



DIAGNÓSTICO DE LA LOGÍSTICA DEL ABASTECIMIENTO DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS PARA EL SECTOR TERMOELÉCTRICO EN COLOMBIA

INFORME FINAL DOCUMENTO PRINCIPAL

PREPARADO POR:

- SINERGÍA Ltda. Consultores en Servicios Públicos y Recursos Energéticos
- Applied Mathematics Research - Consulting Group

Bogotá, Enero de 2014

TABLA DE CONTENIDO

1	<u>INTRODUCCIÓN.....</u>	<u>8</u>
1.1	OBJETIVO	8
1.2	ALCANCES	8
1.3	DEFINICIÓN DE LOGÍSTICA DEL ABASTECIMIENTO DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS.....	9
1.4	COMBUSTIBLES LÍQUIDOS DE INTERÉS	11
2	<u>METODOLOGÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN.....</u>	<u>12</u>
2.1	PROCEDIMIENTO	12
2.2	SISTEMA INTERCONECTADO Y PLANTAS DE GENERACIÓN TERMOELÉCTRICA ESTUDIADAS	15
2.3	FUENTES DE INFORMACIÓN	15
3	<u>LA CADENA DE ABASTECIMIENTO</u>	<u>18</u>
3.1	ACTORES, NORMATIVIDAD Y REGULACIÓN.....	18
3.2	DESCRIPCIÓN DE LA CADENA ACTUAL DE ABASTECIMIENTO DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS	19
3.3	BALANCE ACTUAL DE OFERTA-DEMANDA DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS	20
3.4	PROYECCIÓN DE LA PRODUCCIÓN NACIONAL DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS	21
3.5	RED DE POLIDUCTOS Y CAPACIDAD DEL ALMACENAMIENTO.....	21
3.6	RED DE CARRETERAS Y PARQUE DE CARRO TANQUES	22
4	<u>TERMOELÉCTRICAS QUE PUEDEN CONSUMIR LÍQUIDOS</u>	<u>22</u>
4.1	UBICACIÓN DE LAS TERMOELÉCTRICAS Y PUNTOS DE ABASTECIMIENTO	23
4.2	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS PLANTAS TERMOELÉCTRICAS.....	25
4.3	CARACTERÍSTICAS DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS.....	25
5	<u>ESCENARIOS DE GENERACIÓN TERMOELÉCTRICA PARA EL ANÁLISIS DE LA LOGÍSTICA.....</u>	<u>28</u>
5.1	DEFINICIÓN DE LA OCURRENCIA DE EVENTOS HISTÓRICOS CRÍTICOS COMO EL FENÓMENO DE “EL NIÑO”	28
5.1.1	ANÁLISIS DE SEQUÍAS	29
5.1.2	SEQUÍAS EN LAS SERIES DE CAUDALES DE LOS RÍOS COLOMBIANOS QUE ALIMENTAN CENTRALES HIDROELÉCTRICAS.....	32
5.1.3	CONCLUSIÓN.....	37
5.2	SELECCIÓN DEL CASO DE LA SIMULACIÓN ESTOCÁSTICA	37
5.2.1	ANÁLISIS DE LOS CASOS	38
5.3	ESCENARIOS DE EMERGENCIA.....	42
6	<u>MODELO DE SIMULACIÓN DE LA LOGÍSTICA DEL ABASTECIMIENTO DE COMBUSTIBLES EN COLOMBIA.....</u>	<u>43</u>

6.1	DESCRIPCIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS A MODELAR	43
6.2	OBJETIVOS, CARACTERÍSTICAS DEL MODELO Y SOFTWARE SELECCIONADO.....	44
6.3	PREMISAS Y DISEÑO DEL MODELO	46
6.3.1	PROCESO “REFINAR”	48
6.3.2	PROCESO “IMPORTAR”	49
6.3.3	PROCESO “TRANSPORTAR AL CENTRO MAYORISTA”	50
6.3.4	PROCESO “ALMACENAR EN PLANTA DE ABASTO”	51
6.3.5	PROCESO “TRANSPORTAR A PLANTAS TERMOELÉCTRICAS”	53
6.3.6	PROCESO “ALMACENAR EN TERMOELÉCTRICAS”	54
6.3.7	PROCESO “GENERAR ELECTRICIDAD EN PLANTAS TERMOELÉCTRICAS”	55
6.4	VALIDACIÓN DEL MODELO.....	56
7	<u>DIAGNÓSTICO DE LA LOGÍSTICA DEL ABASTECIMIENTO DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS PARA GENERACIÓN ELECTICA</u>	<u>58</u>
7.1	SITUACIÓN ACTUAL	58
7.2	GENERACIÓN TERMOELÉCTRICA PARA LOS DISTINTOS ESCENARIOS - SIMULACIONES DEL SIN CON EL SDDP60	
7.3	VARIABLES DE INTERÉS EN LA LOGÍSTICA DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS	61
7.4	RESULTADOS PARA LOS ESCENARIOS DE ESCASEZ HIDROLÓGICA	62
7.4.1	CONSUMO Y RACIONAMIENTO	62
7.4.2	IMPORTACIONES, ALMACENAMIENTO Y UTILIZACIÓN DE PUERTOS.....	63
7.4.3	CONSUMO Y ALMACENAMIENTO EN LAS TERMOELÉCTRICAS	65
7.4.4	UTILIZACIÓN DE POLIDUCTOS QUE ATIENDEN DEMANDAS TERMOELÉCTRICAS	66
7.4.5	UTILIZACIÓN DE CARRO TANQUES	66
7.4.6	CAPACIDAD DE PARQUE DE CARRO TANQUES	67
7.4.7	TRÁFICO POR CARRETERA Y PUNTOS CRÍTICOS	71
7.5	RESULTADOS PARA LOS ESCENARIOS DE EMERGENCIA.....	76
7.6	CONCLUSIONES	78
8	<u>CONCLUSIONES</u>	<u>79</u>
9	<u>RECOMENDACIONES.....</u>	<u>81</u>

ANEXOS

Anexo 1.	Localización de las termoeléctricas
Anexo 2.	Tiempos y distancias entre plantas de abasto y termoeléctricas
Anexo 3.	Información solicitada a los agentes
Anexo 4.	Módulos del modelo de simulación
Anexo 5.	Resultados detallados

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Definición de logística del abastecimiento de combustibles líquidos derivados.....	10
Figura 1-2. Puertos, refinerías, poliductos, plantas de abasto, carreteras, ríos y termoeléctricas (“hardware”) de la logística	10
Figura 1-3. Normas, procedimientos y contratos (“software”) de la logística.....	11
Figura 2-1. Procedimiento para la realización del diagnóstico	13
Figura 2-2. Bases del análisis y termoeléctricas consideradas.....	15
Figura 2-3. Información de las termoeléctricas.....	16
Figura 2-4. Información de XM.....	16
Figura 2-5. Información de otros actores	17
Figura 3-1. Cadena de abastecimiento de combustibles líquidos.....	20
Figura 5-1. Series de diferencias entre los caudales y el nivel de referencia ($Q_t - Q_r$).....	30
Figura 5-2. Atributos de la sequía	31
Figura 5-3. Sequía extendida.....	31
Figura 5-4. Aportes promedios mensuales (GWh).....	32
Figura 5-5. Diferencias mensuales respecto a la media ($Q_t - Q_r$) (GWh).....	33
Figura 5-6. Racha extendida que condujo al racionamiento de 1992-93 (GWh)	34
Figura 5-7. Ilustración del consumo de combustible correspondiente a la PNSS	39
Figura 5-8. Consumos de combustible líquido para los primeros meses de la simulación con diferentes probabilidades de no excedencia.....	41
Figura 6-1. Cadena de abastecimiento de combustibles líquidos para termoeléctricas en Colombia	43
Figura 6-2. Diagrama IDEFo estándar y ejemplo del proceso transportar combustibles líquidos.....	45
Figura 6-3. Diagrama IDEFo de los principales procesos modelados del sistema de abastecimiento de combustibles para plantas termoeléctricas en Colombia	47
Figura 6-4. Animación del modelo programado en el software Arena 14	57
Figura 7-1. Utilización red de poliductos – Excedentes de Transporte en demanda regular (demanda no termoeléctrica).....	59
Figura 7-2. Generación termoeléctrica con combustibles líquidos. Casos estocásticos.....	60
Figura 7-3. Generación termoeléctrica con combustible líquido. Caso 1 y 2.....	61
Figura 7-4. Zonas de distribución minorista a estaciones de servicio y grandes consumidores no termoeléctricos	68
Figura 7-5. Mapa de las rutas principales desde plantas de abasto a Termoeléctricas	73
Figura 7-6. Tráfico pico de referencia para el caso Paipa-Duitama 2009.....	74
Figura 7-7. Resultados del tráfico de vehículos en el peaje CENCAR para horas promedio y hora pico	75

INDICE DE TABLAS

Tabla 3-1. Balance oferta-demanda con y sin consumos termoeléctricos.....	20
Tabla 3-2. Proyección de la producción nacional de combustibles líquidos.....	21
Tabla 4-1. Plantas termoeléctricas que pueden consumir combustibles líquidos.....	23
Tabla 4-2. Combustibles líquidos bajo examen	23
Tabla 4-3. Localización de las termoeléctricas y plantas de abasto de combustibles	24
Tabla 4-4. Distancias y tiempos estimados del centro de abasto más cercano a la planta de generación eléctrica	24
Tabla 4-5. Características técnicas de las plantas de generación termoeléctrica	25
Tabla 4-6. Capacidad de almacenamiento y capacidad de recepción de combustibles líquidos	26
Tabla 4-7. Consumos y autonomía de las termoeléctricas	26
Tabla 5-1. Series históricas que contienen las rachas extendidas de sequía más extremas (GWh).....	35
Tabla 5-2. Suma acumulada de diferencias desde el mes inicial (GWh).....	36
Tabla 5-3. Veinte primeros casos de la simulación en orden decreciente de criticidad según el consumo de combustible y los aportes hidrológicos.	38
Tabla 5-4. Consumos de combustible para períodos de diferente longitud y diferentes PNSS	40
Tabla 7-1. Consumos agregados de combustibles líquidos para el mes y período críticos.	62
Tabla 7-2. Importaciones, almacenamiento y utilización de puertos. Cado El Niño 97-98	63
Tabla 7-3. Importaciones por región y combustible. Cifras en BD	64
Tabla 7-4. Consumos de combustible por región y tipo. Cifras en BD.....	64
Tabla 7-5. Consumos de combustible por planta. Cifras en BD.....	65
Tabla 7-6. Utilización de los poliductos que transportan FO#2 a termoeléctricas	66
Tabla 7-7. Numero de carro tanque diarios utilizados	67
Tabla 7-8. Numero de carro tanques diarios utilizados	69
Tabla 7-9. Numero de carro tanques utilizados por zona de distribución y total	70
Tabla 7-10. Balance de oferta y demanda de carro tanques para abastecer el consumo de combustibles líquidos (termoeléctricos y no termoeléctricos) – caso crítico	70
Tabla 7-11. Principales rutas, peajes y TPDS para el abastecimiento de combustibles a Termoeléctricas.....	71
Tabla 7-12. Principales rutas, peajes y TS camiones para el abastecimiento de combustibles a Termoeléctricas.....	72
Tabla 7-13. Selección de puntos de peaje en rutas a Termoeléctricas con probabilidad de tráfico critico.....	73
Tabla 7-14. Tiempos de autonomía, tiempos de entrega y tiempo de déficit en emergencias	77

ACRÓNIMOS Y CONVENCIONES

ACPM	: Aceite Pesado Para Motores. Nombre común con el que se hace referencia al combustible utilizado en distintas plantas analizadas en este estudio las cuales están dotadas de turbinas de gas adecuadas para su combustión. También hace referencia a cualquier mezcla de diesel oil puro (i.e. procedente de la refinación de petróleo crudo) y biodiesel (i.e. procedente de aceites vegetales o grasas animales) que sea técnicamente factible de consumir en las plantas y que sea permitida por las autoridades energéticas
B	: Barril o barriles
BD	: Barril o barriles por día
BTU	: British Thermal Unit. Es una unidad de energía ampliamente utilizada en plantas de generación de energía y combustibles líquidos y gaseosos
CACSSE	: Comisión Asesora de Coordinación y Seguimiento a la Situación Energética
CND	: Centro Nacional de Despacho
CNO	: Consejo Nacional de Operación del Sistema de Eléctrico
CNO gas	: Consejo Nacional de Operación del Sistema de Gas
CREG	: Comisión de Regulación de Energía y Gas
FO#2	: Fuel Oil No 2. En Colombia es conocido genéricamente como ACPM, “combustible diesel” o “diesel corriente”. También se utiliza el nombre de Fuel Oil grado No 2D. En los Estados Unidos de América se conoce genéricamente como “Distillate Fuel Oil”.
FO#6	: Fuel Oil No 6. En Colombia es conocido genéricamente como “combustóleo” el cual es elaborado a partir de productos residuales que se obtienen de los procesos de refinación del petróleo. En este informe también corresponde a una mezcla de crudos con otro combustible, de tal manera que cumple especificaciones predefinidas.
gal	: Galón o galones. 1 B = 42 gal
IFO 380	(Intermediate fuel oil) combustible intermedio del tipo residuales con una viscosidad máxima de 380 centistokes
JETA1	También conocido como turbocombustible, turbosina o JP-1A, es un destilado medio proveniente de la destilación atmosférica del petróleo, con características especiales de calidad, que es tratado químicamente para eliminar compuestos azufrados tales como sulfuros, mercaptanos y ácidos nafténicos, que pueden tener un comportamiento corrosivo.
k	: Kilo. Prefijo métrico. 1k = 10 ³
KBDC	: Miles de barriles por día calendario
KBDO	: Miles de barriles por día de operación
KBH	: Miles de barriles por hora
kWh	: Kilo vatio hora. Es una unidad de energía ampliamente utilizada en energía eléctrica. 1 kWh = 3,412.14 BTU
M	: Mega. Prefijo métrico. 1M = 10 ⁶
MME	: Ministerio de Minas y Energía
Planta de abasto	: Instalaciones físicas construidas y operadas en tierra, necesarias para almacenar, manejar y despachar al por mayor combustibles líquidos derivados del petróleo, a las plantas de otros distribuidores mayoristas, a distribuidores minoristas o al gran consumidor
SIN	: Sistema Interconectado Nacional

UPME : Unidad de Planeación Minero Energética
XM SA : Empresa coordinadora de la operación del SIN y administradora del mercado
ESP : mayorista de electricidad de Colombia

1 INTRODUCCIÓN

Este “DIAGNÓSTICO DE LA LOGÍSTICA DEL ABASTECIMIENTO DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS PARA EL SECTOR TERMOELÉCTRICO EN COLOMBIA” corresponde al informe final del estudio contratado por el Consejo Nacional de Operación (CNO) del Sector Eléctrico Colombiano con SINERGÍA Ltda. Consultores en Servicios Públicos y Recursos Energéticos quien contó con el apoyo de Applied Mathematics Research - Consulting Group (AMR) en el modelamiento matemático de la red de hidrocarburos líquidos.

El equipo de consultores principales del trabajo fue el siguiente: Medardo Prieto (I.E., M.Sc.), Julián Ramírez (I.E., M.Sc.) y Diego Calderón (I.L., M.Sc.).

El informe consta de los siguientes documentos:

- Informe Principal
- Anexos

1.1 Objetivo

El estudio es una actualización del realizado en 2009¹(en adelante Estudio del 2009) con el objetivo principal de efectuar un diagnóstico a nivel nacional de la logística existente y proyectada para el abastecimiento de combustibles líquidos al parque generador termoelectrico ante condiciones de hidrología seca, en la que se hace necesaria la generación con dichos combustibles en forma continua y prolongada.

Un objetivo adicional consiste en examinar la habilidad de dicha logística en condiciones de emergencia del SIN derivadas de la indisponibilidad de algún componente del mismo por periodos no superiores a dos meses que implique el despacho imprevisto de las termoelectricas que consumen líquidos.

1.2 Alcances

El diagnóstico considera los siguientes aspectos:

- La ubicación geográfica de cada una de las termoelectricas con capacidad de generar con combustibles líquidos y sus condiciones de infraestructura de transporte y de almacenamiento propio para el uso de dichos combustibles.
- La ubicación geográfica de los centros de producción y de almacenamiento nacional de combustibles líquidos

¹ “DIAGNÓSTICO DE LA LOGÍSTICA DEL ABASTECIMIENTO DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS PARA EL SECTOR TERMOELÉCTRICO”. INFORME FINAL. DOCUMENTO PRINCIPAL. Unión Temporal ITANSUCA y SINERGÍA Ltda. Abril de 2009.

