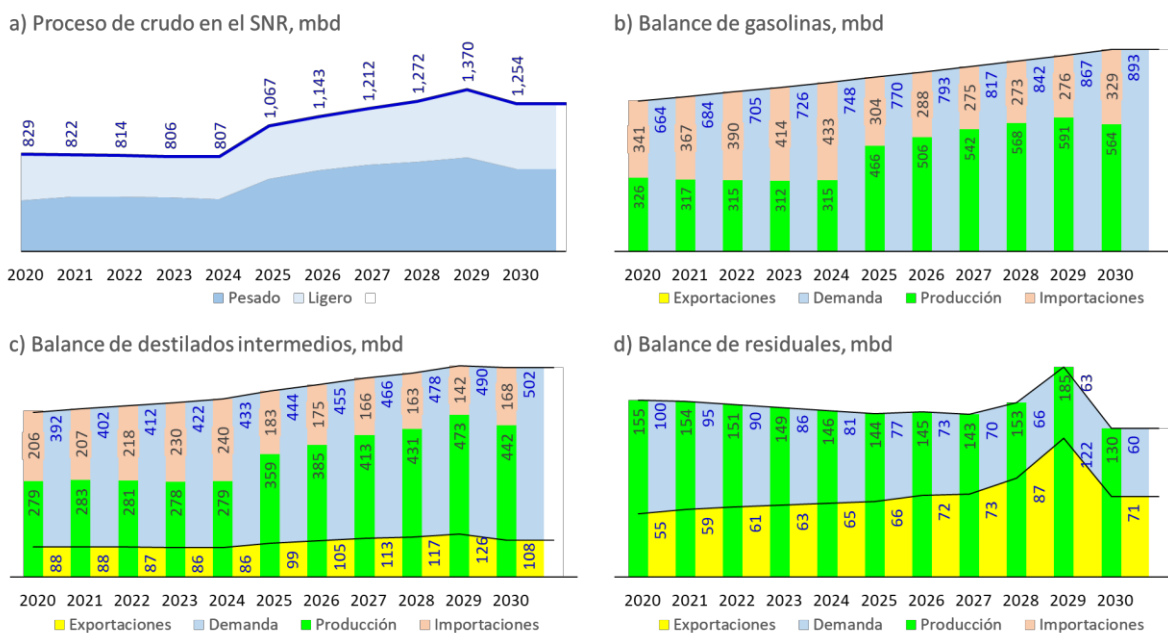
Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

La reducción en los costos de suministro de la demanda de combustibles automotrices al cambiar del escenario inercial a los escenarios ecológico, de crisis y pos-Covid se muestran de la Gráfica 35 a la Gráfica 37, respectivamente. La diferencia entre las funciones objetivo de los cambios de escenario está en los mismos órdenes de magnitud que las observadas con el modelo utilizando tarifa nivelada.

Variación en la función objetivo, valor presente MM\$/d



Gráfica 37. Impacto económico con MIP por el cambio de escenario de inercial a pos-Covid



Gráfica 38. Principales variables operativas, escenario inercial sin inversiones

4.3. Escenario sin expansión de la red

A manera de comparación, es necesario contar con los resultados del modelo considerando únicamente la infraestructura actual, es decir, sin inversión en expansiones. Las variables operativas para el escenario inercial se presentan en la Gráfica 38. El proceso de crudo es mayor, dado que el costo de internación para las importaciones sería más alto por tener que utilizar medios de transporte alternativos. Los movimientos para este escenario en 2030 —que es el caso extremo— se presentan en la Figura 36. Nótese que el ducto actual Tuxpan Centro se encuentra saturado y que es necesario transportar producto desde la refinería de Dos Bocas a la zona Centro mediante transporte por auto tanque.

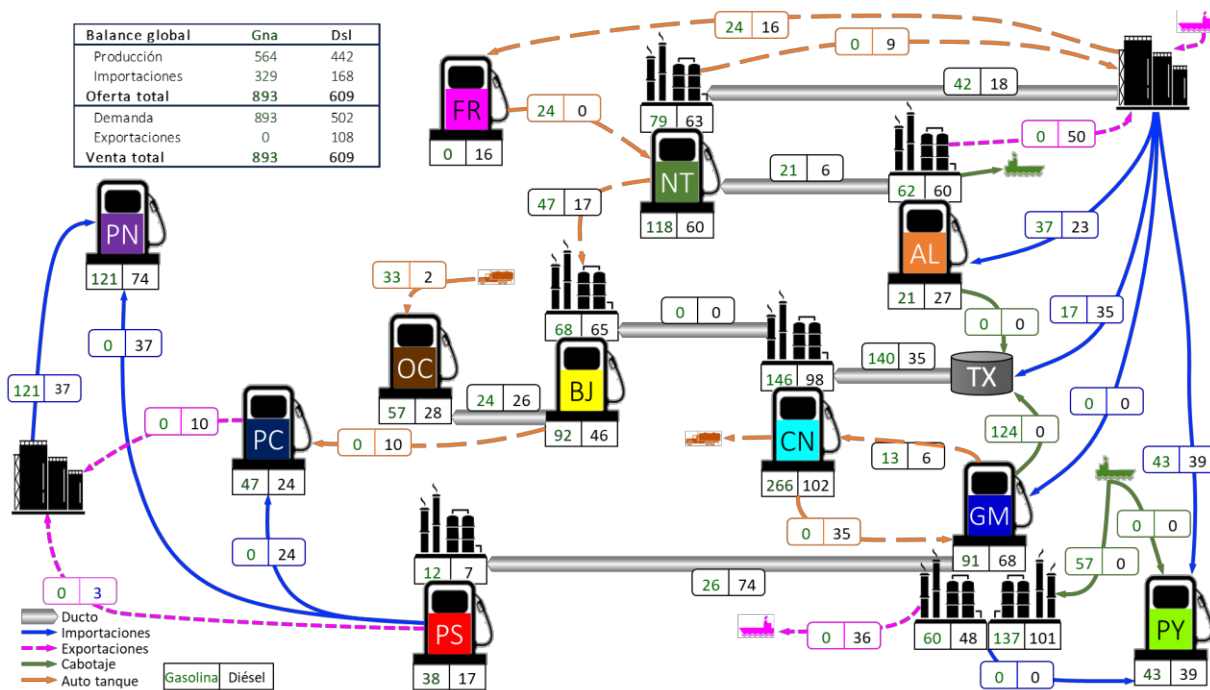


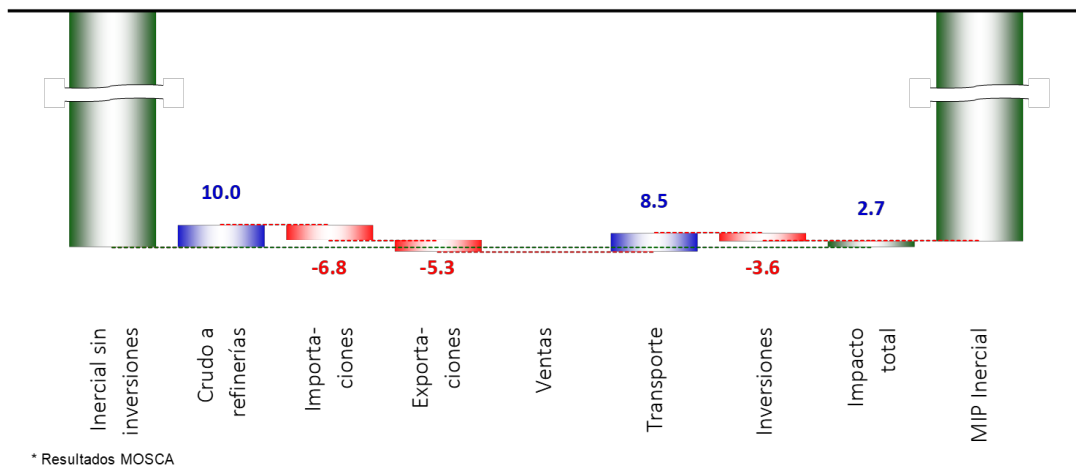
Figura 36. Distribución óptima 2030, escenario Inercial sin inversiones

Desde el punto de vista económico, la contribución de las inversiones para reducir el costo de suministro de la demanda de combustibles automotrices se puede determinar mediante la comparación de la función objetivo entre las corridas con MIP y sin inversiones. Este ejercicio se muestra en la Gráfica 39, donde se puede apreciar que el beneficio asociado a los proyectos de expansión en la red es de 2.7 millones de dólares diarios. Si se calcula esta contribución en términos de su valor presente para todo el horizonte de evaluación, el resultado es de 6 031 millones de dólares, cifra comparable con el valor presente neto declarado para el proyecto

Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

de la refinería de Dos Bocas por la Secretaria de Energía el 29 de julio de 2019¹³ de 2 571 millones de dólares después de impuestos.