- Los diferentes combustibles líquidos utilizados en las plantas térmicas, como son el FO#2, el JETA1 y el FO#6, o las mezclas de características físico químicas similares que pueden ser consumidas por las plantas y permitidas por las autoridades.
- Posibilidades de importación y características de los puertos.
- Sistemas disponibles para el transporte de los combustibles líquidos, como poliductos, carro tanques y carreteras, y ríos.

1.3 Definición de logística del abastecimiento de combustibles líquidos

Para propósitos del presente estudio se adopta la siguiente definición general dada por el Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP)² de los Estados Unidos de América, adaptada por los consultores a la cadena de abastecimiento de combustibles líquidos:

La logística del abastecimiento de combustibles líquidos es el conjunto de *medios físicos* (o “hardware”) y *métodos* (o “software”) necesarios para abastecer de combustibles líquidos a los consumidores finales (Figura 1-1). Naturalmente, los medios físicos son las refinerías, los puertos, los poliductos, los sistemas de almacenamiento, los carro tanques, las embarcaciones y demás instalaciones y equipos que se utilizan para abastecer la demanda (Figura 1-2). Y los métodos corresponden a la organización institucional, las leyes, decretos y normas, las regulaciones, los reglamentos y los procedimientos técnicos y comerciales (Figura 1-3).

² “Logistics management: Is that part of supply chain management that plans, implements, and controls the efficient, effective forward and reverse flow and storage of goods, services, and related information between the point of origin and the point of consumption in order to meet customers' requirements. Logistics management activities typically include inbound and outbound transportation management, fleet management, warehousing, materials handling, order fulfillment, logistics network design, inventory management, supply/demand planning, and management of third party logistics services providers. To varying degrees, the logistics function also includes sourcing and procurement, production planning and scheduling, packaging and assembly, and customer service. It is involved in all levels of planning and execution-strategic, operational, and tactical. Logistics management is an integrating function which coordinates and optimizes all logistics activities, as well as integrates logistics activities with other functions, including marketing, sales, manufacturing, finance, and information technology.”

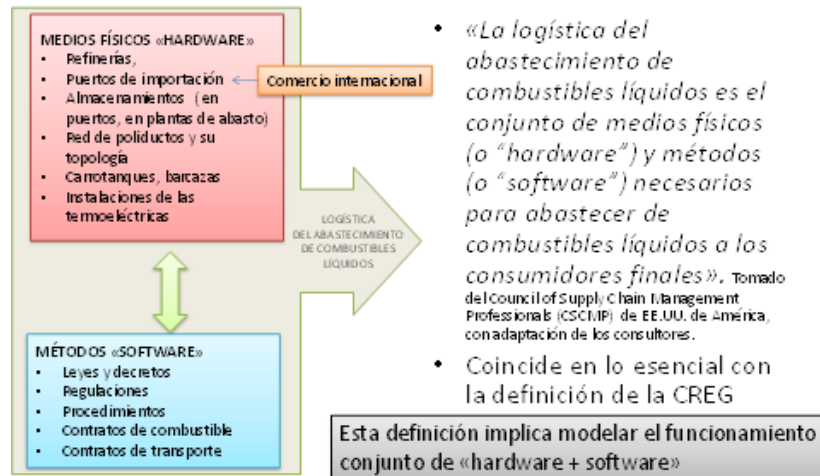


Figura 1-1. Definición de logística del abastecimiento de combustibles líquidos derivados

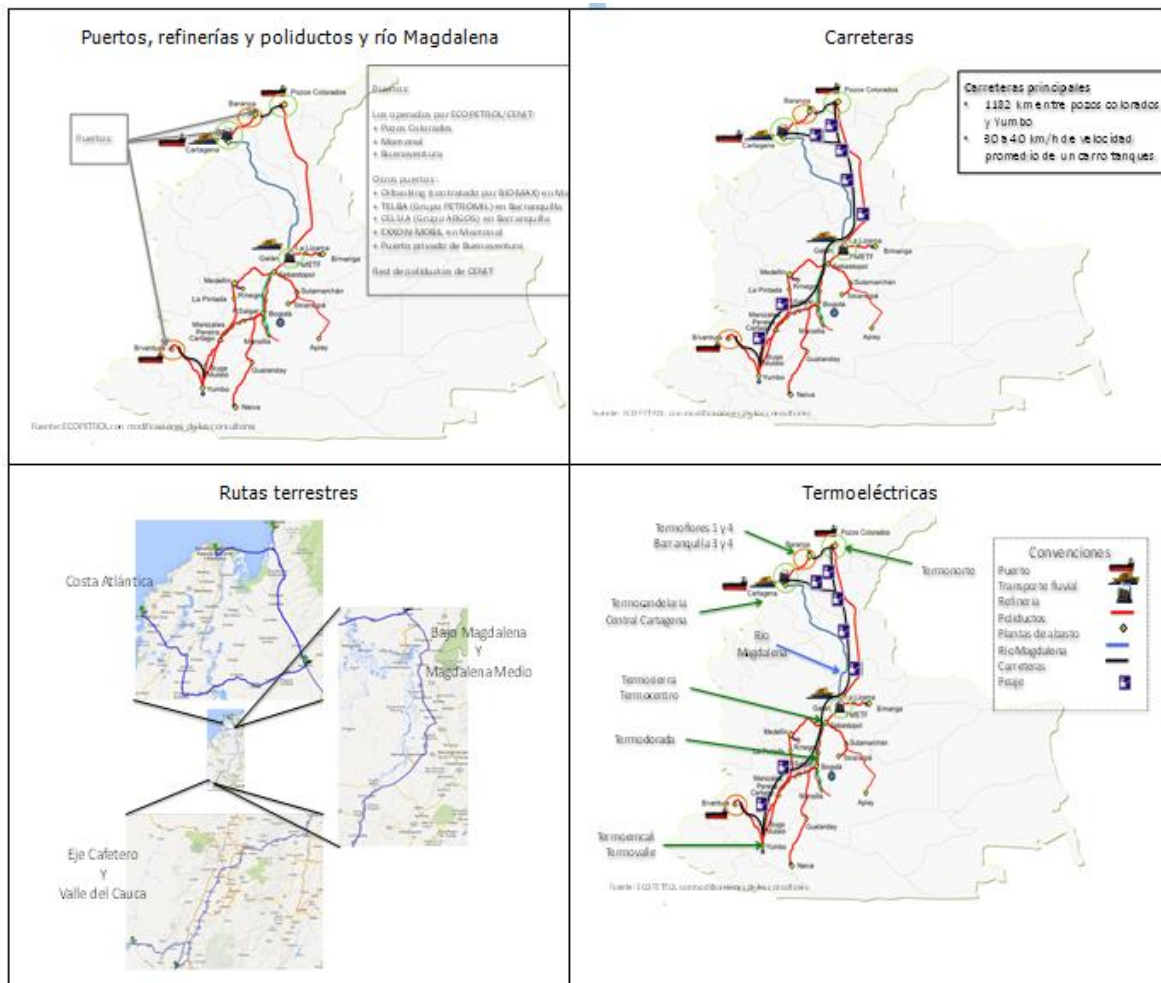


Figura 1-2. Puertos, refinerías, poliductos, plantas de abasto, carreteras, ríos y termoeléctricas (“hardware”) de la logística

NORMAS

- Decreto 4299 de 2005 y sus modificaciones que determina las obligaciones, requisitos y responsabilidades de cada uno de los actores de la cadena de suministro de combustibles líquidos.
 - Refinador
 - Importador
 - Almacenador
 - Distribuidor mayorista
 - Transportador
 - Distribuidor minorista, y
 - Gran consumidor
- Normas para el transporte carretero y fluvial de productos peligrosos
- Normas para importación (puertos, aduanas)
- Normas ambientales

Todo implica TIEMPO:
(días, semanas)

PROCEDIMIENTOS

Sistema de abastecimiento

- Nominaciones de combustibles líquidos ECOPETROL/CENIT
- Solicitud de transporte por carrotanque
- SICOM
- Importación

Termoeléctricas

- Procedimientos para decidir sobre la solicitud pedido
- Procedimiento para manejo interno del combustible (descarga, verificación de calidad, conservación cuando es mezcla con biodiesel)

Figura 1-3. Normas, procedimientos y contratos (“software”) de la logística

1.4 Combustibles líquidos de interés

Los siguientes son los combustibles líquidos de interés en el presente estudio, los cuales fueron reportados por los agentes generadores como combustibles utilizables en las termoeléctricas de interés:

- Diesel o FO#2 # 2 o ACPM o las mezclas autorizadas que son factibles de consumir en turbinas de gas
- FO#6 o combustóleo o las mezclas autorizadas que son factibles de consumir en calderas de vapor
- Jet 1A o JP-1A o turbo combustible o turbosina

A lo largo del informe se podrán encontrar referidos con cualquiera de los diferentes nombres utilizados.

2 METODOLOGÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN

Como se verá, la cadena de abastecimiento de los combustibles líquidos de interés para el estudio implica múltiples interacciones entre refinerías, puntos de importación/exportación, medios de transporte, sistemas de almacenamiento y puntos de entrega. Por lo tanto, para realizar el diagnóstico solicitado por el CNO, es necesario considerar estas múltiples interacciones y además contemplar toda la demanda de combustibles líquidos que comparten dicha infraestructura, y no solamente la relativa a los utilizados para generación en las termoeléctricas del SIN.

En consecuencia, el enfoque utilizado para desarrollar el estudio corresponde a un balance oferta-demanda de combustibles líquidos considerando tanto las restricciones físicas y operativas de producción, importación/exportación, transporte, distribución y almacenamiento, como las restricciones de los procedimientos (principalmente nominaciones) y los contratos entre los distribuidores mayoristas y los generadores termoeléctricos. Con tal fin se desarrolló un modelo detallado de simulación con las siguientes características:

- Horizonte de análisis: 5 años de acuerdo con los escenarios suministrados por XM.
- Resolución: diaria.
- Topología: Nodos de producción, nodos de importación/exportación, nodos de racionamiento, arcos de transporte, nodos de almacenamiento, nodos de consumo distintos a las plantas del SIN y nodos de consumo correspondientes a las plantas del SIN
- Régimen de flujo: estado estacionario
- Ecuaciones de balance por nodo: Suma de entradas de líquidos al nodo igual a suma de salidas de líquidos del nodo (leyes de Kirchhoff para flujos no compresibles).

Este modelo permite identificar, los déficits (en caso de que ocurran) de combustibles líquidos para generación termoeléctrica con su magnitud y duración, y el uso de los recursos del sistema de abastecimiento.

2.1 Procedimiento

El procedimiento para realizar el diagnóstico solicitado por el CNO consta de los siguientes pasos (ver Figura 2-1).

- **Paso 1. Información de las termoeléctricas del SIN.** Para las plantas o unidades termoeléctricas del SIN habilitadas para generar electricidad utilizando combustibles líquidos se obtiene la siguiente información:
 - Localización geográfica
 - Combustible(s) líquidos que está en capacidad de consumir
 - Características técnicas
 - Infraestructura propia para el uso de dichos combustibles
 - Procedimientos operativos para el uso del combustible líquido

- Energía máxima generada, ENFICC, OEF

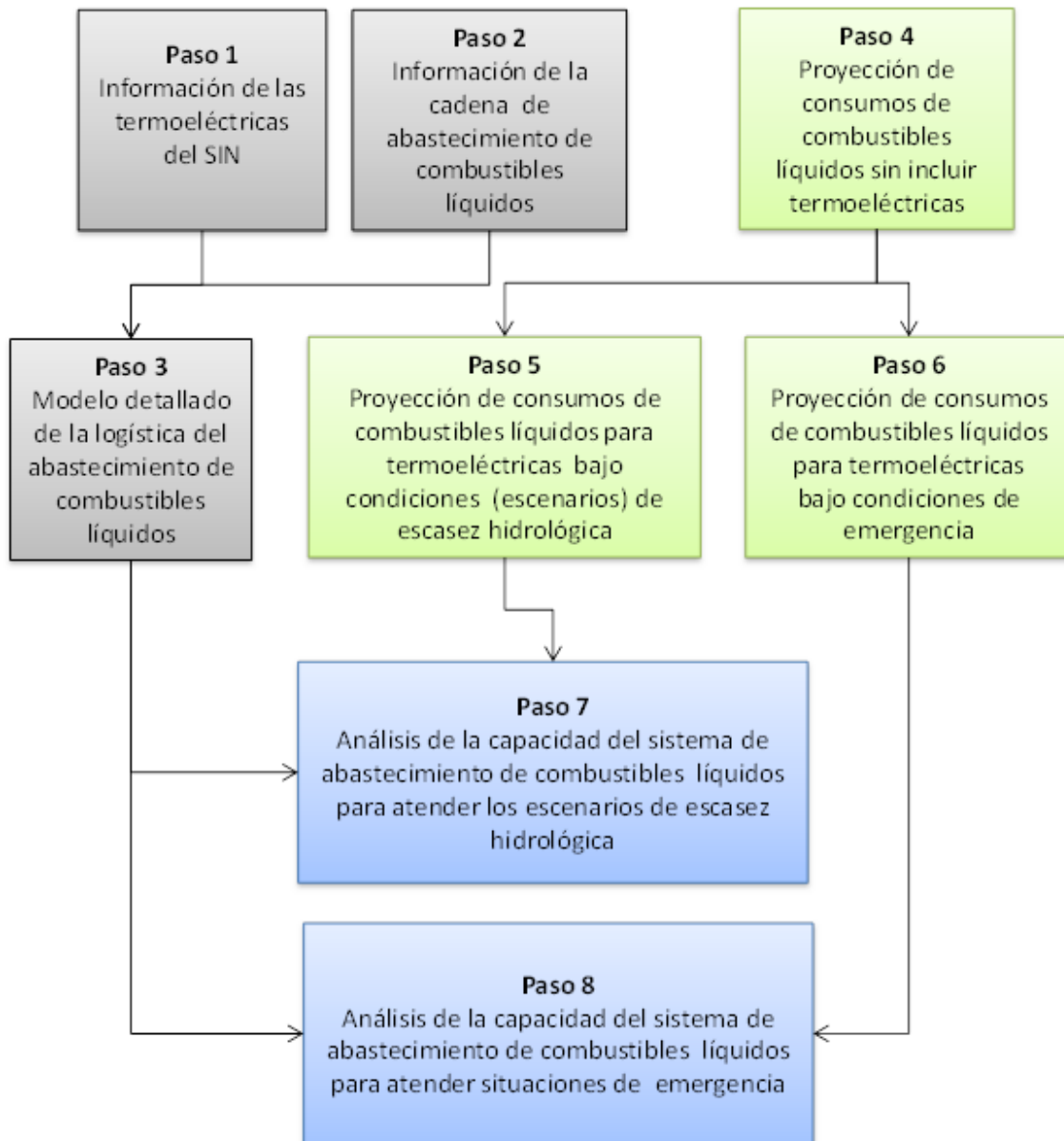


Figura 2-1. Procedimiento para la realización del diagnóstico

- **Paso 2. Información de la cadena de abastecimiento de combustibles líquidos.** La información pertinente es la siguiente:
 - Organización, normas, regulaciones y procedimientos
 - Localización de las refinerías y capacidad de producción de combustibles líquidos
 - Localización de puertos de importación/exportación de combustibles líquidos y capacidad de cada uno de ellos
 - Redes de ductos de tuberías con sus capacidades
 - Plantas de abasto de distribución mayorista con las capacidades de almacenamiento

- Parque de carro tanques y capacidad
 - Red de carreteras e información de tráfico en peajes
 - Ríos navegables, barcazas y capacidades
 - Duración de los procesos (importación, viaje por polducto, viaje por el río, etc.)
- **Paso 3. Modelo detallado de la logística del abastecimiento de combustibles líquidos.** El modelo simula de manera detallada tanto los elementos físicos y los procedimientos de cada uno de los eslabones de la cadena de abastecimiento de combustibles líquidos, como las características técnicas y los contratos de cada una de las termoeléctricas en estudio, a fin de diagnosticar la capacidad del sistema para atender toda la demanda. En el Capítulo 6 se describe el modelo desarrollado.
 - **Paso 4. Proyección de consumos de combustibles líquidos sin incluir termoeléctricas.** Para los combustibles demandados por sectores diferentes al eléctrico, que comparten infraestructura con los combustibles líquidos utilizados para generación en el SIN, se realiza una caracterización de la demanda en cuanto a:
 - Consumos actuales (año 2013) localizados en las plantas de abasto de los distribuidores mayoristas
 - Proyecciones para los próximos 5 años
 - **Paso 5. Proyección de consumos de combustibles líquidos para termoeléctricas bajo condiciones (escenarios) de escasez hidrológica.** Estas demandas se derivan de las simulaciones mediante el modelo SDDP suministradas por XM y corresponden a condiciones hidrológicas críticas de los ríos que alimentan centrales del SIN. En el Capítulo 5 se presenta la formulación y selección de los escenarios simulados. Estas demandas adicionadas a las provenientes del Paso 4 son las que deben ser atendidas por el sistema de abastecimiento de combustibles líquidos.
 - **Paso 6. Proyección de consumos de combustibles líquidos para termoeléctricas bajo condiciones de emergencia.** Estas demandas se derivan de posibles situaciones de emergencia en el SIN (como salidas forzadas de plantas o líneas) o del sistema de abastecimiento de gas, que originan indisponibilidades temporales en las centrales y que llevan a despachos termoeléctricos importantes con combustibles líquidos por tiempos relativamente cortos (unas pocas semanas). Estas demandas adicionadas a las provenientes del Paso 4 son las que deben ser atendidas por el sistema de abastecimiento de combustibles líquidos.
 - **Paso 7. Análisis de la capacidad del sistema de abastecimiento de combustibles líquidos para atender los escenarios de escasez hidrológica.** Haciendo uso del modelo desarrollado en el Paso 3, se realizan las simulaciones y se analizan los balances oferta-demanda de combustibles líquidos para las condiciones hidrológicas del escenario bajo examen (Paso 5) y se identifican los problemas para el suministro de los combustibles líquidos hasta las plantas termoeléctricas del SIN. Igualmente, se identifican los riesgos de los procesos de suministro, transporte, distribución y almacenamiento en condiciones hidrológicas críticas.