Variación en la función objetivo, valor presente MM\$/d



Gráfica 39. Contribución económica de los proyectos de expansión de la red

4.4. Variación de precios

Como se mencionó en la sección 3.3, se generaron 64 juegos de precios para completar el LHS y con éstos se corrieron cada uno de los escenarios de largo plazo, para explorar la sensibilidad ante los diferenciales de precios (4 para crudos, 4 para productos y 4 para *Crack Spread*). Adicionalmente se eliminaron del modelo las cotas mínimas para el proceso en refinerías, de manera que la señal de precios pueda ser identificada claramente, aun tratándose de un escenario no operativo.

En la Figura 37 se presenta un esquema de cómo se ordenaron los resultados estocásticos, cuya lógica se describe a continuación:

- Cada renglón de la tabla representa el cuartil de *Crack Spread* que se utilizó en la corrida, ordenados de menor (arriba) a mayor (abajo).
- Cada columna representa el cuartil considerado para el diferencial de productos, ordenado de menor (izquierda) a mayor (derecha).
- Dentro de cada celda se presenta una gráfica con los resultados obtenidos para diferentes variables operativas (proceso de crudo, importación de gasolinas, balanza comercial

¹³ <https://www.forbes.com.mx/nahle-presume-alta-rentabilidad-de-nueva-refineria-en-dos-bocas/>

de destilados intermedios y exportación de residuales) a lo largo del horizonte de evaluación, así como el año óptimo de entrada en operación de la nueva infraestructura. Se contrastan los resultados para cada uno de los cuartiles para el diferencial de crudos (barras) con el resultado del caso determinista (línea).

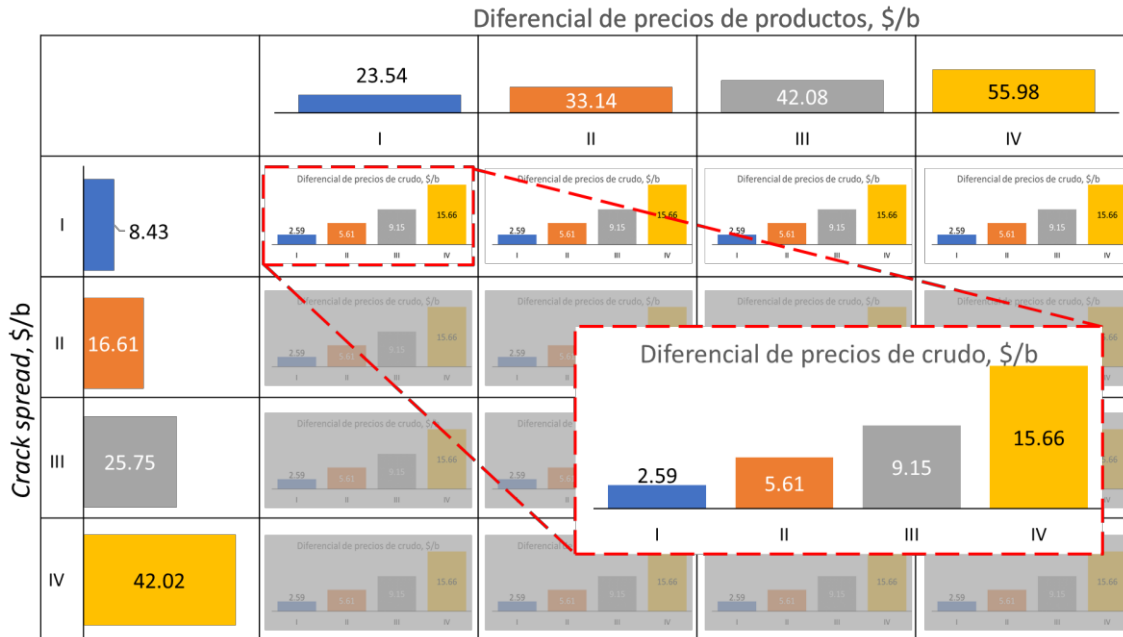


Figura 37. Esquema de presentación de resultados estocásticos

Siguiendo el criterio de Morris —variar un parámetro a la vez—, cada una de las mini gráficas permite ver el efecto de los diferenciales de crudo; la lectura horizontal, la variación en los diferenciales de productos al comparar las barras del mismo color; la lectura vertical, el efecto de variar el *Crack Spread*.

El impacto en las variables operativas es más claro para el escenario inercial, que es el de mayor crecimiento en la demanda. Los resultados estocásticos para el proceso de crudo se muestran en la Figura 38, en donde se puede apreciar que al aumentar el diferencial entre crudo ligero y crudo pesado se favorece un mayor nivel de proceso. Por el contrario, la carga a refinерías aumenta ante diferenciales estrechos entre productos ligeros y productos pesados. Sin embargo, la mayor sensibilidad para el proceso de crudo se obtiene al variar el margen de refinación —emulado mediante el *Crack Spread*—, con procesos bajos ante valores pequeños, siempre por debajo del resultado determinista, que incrementan conforme se amplía la brecha entre productos ligeros y crudo hasta superar ampliamente los valores de la corrida MIP con los pronósticos de precios.

Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

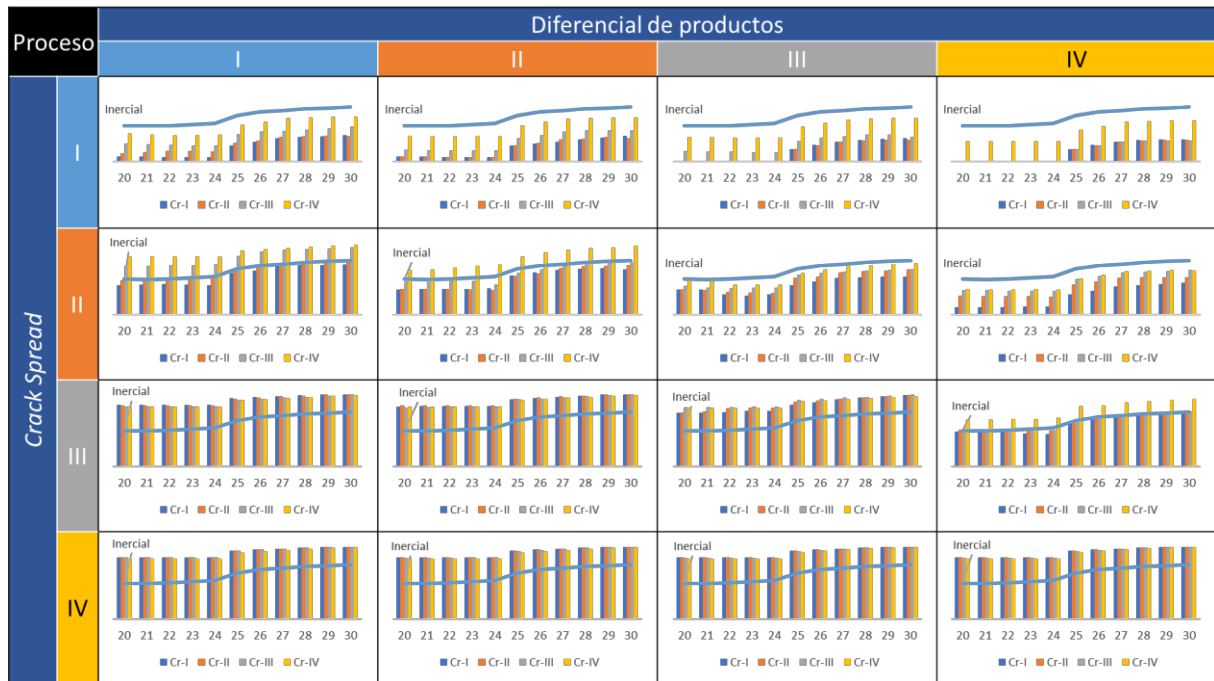


Figura 38. Variaciones en el proceso de crudo para el escenario inercial (LHS)

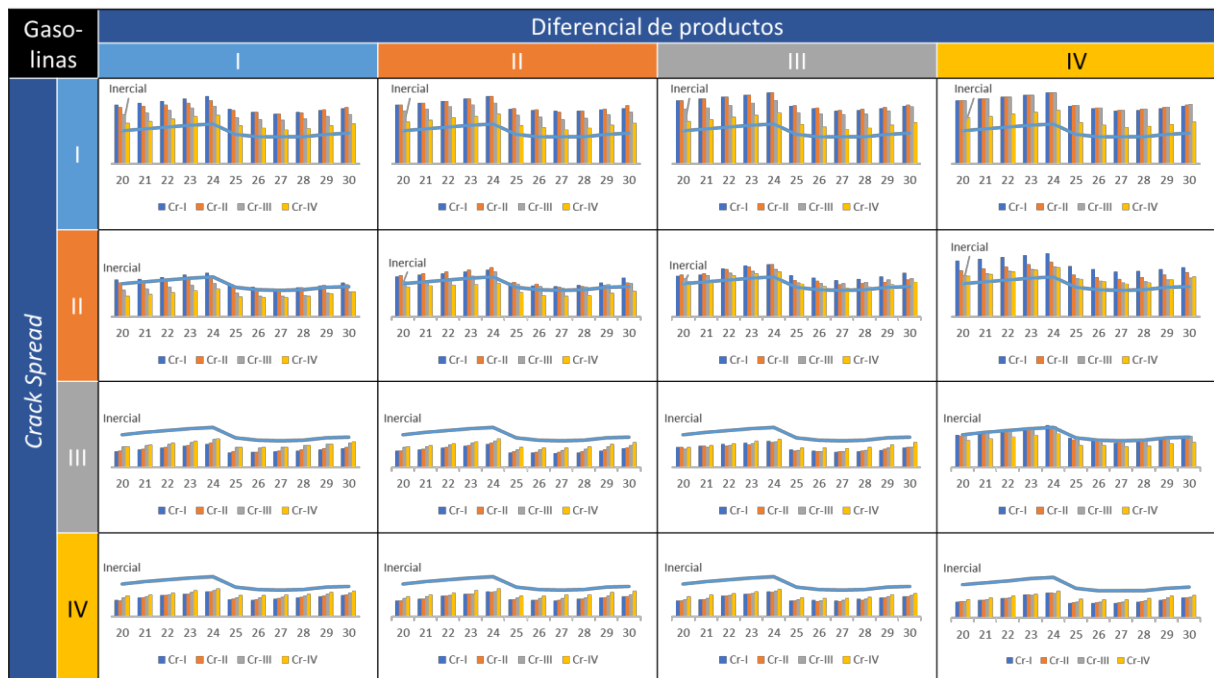


Figura 39. Variaciones en la importación de gasolina para el escenario inercial (LHS)

La importación de gasolina, Figura 39, tiene el comportamiento opuesto al proceso de crudo. Un valor alto para el *Crack Spread* implica que es más conveniente producir la gasolina que importarla cuando los márgenes superan a la media, mientras que las importaciones representan la mejor alternativa al bajar este indicador. Cuando el diferencial entre productos crece, las importaciones de gasolina también lo hacen, derivado de la reducción en el proceso de las refinerías. En cuanto a los diferenciales de precios de crudos, cuando éstos crecen las importaciones de gasolina disminuyen, dado que se favorece el proceso de crudo pesado en mayores volúmenes.

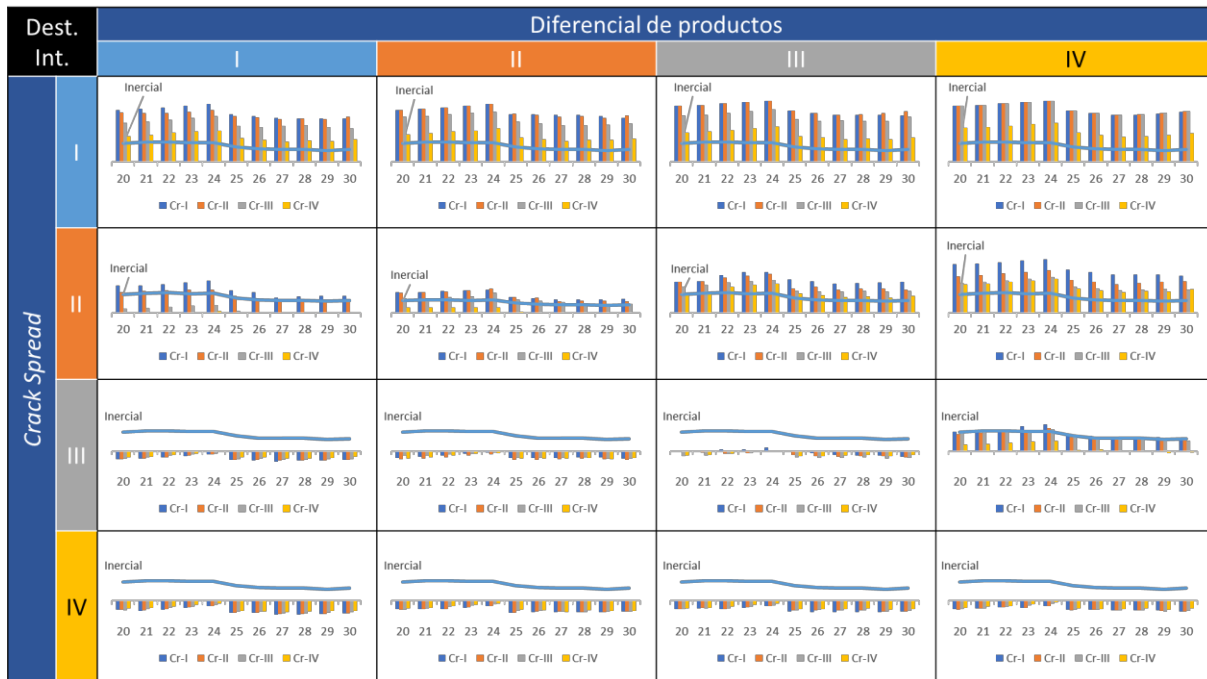


Figura 40. Variaciones en balanza comercial de destilados intermedios para el escenario inercial (LHS)

La Figura 40 presenta los resultados estocásticos para la balanza comercial de destilados intermedios (importaciones – exportaciones). Se puede ver que con bajos valores de *Crack Spread* se tiene una balanza comercial altamente dependiente de las importaciones, mientras que con altos márgenes de refinación se tiene una balanza comercial exportadora. Los diferenciales de productos estrechos favorecen la producción e inclinan la balanza comercial hacia las exportaciones, mientras que el diferencial entre los precios de crudo tiene el efecto contrario, reduciendo el nivel de las importaciones de destilados intermedios conforme se abarata el crudo pesado con respecto al crudo ligero.