- **Paso 8. Análisis de la capacidad del sistema de abastecimiento de combustibles líquidos para atender situaciones de emergencia.** Las condiciones de emergencia se traducen en la necesidad de generar la ENFICC de cada planta termoeléctrica con el combustible líquido respectivo, sin tener en cuenta la parte de las OEF respaldadas por gas natural (en caso de que alguna planta respalde su OEF con gas y con líquidos). Como se verá, estos análisis se plantearon durante el desarrollo del estudio para realizar análisis tipo “what if”.

2.2 Sistema Interconectado y plantas de generación termoeléctrica estudiadas

Las bases del análisis se presentan en la Figura 2-2. Para el SIN y el sistema de abastecimiento de combustibles líquidos se consideran los sistemas actuales y la expansión prevista de para los próximos 5 años (partiendo del noviembre de 2013), sometidos a escenarios exigentes de generación termoeléctrica a base de líquidos. Para la oferta de gas natural se consideran los escenarios simulados por XM, los cuales a su vez reflejan los análisis de la UPME.

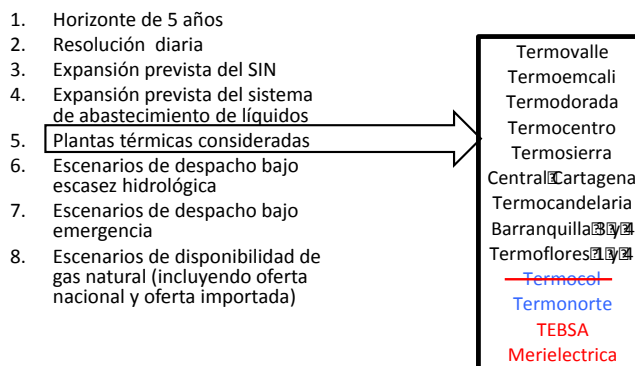


Figura 2-2. Bases del análisis y termoeléctricas consideradas

Las plantas termoeléctricas consideradas en consecuencia son las que actualmente pueden consumir líquidos y la expansión prevista con este tipo de combustibles, que corresponde a Termonorte. TEBSA y Termomerilectrica no se consideraron en las simulaciones dado que sus propietarios no han decidido que dichas plantas sean dotadas de las facilidades para consumir combustible líquido. Y Finalmente, Termocol se eliminó del análisis en razón de los problemas conocidos.

2.3 Fuentes de información

La información de las termoeléctricas se obtuvo de las empresas generadoras propietarias de las centrales, y para información pública de la CREG y de XM (ver Figura 2-3).

- Localización
- Documento de logística
- ENFICC más reciente indicando la proporción que respaldan con líquidos
- OEFs respaldada con líquidos
- CEN (Capacidad Efectiva Neta)
- CTEN (Consumo Térmico Específico Neto) “Heat Rate”
- Poder calorífico del combustible
- Logística en la termoeléctrica:
 - ✓ Capacidad de almacenamiento
 - ✓ Número de carro tanques que pueden descargar combustible simultáneamente
 - ✓ Tiempo promedio para el descargue de un carro tanque
 - ✓ Inventario de combustible permanente en tanques
- Contratos de combustibles con el distribuidor mayorista
- Contrato de transporte por carro tanque (si aplica)
- Documento de control de emisiones consumiendo el combustible líquido declarado

Figura 2-3. Información de las termoeléctricas

XM suministró la información de la generación termoeléctrica para los escenarios de escasez hidrológica (estocástico y determinísticos) (Figura 2-4).

ACTOR	TEMA	ESTADO
XM	Generación con líquidos proveniente de simulación estocástica con el SDDP de 200 casos para el periodo comprendido entre noviembre de 2013 a octubre de 2018 (5 años)	✓
	Generación con líquidos proveniente de simulación determinística con el SDDP de 2 series hidrológicas históricas críticas (El Niño 91-92 y El Niño 97-98) (5 años)	✓



Demanda de combustible planta por planta, mes por mes y para las distintas regiones de la curva de carga mensual

Figura 2-4. Información de XM

Otros actores de la cadena de abastecimiento que suministraron información se presentan en la Figura 2-5.

ACTOR	TEMA	ESTADO
MME	Información histórica de la operación registrada en el SICOM	✓
UPME	Proyección de consumos de combustibles	✓
CREG	Parámetros declarados, regulación (proyectos)	✓
Ecopetrol	Características, datos operativos y expansión de las refinerías de Barrancabermeja y Cartagena	✓
	Datos operativos y expansión de la demanda de combustibles en las plantas de abasto	✓
Cenit	Topología actualizada y posibles expansiones de la red de poliductos	✓
	Características, datos operativos y expansiones de cada tramo de la red de poliductos	✓
	Características de los buques y características, datos operativos y expansión de los puertos de importación	✓
	Características y datos operativos de las plantas de abasto	✓

ACTOR	TEMA	ESTADO
Distribuidores mayoristas	Características y datos operativos de las plantas de almacenamiento	✓
	Experiencias de importación y contratos con transportadores por carro tanque	✓
Cormagdalena	Proyecto de navegabilidad del río Magdalena	✓
Invias	Estadísticas de tráfico de carro tanques en las principales vías del país	✓
Transportadores por carrotanques	Parque propio, parque "spot", velocidades, tiempos de espera en llanaderos, vías alternas a las principales	✓
Gremios de transportadores por carrotanque	Parque total de tractomulas grandes	✓

Figura 2-5. Información de otros actores

Buena parte de la información está protegida por compromisos de confidencialidad de los consultores del estudio con los diversos actores. En esencia corresponde a la información que no es pública y a la que está relacionada con aspectos comerciales y estratégicos. Por lo tanto no se presenta de manera explícita.

3 LA CADENA DE ABASTECIMIENTO

A continuación se presenta una síntesis de los elementos esenciales para el estudio de la cadena de abastecimiento de combustibles líquidos de Colombia.

3.1 Actores, normatividad y regulación

En términos generales el Decreto 4299 de 2005 del Ministerio de Minas y Energía (MME) y sus posteriores modificaciones (Decretos 1333 de 2007 y 1717 de 2008), determina, casi en su totalidad, las obligaciones y responsabilidades de cada uno de los actores de la cadena de suministro de combustibles líquidos. Dada su calificación de servicio público, el suministro de derivados está sujeto a una estricta regulación por parte de las autoridades competentes. Estas regulaciones influyen en aspectos como: estructura de precios al consumidor, tarifas por la prestación de los servicios asociados, y obligaciones de los actores involucrados. A continuación se presentan, de manera somera, algunas de estas normativas. Es pertinente aclarar que este aparte no tiene por objeto hacer un análisis exhaustivo de la normativa existente, sino que busca introducir aquellos conceptos que son claves para la comprensión del sistema analizado y la problemática existente.

De acuerdo al Decreto 4299 de 2005 se identifican los siguientes seis tipos de actores en la cadena de distribución de combustible líquidos cuyos roles se presentan a continuación:

- **Refinador.** Su función es producir combustibles refinados a partir de petróleo crudo. Los refinadores no pueden negociar y suministrar combustibles a actores distintos a otros refinadores, distribuidores mayoristas y grandes consumidores.
- **Importador.** Está facultado para importar combustibles líquidos derivados del petróleo destinados al consumo dentro del territorio nacional. Debe poseer almacenamiento en puerto (propio o contratado) para la recepción de los combustibles importados y contratos con agentes que los distribuyan. La importación de combustibles está sujeta al cumplimiento de la normativa técnica, tributaria y ambiental vigente. Al igual que los refinadores, los importadores solo están facultados para contratar sus servicios con los refinadores, distribuidores mayoristas, grandes consumidores y los distribuidores minoristas.
- **Almacenador.** Posee capacidad de almacenamiento que puede alquilar a distribuidores, bajo operación conjunta u otro tipo de modalidad. Estos actores cuentan con plantas de abasto propias sobre las cuales alquilan parte o toda su capacidad de almacenamiento a quien así lo solicite.
- **Distribuidor mayorista.** Son aquellos agentes que se dedican a la distribución de combustibles líquidos a grandes consumidores, consumidores industriales, distribuidores minoristas y otros distribuidores mayoristas. Como consecuencia, en estos agentes recae gran parte de la operación de almacenamiento de combustibles derivados, útil en situaciones normales y de emergencia. De acuerdo con la normatividad, los mayoristas

deben mantener capacidad de almacenamiento para al menos el 30% del promedio de ventas de los últimos doce meses y en él recae la responsabilidad de la política de operación de sus inventarios, incluyendo la cantidad de cada producto a disponer en un momento determinado y los días de inventario mínimos a manejar.

- **Transportador.** Este agente está autorizado para transportar combustibles líquidos derivados a través de alguno de los siguientes medios: poliductos, terrestre (carretera), marítimo, fluvial, férreo y aéreo. El transporte terrestre por carretera es autorizado y regulado por el Ministerio de Transporte en vehículos tipo carro tanque. En la mayoría de los casos los distribuidores mayoristas cuentan con un esquema de operación mixta, en el cual, además de ejercer el rol de distribuidor y almacenador, manejan una flota propia que engloba parte de su operación, y adicionalmente, contratan algunos servicios a otros operadores de transporte. Para el caso de los trasportes fluvial, férreo y aéreo, el MME sujeta la operación a la normativa del Ministerio de Transporte. Debido a los problemas asociados a la infraestructura ferroviaria, actualmente no se utiliza la vía férrea para transportar combustibles para venta al público, con lo cual en el corto plazo no es pertinente considerar el ferrocarril como parte de la logística de abastecimiento para las plantas termoeléctricas. El transporte fluvial por el río Magdalena, que potencialmente es un medio de gran importancia para mover combustibles entre la Costa Atlántica (Cartagena y Barranquilla) y el interior (Barrancabermeja y otros sitios localizados sobre la ribera del río hasta Puerto Salgar), es un medio de interés para el suministro a algunas de las plantas, aunque en la actualidad se restringe a ciertos productos intermedios para las refinerías y para el FO#6.
- **Gran consumidor.** Existe una variedad de grandes consumidores, pero lo pertinente para este estudio es que el gran consumidor solamente puede consumir combustibles líquidos derivados de petróleo para los propósitos de generación de energía, generación de calor y uso como carburante. Las termoeléctricas se encuentran registradas y autorizadas como grandes consumidores ante el MME.

3.2 Descripción de la cadena actual de abastecimiento de combustibles líquidos

La cadena de abastecimiento de combustibles líquidos se esquematiza en la Figura en la Figura 3-1.

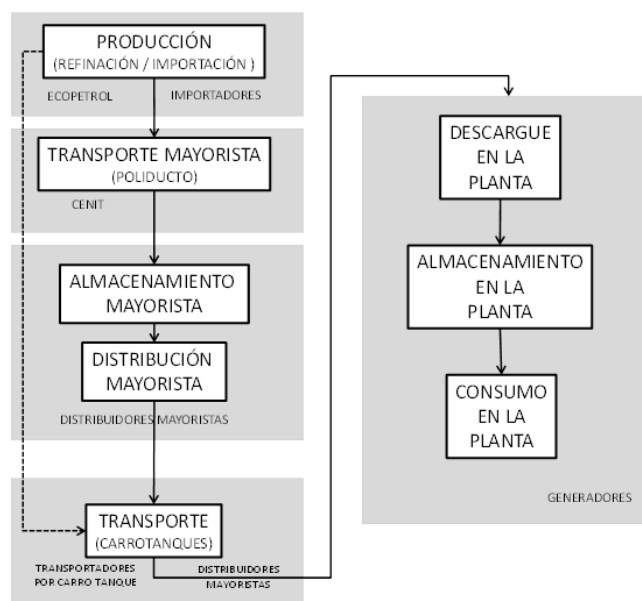


Figura 3-1. Cadena de abastecimiento de combustibles líquidos

En términos generales, la parte de la logística de la cadena correspondiente a ECOPETROL (y CENIT) se mantiene muy similar a la descrita en el Estudio de 2009, con algunas modificaciones menores en las capacidades las cuales se describen a continuación.

3.3 Balance actual de oferta-demanda de combustibles líquidos

El balance actual (finales de 2013) de oferta-demanda de los combustibles líquidos de interés para el presente estudio se muestra en la Tabla 3-1. La información sobre producción nacional y sobre la demanda sin termoelectricas proviene de ECOPETROL, y la demanda de termoelectricas corresponde a los cálculos de los consultores asumiendo un despacho de cada una de las igual a su ENFICC.

BALANCE SIN TERMOELÉCTRICAS				
KBDO	FO2	FO6	JET A1	Total
Demanda sin termoelectricas	115.5	0.6	23.2	139.3
Producción nacional	46.6	71.4	24.1	142.1
Importación	68.9	70.8	0.9	
DEMANDA DE TERMOELÉCTRICAS PARA ENFICC				Total
KBDO	FO2	FO6	JET A1	
Demanda de termoelectricas	53.6	11.3	8.7	73.6
BALANCE CON TERMOELÉCTRICAS				
KBDO	FO2	FO6	JET A1	Total
Demanda con termoelectrica	169.1	11.9	31.9	212.9
Producción nacional	46.6	71.4	24.1	142.1
Importación	122.5	59.5	7.8	

Tabla 3-1. Balance oferta-demanda con y sin consumos termoelectricos

Se aprecia que actualmente ECOPETROL importa 68.9 KBDO de FO#2, que corresponde al 59.7% de la demanda nacional y en el caso del JETA1 las importaciones de 0.9 KBDO representan el 3.9% del consumo.

Sin embargo, el FO#6 que se produce en el país, aunque suficiente en volumen (y con gran exceso) para atender la demanda, su calidad no satisface los requerimientos ambientales y, por lo tanto, no puede ser consumido de manera directa. De hecho para el uso de las termoeléctricas que cuentan con ciclos de vapor el FO#6 y los crudos disponibles deben ser tratados mediante mezclas con otros combustibles de calidad ambiental superior.

3.4 Proyección de la producción nacional de combustibles líquidos

La Tabla 3-2 presenta la proyección de la producción de los combustibles analizados en el presente estudio.

KBDC	FO#2				Jet A1			FO#6		
	Cartagena		Barranca	Total	Cartagena	Barranca	Total	Cartagena	Barranca	Total
	Alto azufre	ULSD	Alto azufre							
2014	16.2		45.8	62.0	6.0	19.1	25.1	18.3	31.3	49.6
2015	3.0	71.8	48.3	123.1	14.6	18.7	33.3	-	31.6	31.6
2016	-	73.0	50.0	123.0	18.2	19.0	37.2	-	32.0	32.0
2017	-	73.0	50.0	123.0	18.2	19.0	37.2	-	32.0	32.0
2018	-	73.0	50.0	123.0	18.2	19.0	37.2	-	32.0	32.0

Fuente: ECOPETROL

Tabla 3-2. Proyección de la producción nacional de combustibles líquidos

Se destaca que al final del segundo trimestre de 2015 se estima la entrada en operación de la conversión de la refinería de Cartagena con una producción total de 73 KBDC de diesel de bajo azufre, 18 KBDC de JETA1 y la eliminación completa de la producción de FO#6. Por su parte Barrancabermeja continuará con los niveles y calidad actuales de producción.

Los puertos de importación en esencia mantienen las características del Estudio del 2009.

3.5 Red de poliductos y capacidad del almacenamiento

La red de poliductos de CENIT ha experimentado (y experimentará) algunas modificaciones en su capacidad en relación con la descrita en el Estudio de 2009. Tales modificaciones son las siguientes:

- A comienzos de 2014 la capacidad nominal del sistema Pozos Colorados – Galán alcanzará 107 KBDC y a finales de 2015 pasará a 144 KBDC.
- El sistema Galán-Sebastopol también experimentará ampliaciones hasta alcanzar la siguiente capacidad nominal: (i) sistema de 16” a comienzos de 2014 será de 211 KBDC y a finales de 2015 de 255 KBDC. (ii) sistema de 12” al inicio de 2014 alcanzará 83 KBDC.
- El sistema Galan-Bucaramanga pasará a 25 KBDC de capacidad nominal a comienzos de 2014 y a 26.5 KBDC a mediados de 2015.

- El sistema Cartagena-Baranoa se ampliará en capacidad nominal hasta 30 KBDC a comienzos de 2014
- El sistema Yumbo-Buenaventura considerará el transporte de un único producto.
- El sistema Galan-Salgar de 8" incrementará su capacidad nominal a 22 KBDC

Por otra parte, la capacidad agregada de almacenamiento actual de los combustibles líquidos es la siguiente:

- FO#2: 2,943,260 B
- JETA1: 316,194 B
- FO#6: 151,000 B

Esta capacidad incluye la capacidad de almacenamiento en los puertos (incluidos los diferentes a los utilizados por ECOPETROL), pero no considera los almacenamientos operativos de las refinerías en razón de que constituyen almacenamientos no comerciales.

3.6 Red de carreteras y parque de carro tanques

Los carro tanques con capacidad del orden de 10,500 gal registrados en el sistema SICOM del Ministerio suman 1,547. Los carro tanques de tamaño inferior no son considerados en la logística para atender las termoeléctricas debido a que se concentran en el transporte de combustible desde las plantas de abasto hasta las estaciones de servicio (distribución minorista) y las grandes consumidores no termoeléctricos.

La red de carreteras pertinente para el transporte del combustible a las termoeléctricas corresponde a las troncales que unen los puntos de importación y las plantas de abasto con las centrales. Este sistema es altamente transitado y es objeto de análisis más adelante.

4 TERMOELÉCTRICAS QUE PUEDEN CONSUMIR LÍQUIDOS

En esta sección se presenta una síntesis de la información de las características de las termoeléctricas que pueden consumir combustibles líquidos, suministrada por los agentes generadores propietarios o representantes antes el mercado de las mismas.

Como se mencionó, las termoeléctricas analizadas son aquellas que están dotadas para consumir gas natural y un combustible líquido bien sea simultáneamente o de manera alternativa. Estas plantas, con el agente que las representa, se presentan en la Tabla 4-1.

AGENTE	PLANTA
CHEC	Termodorada
EMGESA	Termocartagena
EPM	Termosierra
ISAGEN	Termocentro
TERMOCANDELARIA	Termocandelaria
TERMOEMCALI	Termoemcali
TERMONORTE	Termonorte
TERMOVALLE	Termovalle
CELSIA	Termoflores
	Termomeriléctrica
GECELCA	TEBSA
	Termobarranquilla
PROELECTRICA	Proeléctrica

Tabla 4-1. Plantas termoeléctricas que pueden consumir combustibles líquidos

Las plantas que están resaltadas en gris en la tabla anterior (TEBSA, Termomeriléctrica, Proeléctrica y Termonorte) no fueron consideradas en el análisis ni en el modelamiento, debido a que las tres primeras, aunque están en operación, no están dotadas de las facilidades para manejar y consumir combustibles líquidos y sus propietarios no tienen previsto hacer las inversiones correspondientes, y la última, aunque operará con combustible líquido y suministro a los consultores información valiosa de la planta, aún no tiene definida su logística de abastecimiento (i.e. no tiene aún distribuidor mayorista, no ha definido el origen de su combustible, no tiene contratos, etc.).

En la Tabla 4-2 se indica el combustible líquido que puede consumir cada una de las plantas termoeléctricas.

PLANTA	COMBUSTIBLE
Termovalle	FO#2
Termoemcali	FO#2
Termodorada	FO#2/JET A1
Termocentro	JET A1
Termosierra	FO#2
Central Cartagena 1,2 y 3	FO#6/mezclas similares
Termocandelaria 1 y 2	FO#2
Barranquilla 3 y 4	FO#6/mezclas similares
Termoflores 1 y 4	FO#2

Fuente: Agentes generadores

Tabla 4-2. Combustibles líquidos bajo examen

4.1 Ubicación de las termoeléctricas y puntos de abastecimiento

En el Anexo 1 se incluye un mapa con la localización de las termoeléctricas y la infraestructura existente para el abastecimiento de combustibles líquidos.

En la Tabla 4-3 se presenta la localización reportada por cada agente y la planta o plantas de abasto del combustible líquido ofrecidas por el distribuidor mayorista para su aprovisionamiento.

Plantas termoeléctricas	Localización	Plantas de abasto desde donde se entrega el combustible	Distribuidor Mayorista
Termovalle	Palмира, departamento del Valle del Cauca, zona franca del pacífico	Yumbo, Cartago, Buenaventura, Mansilla, Puente Aranda, Gualanday, Galapa, Bucaramanga, Mamonal, Medellín, La Dorada	Exxon Mobil
Termoemcali	Palмира departamento de valle del Cauca. 3 km de la vía entre CENCAR y el aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón	Yumbo, Cartago, Buenaventura, Mansilla, Puente Aranda, Gualanday, Galapa, Bucaramanga, Mamonal, Medellín, La Dorada	Exxon Mobil
Termodorada	La Dorada (Caldas), 1km de la vía hacia Honda	Pereira, Mansilla	Biomax
Termocentro	Valle medio del río Magdalena. Corregimiento de Puerto Olaya. Municipio de Cimitarra (Santander)	Cartagena, Sebastopol, Mansilla	Biomax
Termosierra	La sierra, puerto Nare, Antioquia	Cartagena, Sebastopol, Mansilla	Biomax
Central Cartagena 1,2 y 3	km 4 vía Mamonal, sector Albornoz, Cartagena	Cartagena (Candelaria)	Petromil
Termocandelaria 1 y 2	Zona Industrial de Mamonal, Cartagena - Colombia	Mamonal	Exxon Mobil
Barranquilla 3 y 4	Municipio de la Soledad, departamento del Atlántico	Importación Barranquilla (TELBA), Río Sogamoso (Betulia Santander)	Petromil
TEBSA	Municipio de la Soledad, departamento del Atlántico	NA	NA
Termoflores 1 y 4	Barranquilla, departamento del Atlántico	Puerto Celsia en Barranquilla	Bravo Petroleum
Termonorte	km 8 de la carretera troncal del Caribe, cerca a Santa Marta	NA	NA

Fuente: Agentes generadores y distribuidores mayoristas

Tabla 4-3. Localización de las termoeléctricas y plantas de abasto de combustibles

En la Tabla 4-4 se incluye una matriz con la distancia entre las plantas termoeléctricas y la planta de abasto más cercana del distribuidor mayorista que suministra combustibles líquidos a las termoeléctricas. Adicionalmente, se incluyen los tiempos promedio de viaje de un carro tanque para las distancias dadas. En el Anexo 2 se presenta la información detallada de tiempos y distancias para todas las combinaciones posibles entre plantas de abasto y termoeléctricas.

PLANTA	PLANTA DE ABASTO MAS CERCANA	DISTANCIA (KM)	TIEMPO PROMEDIO DE VIAJE (HORAS)
Termovalle	Yumbo	14.8	0.37
Termoemcali	Yumbo	7.7	0.19
Termodorada	Mansilla	144	3.60
Termocentro	Sebastopol	11	0.28
Termosierra	Sebastopol	68	1.70
Central Cartagena 1,2 y 3	Candelaria (Cartagena)	2	0.05
Termocandelaria 1 y 2	Mamonal	15.5	0.39
Barranquilla 3 y 4	TELBA (Barranquilla)	27	0.68
Termoflores 1 y 4	Barranquilla	1.3	0.03

Fuente: Datos en negrilla son suministrados por los agentes, otros son cálculos de los consultores

Tabla 4-4. Distancias y tiempos estimados del centro de abasto más cercano a la planta de generación eléctrica

4.2 Características técnicas de las plantas termoeléctricas

En el Anexo 3 se presenta una matriz con la información que se solicitó a los agentes con el fin de recopilar las características particulares de cada una de las plantas termoeléctricas necesarias para la realización del estudio. Los indicadores y parámetros técnicos de mayor interés para cada termoeléctrica se pueden observar en la Tabla 4-5. Estos parámetros son los asociados con la capacidad de producción de energía consumiendo combustibles líquidos.

Planta	Capacidad Efectiva Neta (MW)	Consumo Termico Especifico Neto (Btu/kWh)	Poder Calorífico Reportado LHV(KBtu/Barril)	Factor de Consumo (B/MWh)	Capacidad de almacenamiento (Barriles)
Termovalle	192	7,222	5,483	1.32	33,000
Termoemcali	213	6,973	5,512	1.27	32,700
Termodorada	46	9,824	5,914	1.66	9,524
Termocentro	276	7,087	5,187	1.37	25,000
Termosierra	359	6,603	5,914	1.12	28,749
Central Cartagena	187	10,430	5,861	1.78	98,000
Termocandelaria 1 y 2	316	10,525	6,134	1.72	35,147
Barranquilla 3 y 4	110	11,800	5,800	2.03	98,000
TEBSA	750	NA	NA	NA	NA
Termoflores 1	148	7,772	5,502	1.41	9,524
Termoflores 4	418	6,938	5,502	1.26	
Termonorte	80	11,922	5,831	2.04	50,000

Fuente: Datos suministrados por los agentes y cálculos de los consultores

Tabla 4-5. Características técnicas de las plantas de generación termoeléctrica

El poder calorífico de cada combustible y el consumo térmico específico neto fue reportado de acuerdo con las unidades del manejo interno que cada agente hace. Los consultores realizaron las transformaciones necesarias para unificarlo a las unidades que se muestran en la tabla anterior. Así mismo, los consultores realizaron transformaciones en la capacidad de almacenamiento reportada, con el fin de trabajar esta característica en B, que es una unidad más manejable para representar grandes volúmenes y la cual es comúnmente usada en el sector de hidrocarburos. Por otra parte, el cálculo del factor de consumo de combustibles líquidos de la columna cinco fue obtenido a partir del consumo térmico específico neto y el poder calorífico reportado por cada agente termoeléctrico. La ecuación para su cálculo se incluye a continuación:

$$Factor\ de\ consumo_i \left[\frac{B}{MWh} \right] = \frac{Consumo\ Termico\ Especifico\ Neto_i \left[\frac{kBtu}{MWh} \right]}{Poder\ Calorifico\ Reportado_i \left[\frac{kBtu}{B} \right]}$$

4.3 Características del consumo de combustibles líquidos

La capacidad máxima de recibo de combustibles se obtiene a partir de la infraestructura para la recepción del combustible líquido existente en cada planta. Para esto se utilizan típicamente carro tanques de 10,000 gal a 11,000 gal de capacidad y se presume una operación de 24 horas al día. Estos parámetros se consignan en la Tabla 4-6.

En el caso de Termoflores 1 y 4 se debe precisar que esta capacidad de recibo se refiere al caso en que la entrega de combustibles se realice con carro tanques que es la situación actual (finales de 2013). No obstante se sabe que tan pronto entre en operación el puerto de Celsia (primer semestre de 2014), la entrega de combustible se realizará a través de dos ductos dedicados con capacidad bombeo hacia las plantas cercana a los 600 Gl/min.

Planta	Capacidad de almacenamiento (Barriles)	Numero de carrotanques que pueden descargar combustible simultaneamente (# carro tanques)	tiempo promedio de descargue por carrotanque (Horas)	Recibo maximo de combustibles por dia (Barriles/Dia)
Termovalle	33,000	4	0.88	26,122
Termoemcali	32,700	2	0.88	13,061
Termodorada	9,524	1	1.50	3,810
Termocentro	25,000	2	1.00	11,429
Termosierra	28,749	3	1.50	11,429
Central Cartagena	98,000	6	1.63	21,099
Termocandelaria 1 y 2	35,147	4	0.59	39,072
Barranquilla 3 y 4	98,000	4	1.33	17,143
TEBSA	NA	NA	NA	NA
Termoflores 1 y 4	9,524	4	0.46	49,870
Termonorte	50,000	4	4.00	5,714

Fuente: Datos suministrados por los agentes (columna 2,3 y 4) y cálculos de los consultores

Tabla 4-6. Capacidad de almacenamiento y capacidad de recepción de combustibles líquidos

El consumo de combustible a plena carga, el que utilizaría para generar la ENFICC, y el requerido para generar la obligación de energía firme (OEF) para el periodo diciembre – 2013 a noviembre-2014 se presentan en las columnas 2, 3 y 4 de la Tabla 4-7. Estos consumos se calculan a partir de los parámetros técnicos de las plantas termoeléctricas aplicando el factor de consumo que es función del consumo térmico específico neto de la planta y el poder calorífico bajo del combustible utilizado. Dichos parámetros se prestan en la Tabla 4-5.

Planta	Consumo de combustibles a Capacidad Efectiva Neta (Barriles/día)	Consumo de combustibles a ENFICC (Barriles/día)	Consumo de combustibles a Obligaciones de Energía Firme (Barriles/día)	Autonomía a Capacidad Efectiva Neta (Días)
Termovalle	6,072	5,973	5,288	5.44
Termoemcali	6,462	6,076	6,076	5.06
Termodorada	1,828	1,479	1,310	5.21
Termocentro	9,055	8,710	4,626	2.76
Termosierra	9,626	8,822	8,822	2.99
Central Cartagena	7,986	6,650	5,889	12.27
Termocandelaria 1 y 2	13,028	12,085	10,700	2.70
Barranquilla 3 y 4	5,371	4,606	4,078	18.25
TEBSA	NA	NA	NA	
Termoflores 1 y 4	17,662	17,662	9,996	0.54
Termonorte	3,926	0	0	12.74

Tabla 4-7. Consumos y autonomía de las termoeléctricas

Adicionalmente, en la columna 5 de la tabla anterior se presenta la autonomía de las termoeléctricas a consumo máximo. Esta autonomía se define como el tiempo de operación continúa a plena carga requerido para agotar la capacidad total de los tanques de almacenamiento (dado que comienzan llenos) suponiendo que no hay reabastecimiento de combustible. Se observa que la termoeléctrica que menor autonomía presenta actualmente es Termoflores 1 y 4 con 0.54 días, mientras que Barranquilla 3 y 4 tienen la máxima autonomía con 18.25 días. Es preciso comentar que una vez entre en operación el puerto de Argos con su almacenamiento, Termoflores aumentará su autonomía a cerca de 13 días.

Todas las plantas están en capacidad de operar de manera ilimitada sin presentar problemas en la capacidad máxima de recepción del combustible, pues la tasa máxima de recibo en cada termoeléctrica supera la tasa de salida correspondiente al consumo a plena carga. No obstante, esta afirmación está sujeta a la comprobación mediante el modelamiento detallado de toda la infraestructura de abastecimiento de combustibles líquidos, como se presenta en el Capítulo 7.

5 ESCENARIOS DE GENERACIÓN TERMOELÉCTRICA PARA EL ANÁLISIS DE LA LOGÍSTICA

A continuación se presentan los análisis para la selección de escenarios de escasez hidrológica. Los escenarios de consumo de combustibles a ser considerados en el análisis de la logística, derivados de la ocurrencia de eventos de escasez hidrológica de combustibles líquidos, se construyen a partir de simulaciones determinísticas y estocásticas de la operación del SIN con el modelo SDDP que utiliza XM para el planeamiento operativo indicativo de largo plazo, bajo las siguientes condiciones:

- Horizonte: 5 años (60 meses) a partir del mes siguiente histórico más reciente³
- Expansión del sistema de generación: la considerada por XM con la información más reciente
- Disponibilidad de gas: la estimada por XM con la información más reciente
- Características técnicas de las centrales hidroeléctricas y termoeléctricas: las mismas utilizadas en el planeamiento operativo indicativo
- Intercambios entre regiones operativas: los estimados con la información más reciente
- Hidrologías:
 - Para el caso determinístico: la ocurrencia de eventos críticos como el fenómeno de El Niño
 - Para el caso estocástico: la selección de un caso de alto consumo de combustibles termoeléctrico tomado de la simulación estocástica.
- Resto condiciones del SIN: los demás supuestos del planeamiento operativo elaborado por XM.