La producción de residuales, y por ende su exportación, aumenta de manera significativa conforme el *Crack Spread* se hace más alto, pasando de importar a exportar, según la lectura de la Figura 41. El efecto que tiene el diferencial entre productos sobre las exportaciones de

Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

residuales no tiene una clara tendencia, pues éstas no varían en el mismo sentido para todos los casos. Con *Crack Spread* bajos, se tienen importaciones crecientes o exportaciones decrecientes de combustóleo para los valores bajos del diferencial de productos, pero para *Crack Spread* medio (III) las exportaciones de combustóleo disminuyen en ambos extremos del diferencial de productos. Por el contrario, al ampliarse los diferenciales de precio entre crudos sí muestran un claro incremento en la producción de residuales, consecuencia del proceso de una mezcla de crudo más pesada.

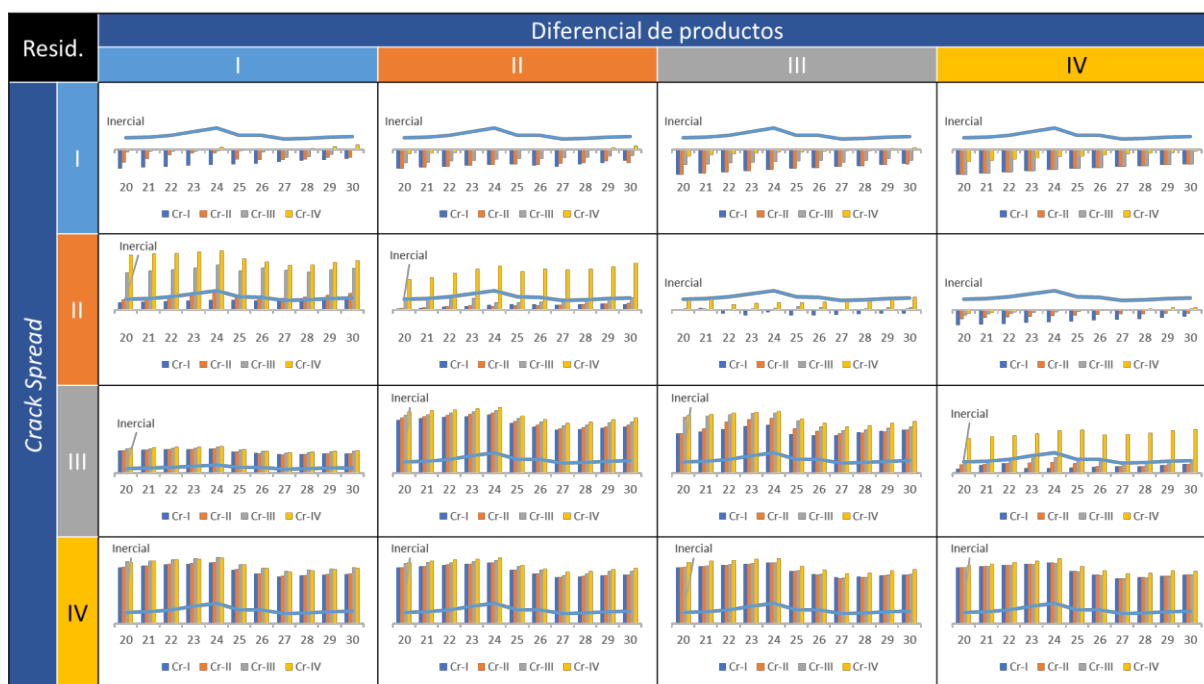
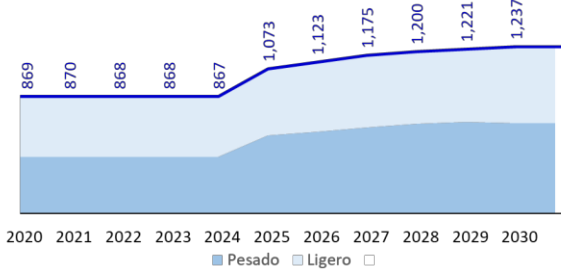


Figura 41. Variaciones en la exportación de residuales para el escenario inercial (LHS)

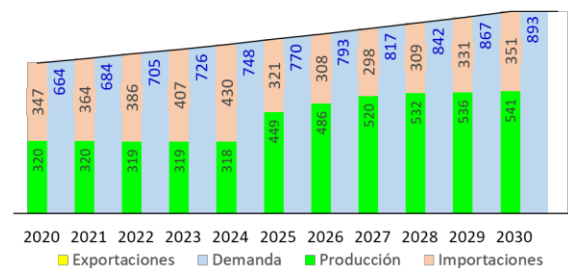
Dado que el LHS consta de 64 escenarios de precios isoprobabilísticos, se puede calcular el valor esperado de las variables operativas (Gráfica 40) y compararlo con los resultados obtenidos con la corrida determinista (Gráfica 26). Se puede apreciar un proceso de crudo ligeramente mayor, principalmente de crudo pesado. El valor esperado para las importaciones de gasolina aumenta, al igual que las importaciones de destilados intermedios. El impacto más significativo se aprecia en el valor esperado de los residuales, que en ocasiones presentan importaciones, pero cuando se exportan los excedentes, éstos son mayores que en el caso determinista.

Se podría determinar un impacto económico mediante la diferencia entre la función objetivo determinista y el valor esperado de la función objetivo para los casos estocásticos. Sin embargo, este resultado no tiene mucho sentido, pues el pronóstico de precios no es exactamente el que resultaría al calcular un escenario con la media de los diferenciales históricos.

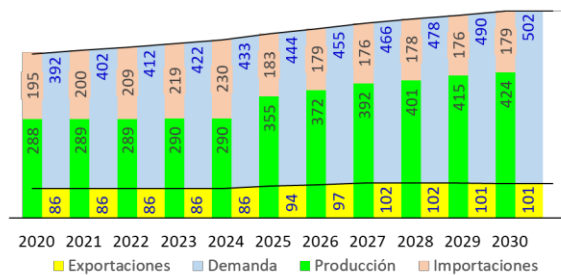
a) Proceso de crudo en el SNR, mbd



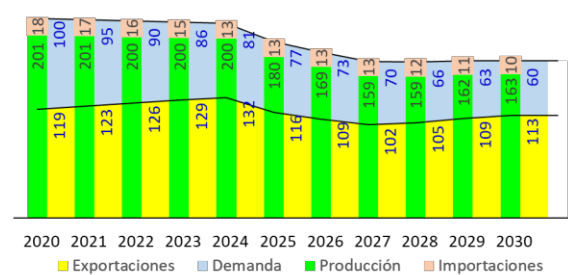
b) Balance de gasolinas, mbd



c) Balance de destilados intermedios, mbd



d) Balance de residuales, mbd



Gráfica 40. Valor esperado de las principales variables operativas, escenario inercial

Los cambios en las principales variables operativas para los casos estocásticos con los escenarios alternativos de largo plazo tienen comportamientos similares a los previamente expuestos, por lo que se omite presentar su análisis.

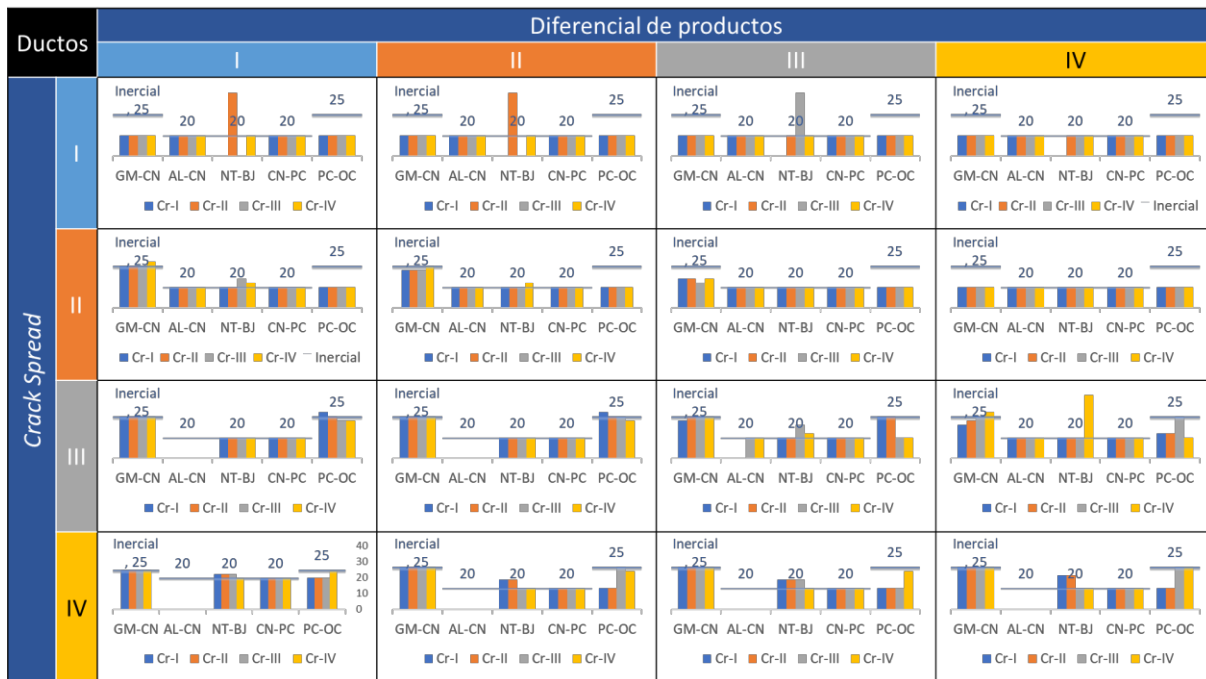


Figura 42. Año óptimo de operación de los sistemas de ductos, escenario inercial (LHS)

Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

Las diferencias en las variables operativas provocan cambios en la infraestructura requerida para la distribución de combustibles automotrices. En la Figura 42 se muestran los resultados estocásticos para la entrada en operación de los nuevos sistemas de ductos con el escenario inercial, comparando contra el año óptimo de entrada en operación obtenido mediante las corridas MIP con el escenario de precios pronóstico.

El sistema Golfo-Centro (GM-CN) tiende a adelantarse con niveles bajos de *Crack Spread* y diferenciales de productos amplios, pero sin gran impacto derivado de los diferenciales entre crudos. Un comportamiento similar se aprecia en el sistema Pacífico-Occidente (PC-OC), salvo que los diferenciales amplios entre crudos sí modifican el año óptimo para su puesta en marcha. Por otro lado, el sistema Centro-Pacífico (CN-PC) no sufre modificaciones con los escenarios de precios, mientras que los sistemas Altamira-Centro (AL-CN) y Norte-Bajío (NT-BJ) presentan las mayores desviaciones en su año óptimo de arranque e incluso dejan de ser necesarios para algunos escenarios de precios.

De manera similar a lo que se presenta en la sección 4.2, el efecto que tiene la demanda en el año de entrada en operación para los nuevos sistemas también es notorio para el caso estocástico. En la Figura 43 se presentan los resultados para el escenario ecológico, donde nuevamente se ve al sistema AL-CN como el más sensible a los cambios de precios.

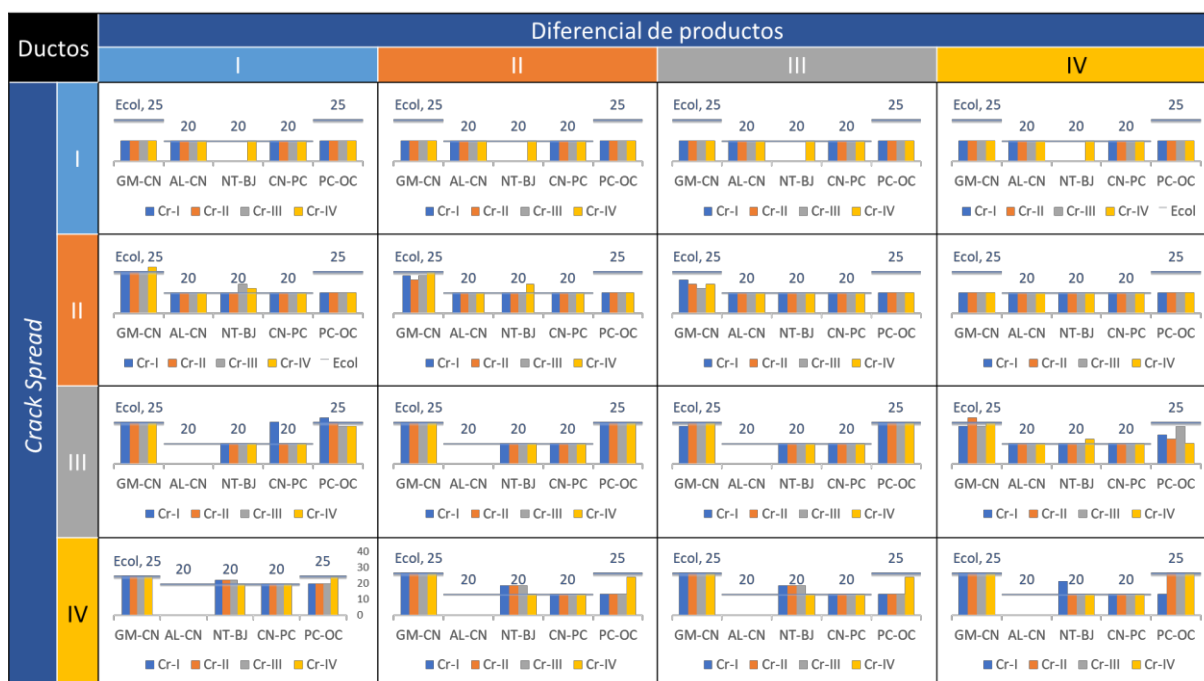


Figura 43. Año óptimo de operación de los sistemas de ductos, escenario ecológico (LHS)