5.1 Definición de la ocurrencia de eventos históricos críticos como el fenómeno de “El Niño”

Para la selección de la secuencia de caudales secos a ser considerados en la simulación determinística con el modelo SDDP, XM suministró a los consultores la siguiente información:

- Las series mensuales de caudales de los distintos ríos del SIN avaladas por el CNO. El período considerado corresponde a enero-1980 a diciembre-2012 (396 meses), con lo cual se asegura que se tengan series con un período común de información.
- Las series mensuales de aportes de energía primaria⁴ asociadas con las series de caudales, las cuales resultan de la aplicación del factor de conversión de caudal a potencia disponible para cada central o la cadena de centrales hidroeléctricas.

³ Aunque el mes inicial resultó ser noviembre de 2013, los análisis de selección de escenarios se realizaron a partir de una simulación iniciada en julio de 2013. Sin embargo todos las conclusiones son válidas.

En las series de aportes de energía primaria, XM aclara lo siguiente:

- Las series secundarias fueron calculadas a partir de los factores de serie menor (Nechí, Pajarito, Dolores, Quebradona, Cañasgordas, Calderas).
- Se consideró la serie Bogotá N.R., en lugar de las que conforman el sistema de la Sabana (Sisga, Neusa, Tominé, Checua, Teusacá, Baraya y Fagualicachín), debido a que permite simplificar los cálculos y porque a partir de Bogotá se pueden obtener todas sus series componentes mediante el respectivo factor de serie menor.
- No se consideraron las series asociadas con proyectos futuros, debido a que harían más corto el período conjunto de información.

5.1.1 Análisis de sequías

Yevjevich en 1967⁵ y posteriormente Saldarriaga y Yevjevich en 1970⁶ fueron quienes propusieron la teoría básica para analizar las propiedades estadísticas de una sequía a partir de series de caudales. El elemento básico para identificar una sequía en una serie de escurrimiento es el nivel umbral o nivel de truncación de caudal (denotado por Q_r) por debajo del cual se considera que hay deficiencia de agua. Una sequía (en inglés “drought”) o racha negativa (en inglés “run”) se define como la parte de la serie de caudales Q_t para los cuales todos los valores consecutivos están por debajo del nivel umbral Q_r ⁷. El tiempo t es expresado en meses y el umbral también es mensual (el promedio mensual o una fracción del mismo).

4 La energía primaria de una central hidroeléctrica es la energía asociada con el aporte hidrológico que, si se dieran las condiciones apropiadas, sería potencialmente generable. En otras palabras, toda la energía primaria se podría transformar en energía eléctrica (energía secundaria), si fuera factible generarla para atender parte de la demanda del sistema de generación del que hace parte la central. En consecuencia, no siempre toda la energía primaria se puede generar en razón de que, o no existe suficiente capacidad instalada en la central, o hay restricciones en la cadena o en algún componente del sistema de transporte para evacuar toda la potencia generada por la central, o no existe suficiente demanda para ser atendida cuando se presentan caudales abundantes. Esta es la razón de los vertimientos de energía primaria.

5 Yevjevich, V., (1967). An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic drought. Hydrology Paper No. 23, Colorado State University, Fort Collins, Co.

Yevjevich, Vujica (1972). Probability and Statistics in Hydrology. Water Resources Publications. Fort Collins, Colorado, U.S.A.

6 Saldarriaga, J. & Yevjevich, V. (1970). Application of run-lengths to hydrologic series, Hydrology Papers. Colorado State University, Fort Collins, Co.

7 Las rachas positivas también son de interés en hidrología, en especial para el diseño y protección de estructuras hidráulicas y para el planeamiento de la operación de sistemas de control de crecientes.

En la Figura 5-1 se ilustra la serie de las diferencias entre Q_t y Q_r . La secuencia de valores negativos consecutivos de estas diferencias constituyen la sequía, la cual se inicia en el período $t+1$ (nótese que en t la diferencia $Q_t - Q_r$ es positiva) y termina en el período $t+k$ (nótese que en $t+(k+1)$ la diferencia $Q_t - Q_r$ es nuevamente positiva). Se muestra en la figura otra racha que se inicia en el período $t+(k+2)$.

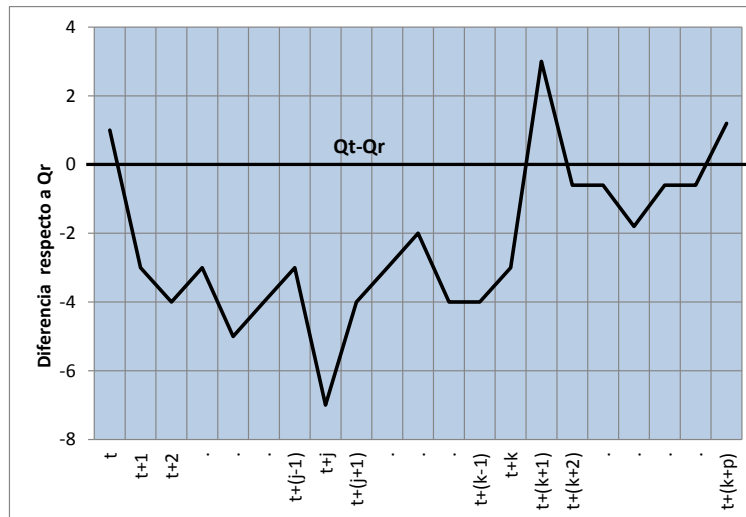


Figura 5-1. Series de diferencias entre los caudales y el nivel de referencia ($Q_t - Q_r$)

La Figura 5-2 muestra las características (o atributos) de una sequía:

- **Duración o longitud de la sequía ("run-length"):** es el número de períodos consecutivos en que la serie de diferencias $Q_t - Q_r$ es negativa. O en otras palabras, es el número de períodos transcurridos entre dos valores positivos en la serie de diferencias. En la figura la duración es k .
- **Intensidad máxima de la sequía ("Intensity"):** es la mayor diferencia ocurrida durante la sequía, el cual corresponde al período más crítico.
- **Déficit o severidad de la sequía ("deficit" o "severity"):** es la suma de las diferencias negativas de toda la sequía (área sombreada).

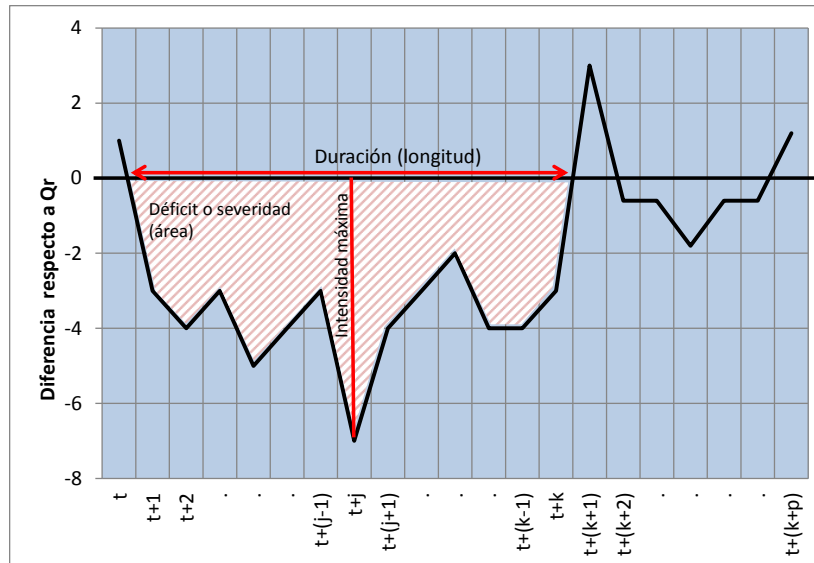


Figura 5-2. Atributos de la sequía

La Figura 5-3 ilustra el concepto de “racha extendida”, el cual corresponde a la serie de caudales que involucran dos o más rachas individuales consecutivas (dos en el caso de la figura), las cuales están separadas por uno o más períodos que presentan diferencias de $Q_t - Q_r$ positivas (es el caso del período $t+k+1$) pero que siguen siendo críticas en cuanto a déficit. Los criterios utilizados para determinar rachas extendidas en las series de caudales de los ríos colombianos que alimentan centrales hidroeléctricas se presentan más adelante.

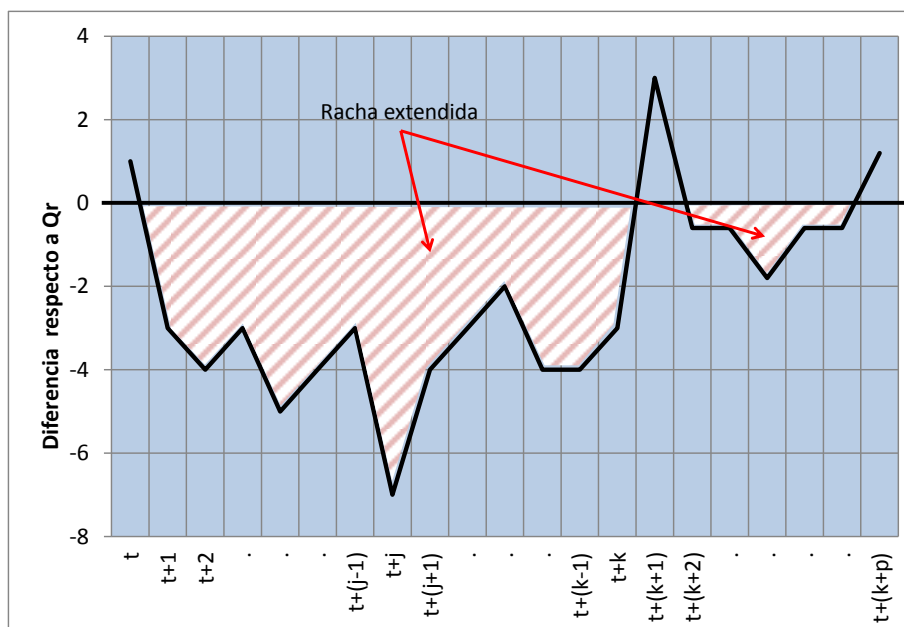


Figura 5-3. Sequía extendida

5.1.2 Sequías en las series de caudales de los ríos colombianos que alimentan centrales hidroeléctricas

Dado que el interés está en las sequías que afectan la producción de energía del sistema de generación, las series apropiadas para ser analizadas son las de los aportes hidrológicos expresados en términos de energía primaria. De otra parte, si bien la realidad que se analiza corresponde a un proceso estocástico multivariado con estructura estadística de correlación espacio-temporal no nula, el análisis de las sequías se concentra en la serie agregada de los aportes de energía primaria ya que de esta manera se reconoce el hecho de existe un único sistema de generación interconectado cuyo objetivo es atender la demanda nacional mediante una operación coordinada.

Para analizar las rachas se toma como caudal de referencia (Q_r) la media mensual de la energía primaria correspondiente a los aportes, la cual se presenta en la Figura 5-4.

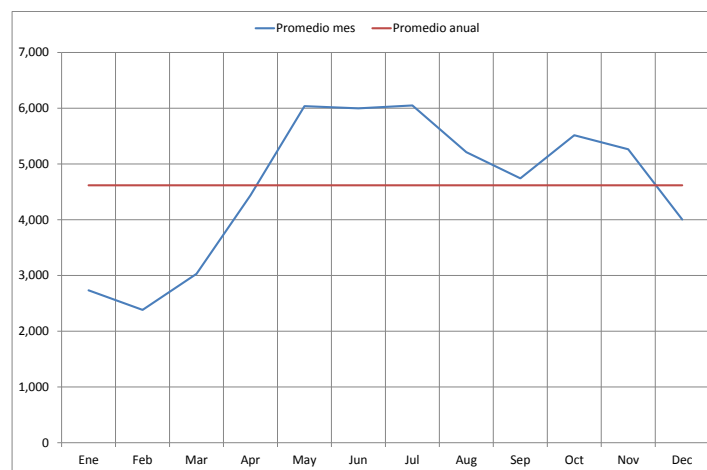


Figura 5-4. Aportes promedios mensuales (GWh)

Con respecto a la media Q_r se presentan rachas de sequía de duración desde 2 meses hasta 24 meses (que podrían denominarse “rachas individuales”). Sin embargo, al examinar las rachas individuales vecinas se puede detectar que para algunos meses localizados entre tales rachas, el caudal supera escasamente la media y el índice ONI⁸ mantiene valores indicativos de presencia del fenómeno de “El Niño”. Entonces es razonable considerar que esas rachas individuales vecinas constituyen una sola racha (la “racha extendida”). En otras palabras, una racha extendida está conformada por una o más rachas vecinas individuales, para las cuales resulta claro que los caudales de la racha individual anterior no logran niveles de recuperación definitivos, sino que vuelven a recaer a la siguiente racha individual.

La Figura 5-5 ilustra series de caudales con las cuales se puede comprender el concepto de “racha extendida”. El nombre de las series (jun-82, jun-90 y mar-97) corresponde al mes-año en que comenzó una sequía. Nótese que la serie mar-97 entra en racha negativa individual

⁸ Oceanic Niño Index

(sequía) en marzo, pero en julio la diferencia es positiva (el caudal superó la media de ese mes), con lo cual la racha individual es de 4 meses. Sin embargo, en agosto la diferencia vuelve a ser negativa y se agudiza hasta mayo del siguiente año (1998). La segunda racha individual es de 10 meses de duración. Aunque la serie en agosto de 1998 vuelve a ser negativa, oscila entre valores positivos y negativos mostrando síntomas de recuperación, pero retorna a valores positivos definitivamente a partir de diciembre de 1998. Entonces es razonable considerar que la racha extendida duró 15 meses con iniciación en marzo de 1997 y finalización en mayo de 1998.



Figura 5-5. Diferencias mensuales respecto a la media (Qt-Qr) (GWh)

La racha extendida de la serie denotada por “jun-82” dura 18 meses con mes inicial en junio de 1982 y mes final en noviembre de 1983. Está conformada por dos rachas individuales de duración 10 y 7 meses respectivamente (de junio de 1982 a marzo de 1983 la primera y de mayo a noviembre de 1983).

La racha extendida llamada jun-90, que en la Figura 5-6 se muestra en su totalidad, duró 39 meses (de junio de 1990 a agosto de 1993) y estuvo conformada por tres rachas individuales: de jun-90 a sep-90 (4 meses), de nov-90 a jun-91 (8 meses) y de sep-91 a ago-93 (24 meses). Esta racha es recordada por el racionamiento que se dio desde el 2 de febrero de 1992 hasta el 7 de febrero de 1993, alcanzando en Bogotá en lo más profundo de la crisis cortes hasta por 9 horas de duración (37.5% del tiempo principalmente en los sectores residencial y comercial).

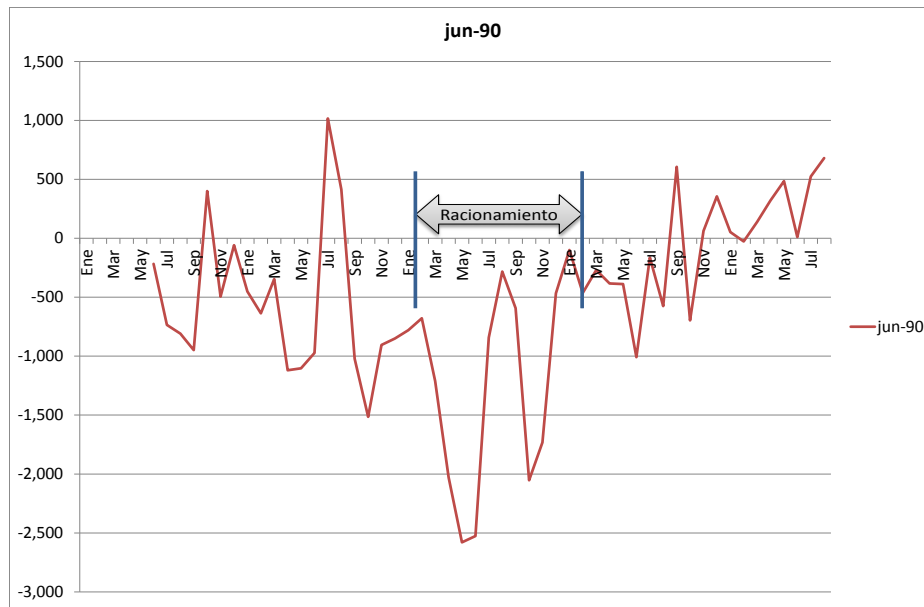


Figura 5-6. Racha extendida que condujo al racionamiento de 1992-93 (GWh)

Con las consideraciones anteriores, se obtienen las series que se presentan en al Tabla 5-1, las cuales contemplan las rachas extendidas de sequía más extrema (en duración y severidad)⁹ en el período analizado.