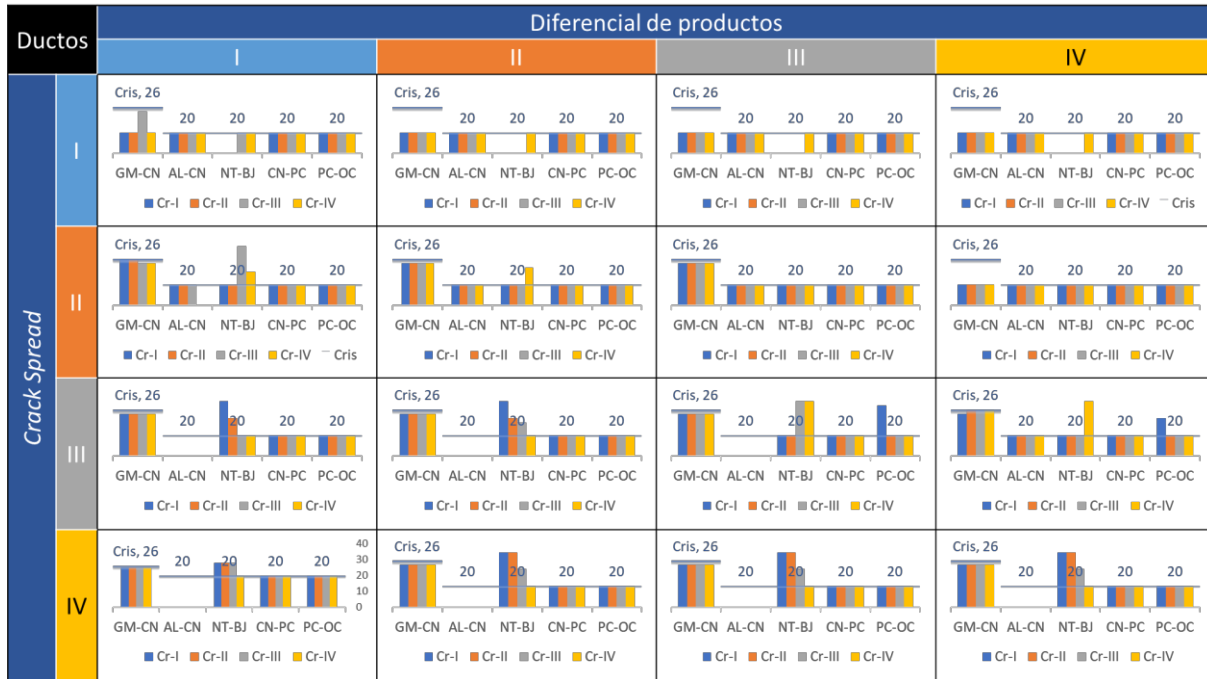


Figura 44. Año óptimo de operación de los sistemas de ductos, escenario de crisis (LHS)

Para el escenario de crisis, Figura 44, se confirman los años de entrada en operación para casi todos los sistemas de ductos, salvo el AL-CN y en algunos casos el ducto NT-BJ.

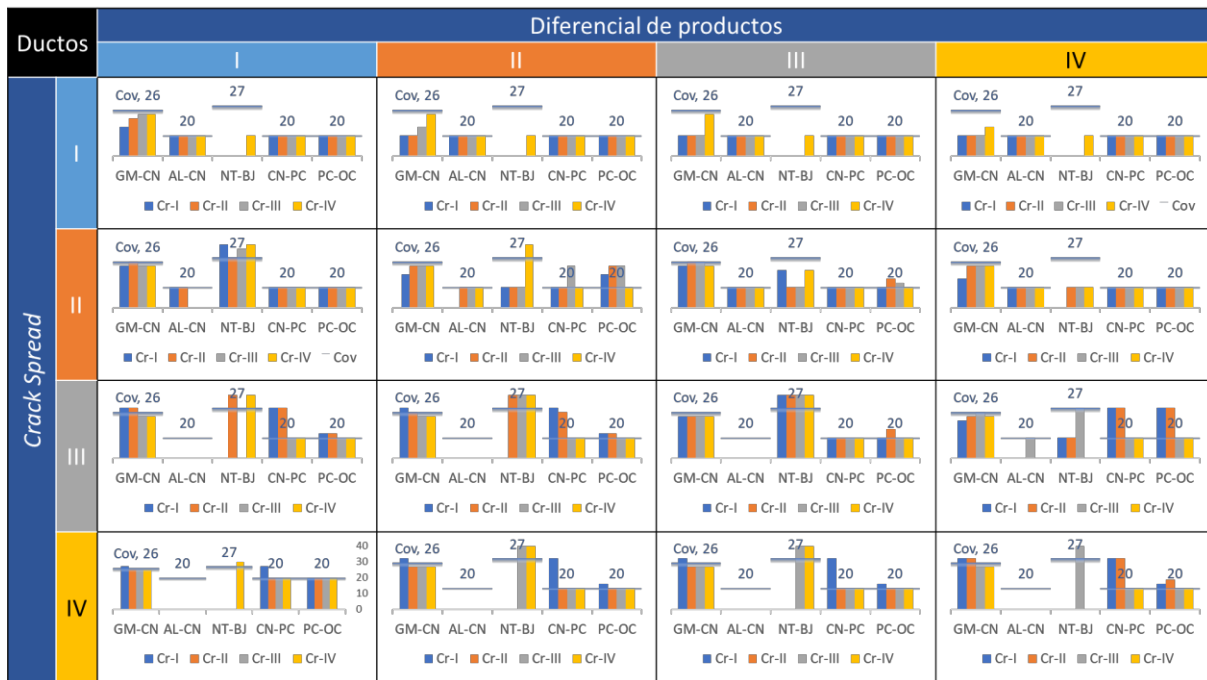


Figura 45. Año óptimo de operación de los sistemas de ductos, escenario pos-Covid (LHS)

Los resultados estocásticos para el escenario pos-Covid, Figura 45, muestran que sería necesario diferir, e incluso cancelar, la expansión de la red de distribución de combustibles automotrices.

5. Conclusiones

La primera reflexión que viene a la mente tras analizar los resultados obtenidos es la gran dependencia de las importaciones que tiene México, tanto de gasolina como de destilados intermedios. La construcción de la refinería de Dos Bocas es insuficiente inclusive para cubrir el déficit de producción actual, ni qué decir ante escenarios de crecimiento. La principal necesidad de infraestructura es, precisamente, para transportar la producción desde Dos Bocas hasta la zona Centro del país, ya sea mediante un ducto directo Dos Bocas-Valle de México o triangulando por el puerto de Tuxpan y ampliando el sistema actual Tuxpan-México.

El parámetro que mayores variaciones provoca en las necesidades futuras de infraestructura es el margen de refinación o *crack spread*. Este tema debe tratarse con especial cuidado en la prospectiva de posibles escenarios, mediante un análisis profundo del mercado. De hecho, el pronóstico de precios en el escenario determinista difiere del valor medio de los datos históricos utilizados para obtener las funciones de densidad de probabilidad que dieron origen al hipercono latino

El planteamiento final para incluir un escenario pos-Covid resultó trascendente para la toma de decisiones sobre las necesidades de infraestructura adicional de transporte y permite diferir el análisis hasta tener claras señales de recuperación ya no sólo económica, sino de la demanda de combustibles automotrices, dados los cambios en los patrones y necesidades de transporte derivados de la “nueva normalidad”.

La utilización de un modelo simple es un buen punto de partida para un análisis preliminar de las necesidades de expansión de una cadena de suministro, ya que permite explorar un espectro más amplio e incorporar profundidad en el análisis mediante la inclusión de, por ejemplo, multi-períodos o variables enteras, sin los inconvenientes en tiempo de preparación de las corridas, ejecución del modelo e interpretación de resultados, que se tendrían con un modelo de mayor tamaño.

La metodología utilizada puede aplicarse a otras cadenas de suministro, en particular del sector energético, como podrían ser la distribución de gas natural, fragmentos de la red de distribución de petrolíferos con mayores niveles de detalle, como la distribución de una terminal hacia las estaciones de servicio, e incluso para la generación y transmisión de electricidad.



En este trabajo quedaron muchas ideas sin desarrollar, como la determinación e inclusión de factores de confiabilidad en la operación de la infraestructura, tanto en refinerías como en la red de distribución; o la incertidumbre sobre los datos utilizados para construir el modelo. No se agregó el manejo de producto en terminales, ni el análisis de la capacidad de almacenamiento y la validación de las políticas de inventarios mínimos establecido por la Secretaría de Energía.