La Tabla 5-2 presenta la suma de diferencias acumuladas desde el primer mes de la serie. La última fila indica el valor promedio de diferencia para el total de datos de la serie. Nótese que todas las series, con excepción de las dos últimas (a causa de tener un mes de inicio muy reciente), poseen 66 meses de duración. Se aprecia que la serie “jun-90” (y “nov-89” que es muy similar porque contiene un conjunto común significativo de meses) es una de las series candidatas a ser utilizada en los análisis de logística de combustibles por ser la serie de 66 meses más crítica del periodo total de 396 con información disponible. Otras dos características de esta serie es que se dio el fenómeno de El Niño y contiene el período que condujo al racionamiento más reciente.

La siguiente sequía es la contenida en la serie mar-97 aunque es de menor duración que la de jun-90 tuvo una intensidad máxima más extrema. Esta serie es una segunda candidata a ser considerada en los análisis de la logística de combustibles líquidos.

⁹ Aunque la “intensidad máxima” fue un criterio de segundo orden para seleccionar las series, las series presentadas contienen intensidades máximas importantes.

	Mes	Prom	ene-80	jun-82	dic-84	nov-86	nov-87	nov-89	jun-90	dic-94	mar-97	nov-00	sep-02	mar-05	may-09	jun-12
1	Ene	2,734	(112)													
2	Feb	2,383	(132)													
3	Mar	3,030	(933)								(204)			(600)		
4	Apr	4,437	(1,334)								(515)			(422)		
5	May	6,038	(2,025)								(1,482)			451	(1,046)	
6	Jun	5,998	125	(1,165)					(217)		(1,071)			(286)	(429)	(854)
7	Jul	6,050	(1,253)	(327)					(735)		417			(1,658)	(427)	(101)
8	Aug	5,212	(1,238)	(420)					(809)		(1,391)			(795)	(337)	503
9	Sep	4,741	(869)	(171)					(949)		(1,787)			(839)	(92)	(1,365)
10	Oct	5,515	203	(127)					400		(2,817)			(1,683)	527	(1,524)
11	Nov	5,264	(834)	(1,290)		(198)	(860)	(402)	(495)		(2,168)	(255)	(1,685)	1,585	(998)	(1,139)
12	Dec	4,003	(704)	(804)	(26)	(1,004)	(585)	(511)	(59)	(630)	(2,163)	(422)	(1,194)	(260)	(1,428)	(763)
13	Ene	2,734	(685)	(545)	(95)	(742)	(629)	(67)	(451)	(663)	(1,307)	(203)	(1,070)	227	(1,141)	
14	Feb	2,383	(287)	(500)	(600)	(546)	(372)	70	(636)	(904)	(887)	(501)	(757)	(50)	(893)	
15	Mar	3,030	(529)	(138)	(638)	(1,059)	(1,233)	(30)	(346)	(545)	(1,348)	(273)	(494)	1,095	(1,007)	
16	Apr	4,437	(62)	863	(1,364)	(1,412)	(1,187)	(431)	(1,119)	(762)	(1,218)	(1,468)	(113)	1,691	(653)	
17	May	6,038	2,039	(485)	(580)	(961)	(1,963)	796	(1,103)	(963)	(419)	(910)	(197)	2,060	(594)	
18	Jun	5,998	885	(1,531)	(340)	(2,148)	(797)	(217)	(972)	(209)	330	(423)	(340)	1,278	317	
19	Jul	6,050	(29)	(359)	(1,445)	335	659	(735)	1,016	(501)	1,543	(796)	(482)	(615)	1,796	
20	Aug	5,212	(939)	(164)	922	636	729	(809)	414	531	(238)	(543)	(96)	(869)	460	
21	Sep	4,741	144	(18)	1,066	(271)	1,552	(949)	(1,023)	(488)	235	(45)	(337)	(753)	1,606	
22	Oct	5,515	240	(808)	(41)	716	797	400	(1,515)	(515)	(534)	(1,282)	(44)	59	878	
23	Nov	5,264	13	(1,654)	(387)	(860)	2,381	(495)	(905)	(1,184)	(276)	(507)	(263)	1,110	3,549	
24	Dec	4,003	(404)	1	(191)	(585)	1,553	(59)	(850)	16	1,007	335	239	242	2,894	
25	Ene	2,734	514	495	(63)	(629)	1,322	(451)	(780)	48	1,106	(347)	(3)	108	638	
26	Feb	2,383	568	1,141	440	(372)	521	(636)	(679)	780	2,062	(664)	(403)	(625)	622	
27	Mar	3,030	474	(618)	342	(1,233)	1,297	(346)	(1,210)	1,400	1,765	(473)	(261)	(428)	2,692	
28	Apr	4,437	2,440	(1,356)	225	(1,187)	(642)	(1,119)	(2,029)	(157)	1,918	482	(186)	549	5,834	
29	May	6,038	1,751	(611)	(1,216)	(1,963)	106	(1,103)	(2,580)	1,264	250	(354)	733	928	3,259	
30	Jun	5,998	(1,165)	1,594	1,337	(797)	329	(972)	(2,526)	387	632	1,046	1,127	1,084	1,271	
31	Jul	6,050	(327)	88	1,122	659	(283)	1,016	(842)	2,385	(1,083)	(626)	23	(1,075)	(27)	
32	Aug	5,212	(420)	844	(206)	729	(437)	414	(283)	565	(581)	61	208	524	(8)	
33	Sep	4,741	(171)	1,539	(1,181)	1,552	601	(1,023)	(593)	(226)	1,263	(839)	326	545	9	
34	Oct	5,515	(127)	927	1,799	797	328	(1,515)	(2,053)	804	1,954	(1,683)	(77)	1,871	1,427	
35	Nov	5,264	(1,290)	1,189	(198)	2,381	(402)	(905)	(1,732)	(920)	872	(1,685)	1,058	606	2,772	
36	Dec	4,003	(804)	(26)	(1,004)	1,553	(511)	(850)	(466)	(381)	1,430	(1,194)	(299)	588	3,838	
37	Ene	2,734	(545)	(95)	(742)	1,322	(67)	(780)	(100)	588	400	(1,070)	20	516	1,653	
38	Feb	2,383	(500)	(600)	(546)	521	70	(679)	(464)	573	785	(757)	175	780	459	
39	Mar	3,030	(138)	(638)	(1,059)	1,297	(30)	(1,210)	(269)	(204)	460	(494)	(600)	728	932	
40	Apr	4,437	863	(1,364)	(1,412)	(642)	(431)	(2,029)	(384)	(515)	(811)	(113)	(422)	(492)	3,408	
41	May	6,038	(485)	(580)	(961)	106	796	(2,580)	(389)	(1,482)	815	(197)	451	790	2,149	
42	Jun	5,998	(1,531)	(340)	(2,148)	329	(217)	(2,526)	(1,009)	(1,071)	917	(340)	(286)	1,649	(854)	
43	Jul	6,050	(359)	(1,445)	335	(283)	(735)	(842)	(164)	417	570	(482)	(1,658)	2,351	(101)	
44	Aug	5,212	(164)	922	636	(437)	(809)	(283)	(576)	(1,391)	1,300	(96)	(795)	1,555	503	
45	Sep	4,741	(18)	1,066	(271)	601	(949)	(593)	607	(1,787)	1,955	(337)	(92)	895	(1,252)	
46	Oct	5,515	(808)	(41)	716	328	400	(2,053)	(697)	(2,817)	198	(44)	527	1,102	(674)	
47	Nov	5,264	(1,654)	(387)	(860)	(402)	(495)	(1,732)	62	(2,168)	(255)	(263)	1,585	2,787	(1,139)	
48	Dec	4,003	1	(191)	(585)	(511)	(59)	(466)	355	(2,163)	(422)	239	(260)	644	(763)	
49	Ene	2,734	495	(63)	(629)	(67)	(451)	(100)	52	(1,307)	(203)	(3)	227	1,316		
50	Feb	2,383	1,141	440	(372)	70	(636)	(464)	(27)	(887)	(501)	(403)	(50)	952		
51	Mar	3,030	(618)	342	(1,233)	(30)	(346)	(269)	139	(1,348)	(273)	(261)	1,095	1,310		
52	Apr	4,437	(1,356)	225	(1,187)	(431)	(1,119)	(384)	321	(1,218)	(1,468)	(186)	1,691	386		
53	May	6,038	(611)	(1,216)	(1,963)	796	(1,103)	(389)	484	(419)	(910)	733	2,060	(1,046)		
54	Jun	5,998	1,594	1,337	(797)	(217)	(972)	(1,009)	10	330	(423)	1,127	1,278	(429)		
55	Jul	6,050	88	1,122	659	(735)	1,016	(164)	524	1,543	(796)	23	(615)	(427)		
56	Aug	5,212	844	(206)	729	(809)	414	(576)	680	(238)	(543)	208	(869)	(337)		
57	Sep	4,741	1,539	(1,181)	1,552	(949)	(1,023)	607	(84)	235	(45)	326	(753)	(1,365)		
58	Oct	5,515	927	1,799	797	400	(1,515)	(697)	159	(534)	(1,282)	(77)	59	(1,524)		
59	Nov	5,264	1,189	(198)	2,381	(495)	(905)	62	167	(276)	(507)	1,058	1,110	(998)		
60	Dec	4,003	(26)	(1,004)	1,553	(59)	(850)	355	(630)	1,007	335	(299)	242	(1,428)		
61	Ene	2,734	(95)	(742)	1,322	(451)	(780)	52	(663)	1,106	(347)	20	108	(1,141)		
62	Feb	2,383	(600)	(546)	521	(636)	(679)	(27)	(904)	2,062	(664)	175	(625)	(893)		
63	Mar	3,030	(638)	(1,059)	1,297	(346)	(1,210)	139	(545)	1,765	(473)	(600)	(428)	(1,007)		
64	Apr	4,437	(1,364)	(1,412)	(642)	(1,119)	(2,029)	321	(762)	1,918	482	(422)	549	(653)		
65	May	6,038	(580)	(961)	106	(1,103)	(2,580)	484	(963)	250	(354)	451	928	(594)		
66	Jun	5,998	(340)	(2,148)	329	(972)	(2,526)	10	(209)	632	1,046	(286)	1,084	317		
67	Jul	6,050		335	(283)	1,016	(842)	524	(501)	(1,083)	(626)	(1,658)	(1,075)	1,796		
68	Aug	5,212		636	(437)	414	(283)	680	531	(581)	61	(795)	524	460		
69	Sep	4,741		(271)	601	(1,023)	(593)	(84)	(488)	1,263		(92)	545			
70	Oct	5,515		716	328	(1,515)	(2,053)	159	(515)	1,954		527	1,871			
71	Nov	5,264		(860)	(402)	(905)	(1,732)	167	(1,184)	872		1,585	606			
72	Dec	4,003			(511)	(850)	(466)	(630)		1,430		(260)	588			
73	Ene	2,734			(67)	(780)	(100)	(663)		400		227	516			
74	Feb	2,383			70	(679)	(464)	(904)		785		(50)	780			
75	Mar	3,030			(30)	(1,210)	(269)	(545)		460		1,095				
76	Apr	4,437			(431)	(2,029)	(384)	(762)		(811)		1,691				
77	May	6,038			796					815						

Notas: (i) La columna “Prom” corresponde a los aportes hidrológicos mensuales de energía primaria. (ii) Los nombres de las columnas “ene-80” a “jun-12” corresponden al mes en que se inició la racha, y las cifras de estas columnas corresponden a la diferencia Qr-Qt mensual (Qr es el aporte promedio mensual).

Tabla 5-1. Series históricas que contienen las rachas extendidas de sequía más extremas (GWh)