Dentro de las múltiples opciones de continuación para este trabajo, una de las más interesantes podría ser la inclusión de la huella de carbono en la cadena de suministro, sus costos de mitigación y la inclusión de vehículos híbridos, eléctricos o de hidrógeno en la matriz de transporte. Esto podría ayudar a evaluar propuestas de políticas de movilidad dirigidas al mejoramiento del medio ambiente con perspectivas económicas viables.

La utilización de vehículos automotores basados en combustibles fósiles será, tarde o temprano, reemplazada por fuentes de energía más amigables con el medio ambiente. En la medida que la salida del mercado de los motores a diésel y gasolina se realice de manera óptima, los costos de las nuevas tecnologías tendrán que ser más competitivos.



6. Nomenclatura

AL	Zona Altamira
API	Medida de densidad de hidrocarburos establecida por el <i>American Petroleum Institute</i>
BJ	Zona Bajío
C ₃ /C ₄	Propileno / Butilenos
C ₅ /C ₆	Pentanos / Hexanos
Capex	Gastos de capital
CN	Zona Centro
CRE	Comisión Reguladora de Energía
EPC	Ingeniería, procura y construcción
FCC	<i>Fluidized catalytic cracking</i> (desintegración catalítica fluidizada)
FR	Zona Frontera
GLP	Grupo gas licuado (LPG + C ₃ /C ₄)
GM	Zona Golfo de México
GRTMPS	<i>Generalized Refining Transportation Marketing Planning System</i>
gSLP	Programación lineal sucesiva generalizada
H ₂	Hidrógeno
HDS	Hidrodesulfuración
ISR	Impuesto sobre la renta
km	Kilómetros
LHS	<i>Latin Hypercube Sampling</i> (muestreo de hipercubo latino)
LPG	Gas licuado de petróleo
mbd	Miles de barriles por día
mi	Millas
MILP	Programación lineal mixta entera
MIP	Programación mixta entera
MM\$/d	Millones de dólares diarios
MMB	Millones de barriles
MMBD	Millones de barriles diarios
MMUS\$	Millones de dólares
MOSCA	Modelo de Optimización del suministro de Combustibles Automotrices
MOSNR	Modelo de Optimización del Sistema Nacional de Refinación
NLMIP	Programación no lineal mixta entera
NT	Zona Norte
OC	Zona Occidente
OMA	Operación y mantenimiento
OMNI	Lenguaje de modelación y generación de matrices
Opex	Gastos de operación
PC	Zona Pacífico Centro



PN	Zona Pacífico Norte
ppm	Partes por millón
PS	Zona Pacífico Sur
PY	Zona Península de Yucatán
SNR	Sistema Nacional de Refinación
TAR	Terminal de Almacenamiento y Reparto
TM	Terminal Marítima
TMCA	Tasa media de crecimiento anual
TV	Tanque vertical
TX	Zona Tuxpan
US\$/b	Dólares por barril
USGC	Costa norteamericana del Golfo de México
VPC	Valor presente de costos
VPN	Valor presente neto
Z	Distribución acumulada de probabilidad en función gamma de precios
Z	Función objetivo en modelos de optimización
ZMVM	Zona metropolitana del Valle de México



7. Referencias

- [1] International Energy Agency, 19 04 2017. [En línea]. Available: <https://www.eia.gov/petroleum/data.php>.
- [2] A. Gharaei, S. Pasandideh y A. Arshadi Khamseh, «Inventory model in a four-echelon integrated supply chain: modeling and optimization,» *Journal of Modelling in Management*, vol. 12, n° 4, pp. 739-762, 2017.
- [3] S. L. Brüning, D. Masi, D. Cordes y P. Jacobsen, «How the reverse supply chain impacts the firm's financial performance. A manufacturer's perspective,» *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 48, n° 3, pp. 284-307, 2018.
- [4] P. M. Castro y H. Mostafaei, «Product-centric continuous-time formulation for pipeline scheduling,» *Computers and Chemical Engineering*, n° 104, pp. 283-295, 2017.
- [5] I. E. Grossmann, «Advances in mathematical programming models for enterprise-wide optimization,» *Computers and Chemical Engineering*, n° 47, pp. 2-18, 2012.
- [6] Q. Zhang, A. Sundaramoorthy, I. E. Grossmann y J. M. Pinto, «Multiscale Production Routing in Multicommodity Supply Chains with Complex Production Facilities,» *Computers & Operations Research*, n° 79, pp. 217-222, 2016.
- [7] M. Dal-Mas, S. Giarola, A. Zamboni y F. Bezzo, «Strategic design and investment capacity planning of the ethanol supply chain under price uncertainty,» *Biomass and bioenergy*, n° 35, pp. 2059-2071, 2011.
- [8] S. Giarola, F. Bezzo y N. Shah, «A risk management approach to the economic and environmental strategic design of ethanol supply chains,» *Biomass and bioenergy*, n° 58, pp. 31-51, 2013.
- [9] T. Nishi y O. Yoshida, «Optimization of Multi-period Bilevel Supply Chains under Demand Uncertainty,» *Procedia CIRP*, n° 41, pp. 508-513, 2016.
- [10] B. Hu y Y. Feng, «Optimization and coordination of supply chain with revenue sharing contracts and service requirement under supply and demand uncertainty,» *International Journal of Production Economics*, n° 183, pp. 185-193, 2017.



- [11] D. Yue y F. You, «Stackelberg-game-based modeling and optimization for supply chain design and operations: A mixed integer bilevel programming framework,» *Computers and Chemical Engineering*, nº 102, pp. 81-95, 2017.
- [12] P. Garcia-Herreros, J. M. Wassick y I. E. Grossmann, «Design of Resilient Supply Chains with Risk of Facility Disruptions,» *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 53, nº 44, pp. 17240-17251, 214.
- [13] S. Mitra, J. M. Pinto y I. E. Grossmann, «Optimal multi-scale capacity planning for power-intensive continuous processes under time- sensitive electricity prices and demand uncertainty. Part I: Modeling,» *Computers and Chemical Engineering*, nº 65, pp. 89-101, 2013.
- [14] M. Santos, P. Ferreira y M. Araújo, «A methodology to incorporate risk and uncertainty in electricity power planning,» *Energy*, vol. 115, nº P2, pp. 1400-1411, 2016.
- [15] F. Oliveira, I. Grossmann y S. Hamacher, «Accelerating Benders Stochastic Decomposition for the Optimization under Uncertainty of the Petroleum Product Supply Chain,» *Computers and Chemical Engineering*, nº 49, pp. 47-58, 2012.
- [16] E. Nakhai y J. Soroor, «A Robust Optimization Model Based On The Green Supply Chain Network Design Under Uncertainty Of Future Economic Conditions,» *The Open Access Journal of Resistive Economics*, vol. 2, nº 1-4, pp. 56-59, 2014.
- [17] R. Apap, «Models and Computational Strategies for Multistage Stochastic Programming under Endogenous and Exogenous Uncertainties,» CMU Dissertations, Pittsburgh, 2017.
- [18] N. Garzón, E. González-Neira y I. Pérez-Vélez, «Metaheurística para la solución del Transit Network Design Problem multiobjetivo con demanda multiperiodo,» *Ingeniería y Ciencia*, vol. 13, nº 25, pp. 29-69, 2017.
- [19] S. Mitra, P. Garcia-Herreros y I. Grossmann, «A Cross-decomposition Scheme with Integrated Primal-dual Multi-cuts for Two-stage Stochastic Programming Investment Planning Problems,» Carnegie Mellon University Research Showcase, Pittsburgh, 2014.
- [20] A. Mohammed, Q. Wang y M. Filip, «Towards a cost-effective design of a meat supply chain: A multi-criteria optimization model,» de *2017 23rd International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, Huddersfield, United Kingdom, 2017.



Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

- [21] J. Ruiz y I. Grossmann, «Global optimization of non-convex generalized disjunctive programs: a review on reformulations and relaxation techniques,» *Journal of Global Optimization*, nº 1-2, pp. 43-58, 2016.
- [22] A. Sampat, E. Martin, M. Martin y V. Zavala, «Optimization formulations for multi-product supply chain networks,» *Computers and Chemical Engineering*, nº 104, pp. 296-310, 2017.
- [23] F. Trespalcacios y I. Grossmann, «Lagrangian Relaxation of the Hull-Reformulation of Linear Generalized Disjunctive Programs and its use in Disjunctive Branch and Bound,» *European Journal of Operations Research*, vol. 2, nº Preprint, 2015.
- [24] A. Bittante, F. Pettersson y H. Saxén, «Optimization of a small-scale LNG supply chain,» *Energy*, nº 148, pp. 78-79, 2018.
- [25] A. Azadeh, Z. Raoofi y M. Zarrin, «A multi-objective fuzzy linear programming model for optimization of natural gas supply chain through a greenhouse gas reduction approach,» *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, nº 26, pp. 702-710, 2015.
- [26] A. Beheshtian, K. P. Donaghy, R. R. Geddes y O. M. Rouhani, «Planning resilient motor-fuel supply chain,» *International Journal of Disaster Risk Reduction*, nº 24, pp. 312-325, 2017.
- [27] N. H. Lappas y C. E. Gounaris, «The Use of Decision-dependent Uncertainty Sets in Robust Optimization,» 2016. [En línea]. Available: http://folk.ntnu.no/skoge/prost/proceedings/focapo-cpc-2017/FOCAPO-CPC%202017%20Contributed%20Papers/71_FOCAPO_Contributed.pdf. [Último acceso: 26 04 2018].
- [28] A. Yuanita y A. W. A. Noorsaman-Sommeng, «Stochastic Optimization of Supply Chain Risk Measures –a Methodology for Improving Supply Security of Subsidized Fuel Oil in Indonesia,» *Makara J. Technol*, vol. 19, nº 2, pp. 73-84, 2015.
- [29] M. D. McKay y R. J. Beckman, «A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computert Code.,» *Technometrics*, vol. 21, nº 2, pp. 239-245, 1979.
- [30] M. Morris, «Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments,» *Technometrics*, vol. 33, nº 2, pp. 161-174, 1991.



- [31] B. Tang, «Orthogonal Array-Based Latin Hypercubes,» *Journal of the American Statistical Association*, vol. 88, nº 424, pp. 1392-1397, 1993.
- [32] K. Ye, «Orthogonal Column Latin Hypercubes and Their Application in Computer Experiment,» *Journal of the American Statistical Association*, vol. 93, nº 444, pp. 1430-1439, 1998.
- [33] Y. Carson y A. Maria, «Simulation optimization: methods and applications,» de *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*, Atlanta, Georgia, 1997.
- [34] M. Keramat y R. Kielbasa, «Latin Hypercube Sampling Monte Carlo Estimation of Average Quality Index for Integrated Circuits,» *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, nº 14, pp. 131-142, 1997.
- [35] C. Aistleitner, M. Hofer y R. Tichy, «A central limit theorem for Latin hypercube sampling with dependence and application to exotic basket option pricing,» *International Journal of Theoretical & Applied Finance*, vol. 15, nº 7, pp. 1-16, 2012.
- [36] J. Martins, M. Ferreira y C. Morano, «Comparación de la estimación de la productividad del proceso de soldadura eléctrica por los métodos de simulación de Monte Carlo e Hipercubo Latino,» *Información Tecnológica*, vol. 23, nº 4, pp. 21-32, 2012.
- [37] K. Kaewsuwan, C. Yuangyai, U. Janjarassuk y K. Rienkhemaniyo, «A comparison of latin hypercube sampling techniques for a supply chain network design problem,» de *The 4th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology*, MATEC Web of Conferences 192, 01023 (2018), 2018.
- [38] N. Dige y U. Diwekar, «Efficient sampling algorithm for large-scale optimization under uncertainty problems,» *Computers and Chemical Engineering*, 2018.
- [39] D. J. van-der-Zee, A. Tako, P. Fishwick, S. Robinson y O. Rose, «Panel: Education on Simulation Model Simplification – Beyond Rules of Thumb,» de *Proceedings of the 2018 Winter Simulation Conference*, Gothenburg, Sweden, 2018.
- [40] International Atomic Energy Agency, «Application of Multi- criteria Decision Analysis Methods to Comparative Evaluation of Nuclear Energy System Options: Final Report of the INPRO Collaborative Project KIND,» Nuclear Energy Series No. NG-T-3.20, Vienna, 2019.
- [41] D. J. van-der-Zee, «Model simplification in manufacturing simulation – Review and framework,» *Computers & Industrial Engineering*, nº 127, pp. 1056-1067, 2019.
-



Optimización de la cadena de suministro de combustibles automotrices

- [42] A. Senderovich, A. Shleyfman, M. Weidlich y A. Gal, «To aggregate or to eliminate? Optimal model simplification for improved process performance prediction,» *Information Systems*, nº 78, pp. 96-111, 2018.
- [43] T. C. Chiang, «Model Simplification for Accelerating Simulation- based Evaluation of Dispatching Rules in Wafer Fabrication Facilities,» de *11th International Conference of Control, Automation, Robotics and Vision*, Singapore, 2010.
- [44] A. P. Reiman, T. E. McDermott y G. F. Reed, «Electric Power Distribution System Model Simplification Using Segment Substitution,» vol. 35, nº 3, pp. 2874-2881, 2018.
- [45] Secretaría de Energía, «Sistema de Información Energética,» [En línea]. Available: <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cveuca=PMXE2C01>. [Último acceso: 13 01 2021].
- [46] R. García-Jolly y C. Martín-del-Campo, «A practical model for the supply chain growth optimization for automotive fuels in Mexico,» *Canadian Journal of Chemical engineering*, nº 88, pp. 898-914, 2021.
- [47] J. Grimaldo, «Desarrollo de una plataforma de modelos de producción de petrolíferos para el Sistema Nacional de Refinación en México,» UNAM, CDMX, 2018.
- [48] World Energy Council, «World Energy Scenarios 2019: Exploring innovatioin Pathways to 2040,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-scenarios-2019-european-regional-perspectives>. [Último acceso: 14 09 2019].
- [49] Petróleos Mexicanos, «Plan de Negocios de Petróleos Mexicanos y sus Empresas Productivas Subsidiarias 2019-2023,» 16 07 2019. [En línea]. Available: https://www.pemex.com/acerca/plan-de-negocios/Documents/pn_2019-2023_total.pdf. [Último acceso: 14 09 2019].
- [50] Arthur D'Little, «What's next for the Oil & Gas Sector after COVID-19?,» 05 2020. [En línea]. Available: <https://www.adlittle.pl/en/weathering-perfect-storm>. [Último acceso: 13 05 2020].
- [51] K. Schoots, R.-T. R., G. Verbong y B. van-derZwaan, «Historical variation in the capital costs of natural gas, carbon dioxide and hydrogen pipelines and implications for future infrastructure,» *International Journal of Greenhouse Gas Control*, nº 5, pp. 1614-1623, 2011.



- [52] Z. Rui, P. R. Metz, C. G. D.B. y X. Zhou, «Historical pipeline construction cost analysis,» *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*, vol. 4, nº 3, pp. 244-263, 2011.
- [53] J. Kallrath, *Modeling Languages in Mathematical Optimization*, Boston, Dordrecht, London: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [54] Haverly Systems Inc., «GRTMPS 5.5.1». New Jersey 2018.