	Mes	Prom	ene-80	jun-82	dic-84	nov-86	nov-87	nov-89	jun-90	dic-94	mar-97	nov-00	sep-02	mar-05	may-09	jun-12
1	Ene	2,734	(112)													
2	Feb	2,383	(244)													
3	Mar	3,030	(1,177)								(204)			(600)		
4	Apr	4,437	(2,510)								(719)			(1,022)		
5	May	6,038	(4,535)								(2,201)			(570)	(1,046)	
6	Jun	5,998	(4,411)	(1,165)					(217)		(3,272)			(856)	(1,474)	(854)
7	Jul	6,050	(5,664)	(1,492)					(951)		(2,855)			(2,514)	(1,901)	(954)
8	Aug	5,212	(6,902)	(1,912)					(1,761)		(4,247)			(3,308)	(2,238)	(451)
9	Sep	4,741	(7,771)	(2,083)					(2,710)		(6,034)		(839)	(3,401)	(3,603)	(1,703)
10	Oct	5,515	(7,568)	(2,210)					(2,309)		(8,851)		(2,522)	(2,874)	(5,127)	(2,377)
11	Nov	5,264	(8,402)	(3,500)		(198)	(860)	(402)	(2,804)		(11,018)	(255)	(4,207)	(1,288)	(6,125)	(3,515)
12	Dec	4,003	(9,106)	(4,304)	(26)	(1,201)	(1,445)	(913)	(2,863)	(630)	(13,181)	(677)	(5,401)	(1,548)	(7,553)	(4,278)
13	Ene	2,734	(9,791)	(4,849)	(121)	(1,943)	(2,074)	(980)	(3,314)	(1,293)	(14,488)	(880)	(6,471)	(1,321)	(8,694)	
14	Feb	2,383	(10,078)	(5,349)	(720)	(2,489)	(2,447)	(910)	(3,950)	(2,197)	(15,375)	(1,381)	(7,228)	(1,371)	(9,587)	
15	Mar	3,030	(10,607)	(5,487)	(1,358)	(3,549)	(3,679)	(940)	(4,296)	(2,743)	(16,724)	(1,654)	(7,722)	(276)	(10,594)	
16	Apr	4,437	(10,669)	(4,624)	(2,722)	(4,961)	(4,866)	(1,371)	(5,415)	(3,504)	(17,942)	(3,121)	(7,835)	1,414	(11,247)	
17	May	6,038	(8,629)	(5,109)	(3,302)	(5,922)	(6,829)	(575)	(6,518)	(4,467)	(18,361)	(4,031)	(8,033)	3,474	(11,841)	
18	Jun	5,998	(7,745)	(6,640)	(3,642)	(8,070)	(7,625)	(792)	(7,491)	(4,676)	(18,031)	(4,454)	(8,373)	4,752	(11,525)	
19	Jul	6,050	(7,774)	(6,999)	(5,087)	(7,735)	(6,966)	(1,526)	(6,475)	(5,178)	(16,488)	(5,250)	(8,855)	4,137	(9,729)	
20	Aug	5,212	(8,713)	(7,163)	(4,165)	(7,099)	(6,237)	(2,336)	(6,061)	(4,647)	(16,726)	(5,792)	(8,951)	3,268	(9,269)	
21	Sep	4,741	(8,569)	(7,180)	(3,099)	(7,370)	(4,686)	(3,285)	(7,084)	(5,135)	(16,490)	(5,837)	(9,288)	2,515	(7,663)	
22	Oct	5,515	(8,329)	(7,989)	(3,140)	(6,654)	(3,889)	(2,885)	(8,599)	(5,650)	(17,024)	(7,118)	(9,332)	2,575	(6,786)	
23	Nov	5,264	(8,316)	(9,642)	(3,527)	(7,514)	(1,508)	(3,379)	(9,504)	(6,834)	(17,300)	(7,625)	(9,595)	3,685	(3,237)	
24	Dec	4,003	(8,721)	(9,641)	(3,718)	(8,099)	45	(3,438)	(10,354)	(6,818)	(16,293)	(7,290)	(9,356)	3,926	(343)	
25	Ene	2,734	(8,207)	(9,147)	(3,780)	(8,728)	1,367	(3,889)	(11,134)	(6,770)	(15,187)	(7,637)	(9,360)	4,034	295	
26	Feb	2,383	(7,639)	(8,006)	(3,340)	(9,101)	1,888	(4,525)	(11,813)	(5,990)	(13,126)	(8,301)	(9,763)	3,409	917	
27	Mar	3,030	(7,164)	(8,624)	(2,999)	(10,333)	3,185	(4,871)	(13,023)	(4,590)	(11,361)	(8,774)	(10,024)	2,981	3,609	
28	Apr	4,437	(4,724)	(9,980)	(2,773)	(11,520)	2,543	(5,991)	(15,052)	(4,747)	(9,443)	(8,292)	(10,210)	3,530	9,444	
29	May	6,038	(2,973)	(10,591)	(3,989)	(13,483)	2,649	(7,094)	(17,632)	(3,483)	(9,193)	(8,646)	(9,477)	4,458	12,703	
30	Jun	5,998	(4,139)	(8,997)	(2,653)	(14,279)	2,978	(8,066)	(20,158)	(3,096)	(8,562)	(7,601)	(8,350)	5,543	13,974	
31	Jul	6,050	(4,465)	(8,910)	(1,531)	(13,621)	2,695	(7,050)	(21,000)	(712)	(9,644)	(8,227)	(8,328)	4,468	13,947	
32	Aug	5,212	(4,885)	(8,065)	(1,736)	(12,892)	2,258	(6,636)	(21,283)	(147)	(10,225)	(8,166)	(8,120)	4,991	13,939	
33	Sep	4,741	(5,056)	(6,526)	(2,917)	(11,340)	2,859	(7,659)	(21,876)	(373)	(8,963)	(9,005)	(7,793)	5,536	13,948	
34	Oct	5,515	(5,183)	(5,600)	(1,118)	(10,543)	3,187	(9,174)	(23,928)	431	(7,008)	(10,687)	(7,871)	7,407	15,375	
35	Nov	5,264	(6,473)	(4,411)	(1,316)	(8,162)	2,785	(10,080)	(25,660)	(489)	(6,136)	(12,372)	(6,813)	8,013	18,147	
36	Dec	4,003	(7,277)	(4,436)	(2,319)	(6,610)	2,274	(10,929)	(26,127)	(870)	(4,706)	(13,566)	(7,112)	8,601	21,985	
37	Ene	2,734	(7,822)	(4,531)	(3,061)	(5,287)	2,207	(11,709)	(26,227)	(282)	(4,306)	(14,636)	(7,091)	9,117	23,638	
38	Feb	2,383	(8,323)	(5,131)	(3,607)	(4,766)	2,277	(12,388)	(26,691)	291	(3,521)	(15,394)	(6,916)	9,897	24,097	
39	Mar	3,030	(8,460)	(5,769)	(4,666)	(3,469)	2,247	(13,598)	(26,960)	87	(3,060)	(15,888)	(7,515)	10,625	25,030	
40	Apr	4,437	(7,597)	(7,133)	(6,079)	(4,111)	1,816	(15,627)	(27,344)	(428)	(3,871)	(16,001)	(7,938)	10,133	28,438	
41	May	6,038	(8,082)	(7,713)	(7,040)	(4,005)	2,611	(18,207)	(27,733)	(1,910)	(3,056)	(16,198)	(7,486)	10,923	30,587	
42	Jun	5,998	(9,613)	(8,052)	(9,187)	(3,676)	2,395	(20,733)	(28,742)	(2,981)	(2,139)	(16,538)	(7,772)	12,573	29,734	
43	Jul	6,050	(9,972)	(9,498)	(8,853)	(3,959)	1,660	(21,575)	(28,906)	(2,564)	(1,569)	(17,020)	(9,430)	14,924	29,633	
44	Aug	5,212	(10,136)	(8,575)	(8,217)	(4,397)	851	(21,858)	(29,481)	(3,956)	(270)	(17,116)	(10,224)	16,479	30,136	
45	Sep	4,741	(10,153)	(7,509)	(8,488)	(3,795)	(98)	(22,451)	(28,875)	(5,743)	1,685	(17,453)	(10,317)	17,373	28,885	
46	Oct	5,515	(10,962)	(7,551)	(7,772)	(3,468)	302	(24,503)	(29,572)	(8,560)	1,883	(17,497)	(9,789)	18,475	28,210	
47	Nov	5,264	(12,616)	(7,937)	(8,632)	(3,869)	(193)	(26,236)	(29,509)	(10,727)	1,628	(17,761)	(8,204)	21,262	27,072	
48	Dec	4,003	(12,615)	(8,128)	(9,217)	(4,380)	(252)	(26,702)	(29,154)	(12,890)	1,206	(17,522)	(8,464)	21,906	26,309	
49	Ene	2,734	(12,120)	(8,191)	(9,846)	(4,447)	(703)	(26,802)	(29,102)	(14,198)	1,003	(17,525)	(8,237)	23,222		
50	Feb	2,383	(10,979)	(7,751)	(10,219)	(4,378)	(1,338)	(27,266)	(29,128)	(15,084)	503	(17,928)	(8,287)	24,174		
51	Mar	3,030	(11,597)	(7,409)	(11,451)	(4,407)	(1,685)	(27,535)	(28,989)	(16,433)	230	(18,190)	(7,192)	25,484		
52	Apr	4,437	(12,953)	(7,184)	(12,638)	(4,839)	(2,804)	(27,919)	(28,668)	(17,651)	(1,238)	(18,376)	(5,502)	25,870		
53	May	6,038	(13,564)	(8,400)	(14,601)	(4,043)	(3,907)	(28,308)	(28,184)	(18,070)	(2,148)	(17,642)	(3,441)	24,825		
54	Jun	5,998	(11,971)	(7,063)	(15,397)	(4,260)	(4,879)	(29,317)	(28,174)	(17,740)	(2,571)	(16,516)	(2,163)	24,396		
55	Jul	6,050	(11,883)	(5,941)	(14,738)	(4,994)	(3,863)	(29,481)	(27,650)	(16,197)	(3,366)	(16,493)	(2,779)	23,969		
56	Aug	5,212	(11,039)	(6,147)	(14,009)	(5,804)	(3,449)	(30,056)	(26,970)	(16,435)	(3,909)	(16,285)	(3,648)	23,632		
57	Sep	4,741	(9,500)	(7,328)	(12,458)	(6,753)	(4,472)	(29,450)	(27,054)	(16,199)	(3,954)	(15,959)	(4,400)	22,267		
58	Oct	5,515	(8,573)	(5,528)	(11,661)	(6,352)	(5,988)	(30,147)	(26,895)	(16,733)	(5,235)	(16,036)	(4,341)	20,743		
59	Nov	5,264	(7,384)	(5,726)	(9,280)	(6,847)	(6,893)	(30,085)	(26,728)	(17,009)	(5,742)	(14,978)	(3,231)	19,745		
60	Dec	4,003	(7,410)	(6,730)	(7,727)	(6,906)	(7,743)	(29,729)	(27,358)	(16,002)	(5,407)	(15,277)	(2,989)	18,317		
61	Ene	2,734	(7,504)	(7,471)	(6,405)	(7,357)	(8,522)	(29,677)	(28,021)	(14,896)	(5,754)	(15,257)	(2,882)	17,176		
62	Feb	2,383	(8,104)	(8,018)	(5,884)	(7,993)	(9,201)	(29,703)	(28,925)	(12,835)	(6,418)	(15,081)	(3,507)	16,284		
63	Mar	3,030	(8,742)	(9,077)	(4,587)	(8,339)	(10,412)	(29,564)	(29,471)	(11,070)	(6,891)	(15,681)	(3,935)	15,277		
64	Apr	4,437	(10,106)	(10,489)	(5,229)	(9,458)	(12,441)	(29,243)	(30,232)	(9,152)	(6,409)	(16,103)	(3,386)	14,623		
65	May	6,038	(10,686)	(11,450)	(5,123)	(10,561)	(15,021)	(28,759)	(31,195)	(8,903)	(6,763)	(15,652)	(2,457)	14,029		
66	Jun	5,998	(11,026)	(13,598)	(4,794)	(11,534)	(17,546)	(28,749)	(31,404)	(8,271)	(5,717)	(15,938)	(1,373)	14,346		
67	Jul	6,050		(13,263)	(5,077)	(10,518)	(18,389)	(28,225)	(31,906)	(9,354)	(6,343)	(17,595)	(2,448)	16,142		
68	Aug	5,212		(12,628)	(5,514)	(10,104)	(18,671)	(27,545)	(31,375)	(9,935)	(6,282)	(18,390)	(1,925)	16,601		
69	Sep	4,741		(12,899)	(4,913)	(11,126)	(19,264)	(27,630)	(31,863)	(8,672)		(18,482)	(1,380)			
70	Oct	5,515		(12,183)	(4,585)	(12,642)	(21,317)	(27,470)	(32,378)	(6,717)		(17,955)	491			
71	Nov	5,264		(13,043)	(4,987)	(13,547)	(23,049)	(27,303)	(33,562)	(5,845)		(16,370)	1,097			
72	Dec	4,003			(5,498)	(14,397)	(23,515)	(27,933)		(4,415)				1,685		
73	Ene	2,734			(5,565)	(15,176)	(23,615)	(28,596)		(4,015)				2,201		
74	Feb	2,383			(5,495)	(15,856)	(24,079)	(29,500)		(3,230)				2,981		
75	Mar	3,030			(5,525)	(17,066)	(24,349)	(30,046)		(2,770)						
76	Apr	4,437			(5,956)	(19,095)	(24,732)	(30,807)		(3,580)						
77	May	6,038			(5,161)					(2,765)						
	Min		(13,564)	(13,598)	(15,397)	(19,095)	(24,732)	(30,807)	(33,562)	(18,070)	(18,361)	(18,482)	(10,317)	(3,401)	(11,841)	(4,278)
	Num		66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	44	7
	Prom		(205.5)	(206.0)	(233.3)	(289.3)	(374.7)	(466.8)	(508.5)	(273.8)	(278.2)	(280.0)	(156.3)	(51.5)	(269.1)	(611.2)

Notas: (i) La columna “Prom” corresponde a los aportes hidrológicos mensuales de energía primaria. (ii) Los nombres de las columnas “ene-80” a “jun-12” corresponden al mes en que se inició la r

Al seleccionar como nivel umbral (Qr) de sequía el 90% del caudal promedio mensual, se confirma que la serie extendida asociada con la “jun-90” tendría 24 meses de duración iniciando en ene-91 y finalizando en dic-92. La segunda más extrema es la asociada con “mar-97” iniciándose en abril de 1997 y terminado en abril de 1998 (13 meses de duración).

5.1.3 Conclusión

En conclusión, las sequías aquí denominadas series jun-90 y mar-97 son las candidatas a ser consideradas para realizar las corridas con el SDDP y obtener los consumos de combustible líquido para posteriormente verificar la capacidad del sistemas de abastecimiento para satisfacer estas demandas.

Para realizar las simulaciones de 5 años de horizonte con el SDDP basta hacer coincidir el mes inicial de la simulación con el correspondiente mes de la serie con sequía seleccionada.

5.2 Selección del caso de la simulación estocástica

XM suministró a los consultores los resultados de una simulación de la operación del SIN realizada con el modelo SDDP y alimentada con una generación sintética de caudales de 200 series independientes para un horizonte de 5 años (60 meses). La información suministrada es la siguiente:

- Energía afluyente (aportes) total del SIN para: (i) cada series hidrológica, (ii) cada etapa (mes). Los valores están expresados en GWH/mes. La etapa 1 corresponde al mes de julio de 2013.
- Generación termoeléctrica para: (i) cada recurso modelados, (ii) cada series hidrológica, (ii) cada etapa y (iii) cada bloque de carga¹⁰. Los valores están expresados en GWh.
- Consumo de combustible líquido (FO#2,FO#6,JA1) expresado en GBTU, para cada una de las 60 etapas (meses) del horizonte, discriminado por planta para: (i) cada serie hidrológica, (ii) cada etapa (mes del horizonte), (iii) cada uno de los 5 bloques de carga.
- Configuración térmica del SDDP con los parámetros de las distintas plantas. Algunos de los parámetros de importancia son: (I) Generación maxima de la planta en MW, (ii) Indice de fallas de corto plazo de la planta (ICP) en %, (iii) Indice histórico de indisponibilidad de la planta (IH) en %, (iv) consumo térmico especifico (“heat rate”) de la planta en MBTU/MWh.

¹⁰ Bloque 1 corresponde a periodos de punta. Bloque 5 a periodos de baja carga. Resto de Bloques a carga intermedia.

5.2.1 Análisis de los casos

La Tabla 5-3 muestra los 20 casos más críticos para el horizonte de 60 meses de simulación, tanto desde el punto de vista de altos consumos de combustibles líquidos, como de bajas afluencias hidrológicas expresadas en energía primaria. Se aprecia que aunque existe una correlación importante entre estas dos variables (que se puede apreciar en los colores utilizados), no siempre resulta que los casos coincidan en el orden. Por ejemplo, la serie 147 y 152 exhiben el primero y segundo mayor consumo de combustibles y la primera y segunda menor cantidad de aportes hidrológicos. Sin embargo, la serie 136 está de tercera dentro de las 20 más críticas por altos niveles de consumo de combustible, pero no aparece dentro de las 20 más secas (de hecho ocupa el puesto 32). La razón de ser de este comportamiento está en las características de las sequías, las características técnicas de las plantas y embalses, y en el proceso de optimización de la operación.

Por alto consumo de combustible			Por bajos aportes hidrológicos agregados		
Orden	Caso de la simulacion	Consumo de combustible (GBTU)	Orden	Caso de la simulacion	Suma de diferencias de aportes por debajo de la media (GWh)
1	147	213,785	1	147	63,680.09
2	152	192,613	2	152	58,852.09
3	136	184,538	3	193	58,550.09
4	193	151,277	4	40	58,440.89
5	7	148,261	5	7	54,423.99
6	187	123,822	6	36	52,075.99
7	120	116,348	7	182	51,506.79
8	27	96,506	8	85	50,935.19
9	55	96,022	9	27	48,877.09
10	99	91,215	10	64	48,275.19
11	64	86,277	11	39	44,902.19
12	65	81,281	12	12	42,408.09
13	182	79,396	13	79	42,090.09
14	196	78,924	14	82	39,791.79
15	39	78,095	15	10	37,891.09
16	36	77,022	16	120	37,657.19
17	138	75,961	17	16	37,561.49
18	158	74,803	18	142	37,088.29
19	129	74,136	19	99	36,817.69
20	183	73,947	20	53	36,385.59

Tabla 5-3. Veinte primeros casos de la simulación en orden decreciente de criticidad según el consumo de combustible y los aportes hidrológicos.

En consecuencia, para el análisis de la logística de combustibles líquidos conviene centrarse en las series de mayor consumo de combustibles líquidos que en las más secas.

Por otra parte, una pregunta pertinente es si se toma la serie más crítica de las 200 (i.e. la de mayor consumo de combustible líquido) o si se toma la asociada con una “probabilidad de no

excedencia”^{11,12} alta. La probabilidad β de no excedencia conduce a un consumo C_β . Dicha probabilidad se denota por PNSS (iniciales de “probabilidad de no ser superado”) y el consumo correspondiente se denota por C_{PNSS} (ver Figura 5-7).



Figura 5-7. Ilustración del consumo de combustible correspondiente a la PNSS

Para resolver esta inquietud se analizaron los siguientes tres casos: I) el caso de mayor consumo de combustible líquido, ii) caso de una probabilidad de no excedencia del 97.5% y (iii) caso de una probabilidad de no excedencia del 95%. La Tabla 4 presenta los consumos de combustible líquidos correspondientes a los casos asociados con cada probabilidad de no excedencia.

11 Por ejemplo, si la probabilidad de no excedencia es del 95%, entonces el consumo de combustibles real podría exceder con una probabilidad de 0.05 el consumo del caso asociado con dicha probabilidad. O, dicho de otra manera, el consumo real tiene una probabilidad del 95% de que sea inferior.

12 En generación hidroeléctrica se toma la probabilidad de excedencia en razón de que lo crítico está por el lado de la cola izquierda (i.e. aportes bajos) de la distribución de probabilidad.

Casos más críticos	Meses transcurridos desde el inicio		6	12	18	24	30	36	48	60
	Serie		36	36	36	143	136	132	147	147
	Consumo de combustible durante el periodo	GBTU	16,871	23,884	23,884	52,939	80,303	132,267	199,458	213,785
	Consumo promedio diario	b/d	17,166	12,151	8,101	13,466	16,342	22,430	25,369	21,758
	Consumo promedio diario	g/d	720,990	510,346	340,231	565,591	686,355	942,076	1,065,481	913,611
	Consumo de combustible en el mes más crítico	GBTU	6,140	6,140	6,140	12,663	12,663	12,747	12,747	12,747
	Consumo promedio diario	b/d	37,487	37,487	37,487	77,305	77,305	77,822	77,822	77,822
	Consumo promedio diario	g/d	1,574,447	1,574,447	1,574,447	3,246,813	3,246,813	3,268,524	3,268,524	3,268,524
	Consumo del periodo crítico de la serie	GBTU	16,871	23,884	23,884	49,524	80,289	132,253	198,301	203,228
	Duración del periodo crítico	Meses	4	6	6	7	11	17	30	38
	Consumo promedio diario	b/d	25,750	24,302	24,302	43,192	44,560	47,494	40,354	37,597
	Consumo promedio diario	g/d	1,081,484	1,020,692	1,020,692	1,814,056	1,871,538	1,994,763	1,694,880	1,579,081
	Volumen acumulado del periodo crítico		3,089,955	4,374,395	4,374,395	9,070,282	14,704,945	24,222,128	36,318,864	37,221,187
	Viajes de carrotanques	Viajes/día	150	150	150	309	309	311	311	311
	Viajes de carrotanques	Viajes/mes	4,498	4,498	4,498	9,277	9,277	9,339	9,339	9,339
Caso con el 97.5% de no ser superado	Meses transcurridos desde el inicio		6	12	18	24	30	36	48	60
	Serie	NA		67	61	138	85	138	193	7
	Consumo de combustible durante el periodo	GBTU		3,044	5,125	39,105	55,413	73,091	123,542	148,261
	Consumo promedio diario	b/d		1,549	1,738	9,947	11,277	12,395	15,713	15,086
	Consumo promedio diario	g/d		65,053	73,010	417,792	473,618	520,588	659,947	633,594
	Consumo de combustible en el mes más crítico	GBTU		3,044	3,131	11,640	12,663	11,640	12,747	12,747
	Consumo promedio diario	b/d		18,586	19,113	71,065	77,305	71,065	77,822	77,822
	Consumo promedio diario	g/d		780,632	802,735	2,984,720	3,246,813	2,984,720	3,268,524	3,268,524
	Consumo del periodo crítico de la serie	GBTU		3,044	5,125	39,105	52,889	73,091	123,542	126,657
	Duración del periodo crítico	Meses		1	2	6	11	18	29	17
	Consumo promedio diario	b/d		18,586	15,645	39,790	29,353	24,790	26,008	45,485
	Consumo promedio diario	g/d		780,632	657,089	1,671,167	1,232,844	1,041,176	1,092,325	1,910,362
	Volumen acumulado del periodo crítico			557,595	938,699	7,162,146	9,686,630	13,386,554	22,626,741	23,197,253
	Viajes de carrotanques	Viajes/día		74	76	284	309	284	311	311
	Viajes de carrotanques	Viajes/mes		2,230	2,294	8,528	9,277	8,528	9,339	9,339
Caso con el 95% de no ser superado	Meses transcurridos desde el inicio		6	12	18	24	30	36	48	60
	Serie	NA		79	179	136	36	85	158	99
	Consumo de combustible durante el periodo	GBTU		3,452	3,557	28,258	42,522	56,762	72,068	91,215
	Consumo promedio diario	b/d		1,756	1,206	7,188	8,653	9,626	9,166	9,281
	Consumo promedio diario	g/d		73,758	50,663	301,898	363,433	404,291	384,978	389,806
	Consumo de combustible en el mes más crítico	GBTU		3,452	2,106	10,078	8,369	12,663	12,254	12,622
	Consumo promedio diario	b/d		21,074	12,859	61,524	51,093	77,305	74,811	77,057
	Consumo promedio diario	g/d		885,099	540,062	2,584,013	2,145,885	3,246,813	3,142,076	3,236,410
	Consumo del periodo crítico de la serie	GBTU		3,452	3,557	28,258	23,884	52,889	69,023	74,700
	Duración del periodo crítico	Meses		1	2	6	6	11	17	9
	Consumo promedio diario	b/d		21,074	10,856	28,752	24,302	29,353	24,787	50,672
	Consumo promedio diario	g/d		885,099	455,963	1,207,591	1,020,684	1,232,844	1,041,071	2,128,205
	Volumen acumulado del periodo crítico			632,214	651,375	5,175,390	4,374,359	9,686,630	12,641,575	13,681,319
	Viajes de carrotanques	Viajes/día		84	51	246	204	309	299	308
	Viajes de carrotanques	Viajes/mes		2,529	1,543	7,383	6,131	9,277	8,977	9,247

Nota: los cálculos suponen un poder calorífico inferior del combustible de 130,000 BTU/gal

Tabla 5-4. Consumos de combustible para periodos de diferente longitud y diferentes PNSS

La Figura 5-8 resume en forma gráfica los consumos de combustibles líquidos resultantes de considerar los primeros 6, 12, 80, 24, 30, 36, 48 y 60 meses de la simulación contados a partir del mes 1 que corresponde a julio de 2013. En dicha figura se presentan los consumos para distintas PNSS.

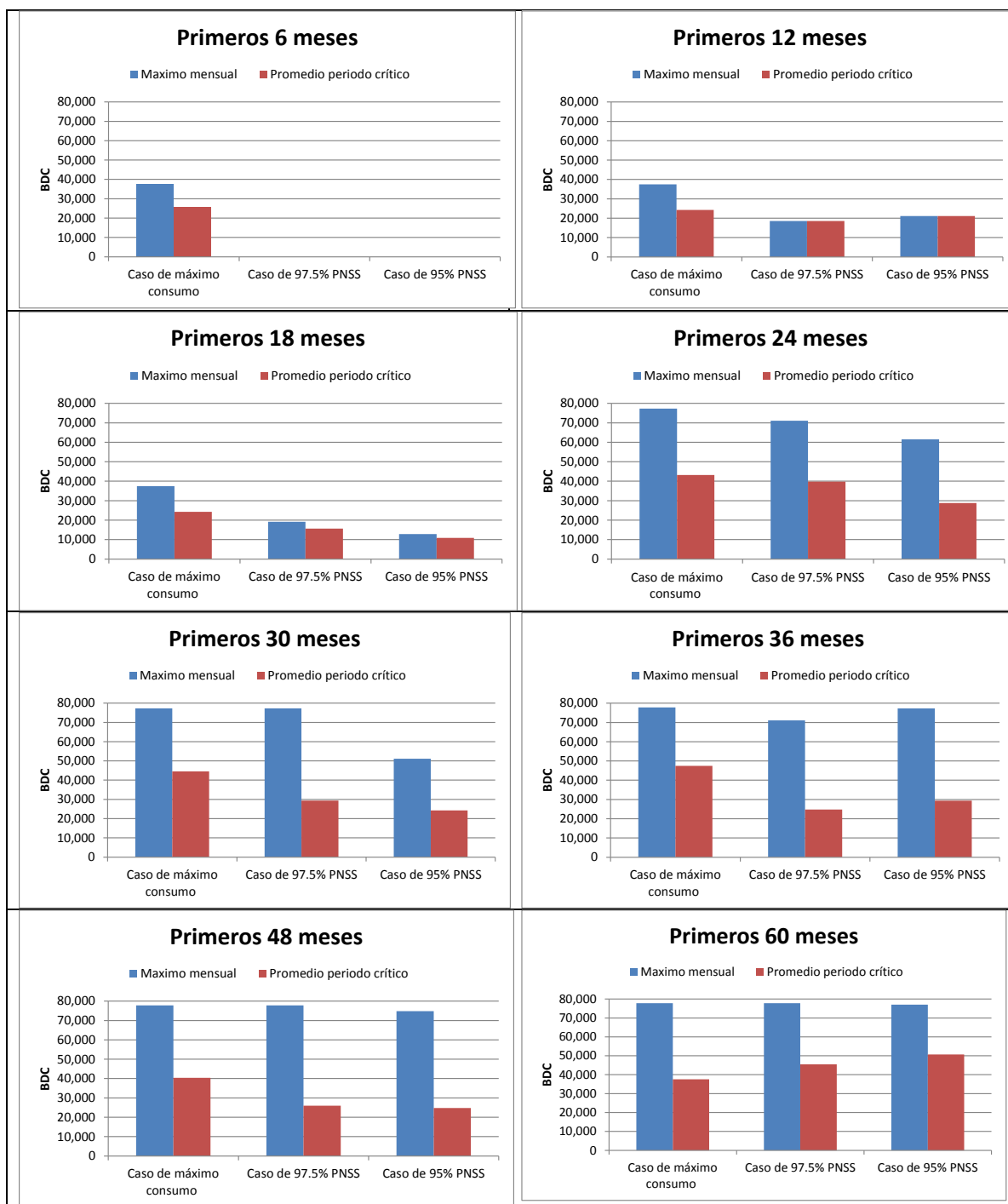


Figura 5-8. Consumos de combustible líquido para los primeros meses de la simulación con diferentes probabilidades de no excedencia

Se aprecia que para los períodos más cortos (primeros 6, 12 y 18 meses) los consumos de combustibles máximos mensuales y promedios del período crítico son los más bajos, indicando un cierto grado de holgura en el balance oferta-demanda del SIN. A partir de períodos más largos (primeros 24 meses hasta 60 meses) los consumos son más altos, indicando que la holgura del balance se estrecha.

También se observa que a medida que se es más exigente en el valor de la probabilidad PNSS, los consumos aumentan, lo cual es lo esperado.

Para seleccionar el análisis del comportamiento de la logística de combustibles líquidos se escogen los casos con PNSS=95%.

5.3 Escenarios de emergencia

Los escenarios de emergencia consideran para todas las plantas que toda la ENFICC se genera con combustible líquido. Fueron solicitados por XM como operador del sistema para examinar situaciones intempestivas de emergencia, como por ejemplo un atentado que aisle una hidroeléctrica importante, o una falla de un gasoducto que alimenta una térmica como el que sucedió en el cruce del gasoducto de Promigas en el Río Magdalena en Barranquilla). De hecho, si por alguna razón falla el gasoducto que alimenta a una planta que tiene respaldada total o parcialmente su OEF con gas natural, entonces se desea saber si la puede generar o no el 100% de su ENFICC con el combustible líquido para el que tiene facilidades de consumirlo. Nótese que los escenarios de emergencia no están relacionados con OEFs.

6 MODELO DE SIMULACIÓN DE LA LOGÍSTICA DEL ABASTECIMIENTO DE COMBUSTIBLES EN COLOMBIA

En este capítulo se presenta una descripción detallada del modelo empleado para el análisis de la logística del abastecimiento de combustibles líquidos para las plantas termoeléctricas. Esto comprende, la conceptualización de la cadena de suministro de combustibles líquidos, las características del modelo y el software seleccionado, el diseño del modelo y sus premisas, y finalmente una breve descripción de la verificación, validación y definición de las corridas que se deben ejecutar para dar respuesta a las preguntas de interés del estudio.

6.1 Descripción de la cadena de suministro de combustibles líquidos a modelar

Con el fin de modelar la logística de combustibles líquidos para plantas termoeléctricas, es necesario comprender cada una de las actividades que se desarrollan en la cadena de abastecimiento de los combustibles líquidos en Colombia. Así mismo, es importante identificar y comprender la infraestructura (“Hardware”), reglas y métodos (“software”) que se utilizan en dichas actividades, para que el modelo que se construya refleje fielmente la dinámica del sistema real que se desea examinar.

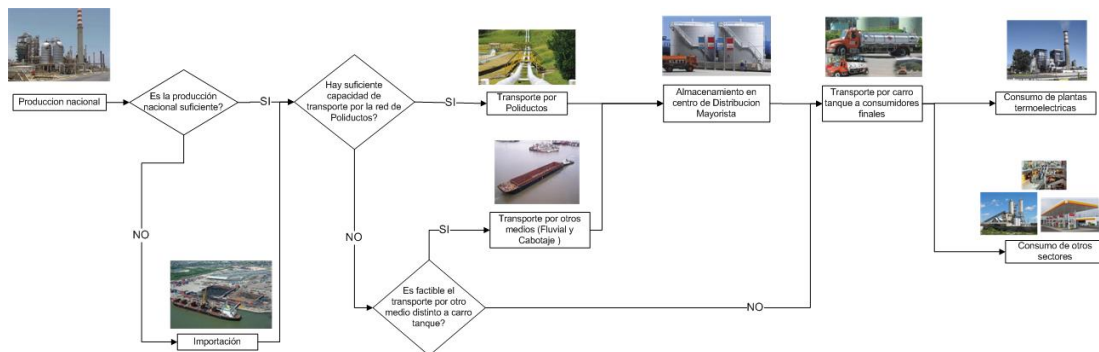


Figura 6-1. Cadena de abastecimiento de combustibles líquidos para termoeléctricas en Colombia

La Figura 6-1 presenta un diagrama de las principales actividades de la cadena de abastecimiento de combustibles líquidos en Colombia, dividido de acuerdo con las actividades, medios y decisiones utilizadas para abastecer a las plantas termoeléctricas con combustible. Como se puede observar, la cadena inicia con la producción nacional de líquidos en las refinerías (Barrancabermeja y Cartagena como principales nodos de producción), seguida por importación por parte de los agentes como Ecopetrol, Biomax, Exxon Mobil, Petromil y Bravo petroleum en los principales puertos del país (Cartagena, Pozos Colorados, Barranquilla y Buenaventura), transporte por los diferentes medios (red de poliductos y parque automotor de carro tanques), almacenamiento en los tanques de los distribuidores mayoristas y finalmente, almacenamiento y consumo de los generadores termoeléctricos y de los otros consumidores regulares (consumos no termoeléctricos, como los del transporte y la industria).

Para suplir la demanda de los consumidores finales, y en especial de las plantas termoeléctricas, diversos agentes de la cadena de abastecimiento deben tomar decisiones sobre importación y medios de transporte a usar. En el caso de la importación de combustibles, esta decisión se hace efectiva siempre que la producción nacional sea inferior a la demanda.

Otra decisión a tomar es el medio de transporte a utilizar. El principal medio de transporte de combustibles hacia el centro de distribución mayorista es la red de poliductos. En caso de que la red de poliductos sea usada a plena capacidad, los volúmenes adicionales de combustibles son transportados por carro tanques desde los centros de distribución mayorista o puertos de importación hasta las plantas termoeléctricas y otros centros de consumo regular. Finalmente, el transporte entre refinerías de algunos excedentes de combustibles pesados se realiza a través de barcazas por el río Magdalena.

El sistema de abastecimiento de combustibles líquidos identificado y descrito en esta sección, es el punto de partida para la formulación del sistema a simular que se describirá detalladamente en las siguientes secciones de este documento.

6.2 Objetivos, características del modelo y software seleccionado

Una vez definido el “hardware” y el “software” que conforman la logística para el abastecimiento de combustibles líquidos, se procede a seleccionar el modelo y software a utilizar que permita simular la logística en detalle. Luego de un análisis comparativo, se concluyó que un modelo de simulación de eventos discretos y pseudo-continuos implementado en el software *Arena versión 14*, es ideal para simular este problema¹³. A diferencia de los modelos de optimización matemática, los modelos de simulación permiten recrear sistemas complejos con un alto grado de precisión, son flexibles a cambios de parámetros y de la topología del sistema; además, permiten la implementación de posibles mejoras y explorar el futuro en poco tiempo y a bajo costo (Kelton et al. 2002) (Verbraeck 2009).

El software *Arena 14*, es un simulador de eventos discretos y pseudo-continuos el cual se caracteriza por simular un sistema en conjunto, por medio de la simulación detallada cada uno de los procesos, operaciones y reglas de decisión que estén contenidos en el sistema a analizar. Cada proceso consta de un nombre, el cual especifica su acción dentro del sistema, y es descrito por 4 conjuntos de variables: entradas del proceso, salidas del proceso, variables de control y recursos. Para dar un ejemplo, la parte superior de la Figura 6-2 presenta el diagrama IDEFo¹⁴ de un proceso cualquiera.

¹³ El estudio diagnóstico de la logística realizado por el CNO en 2009 desarrolló un modelo de programación lineal.

¹⁴ Los diagramas IDEFo son representaciones gráficas estandarizadas para describir la naturaleza de un proceso. Los bloques simulan funciones o acciones y las flechas describen las variables de entrada y salida de un proceso (Verbraeck 2009).

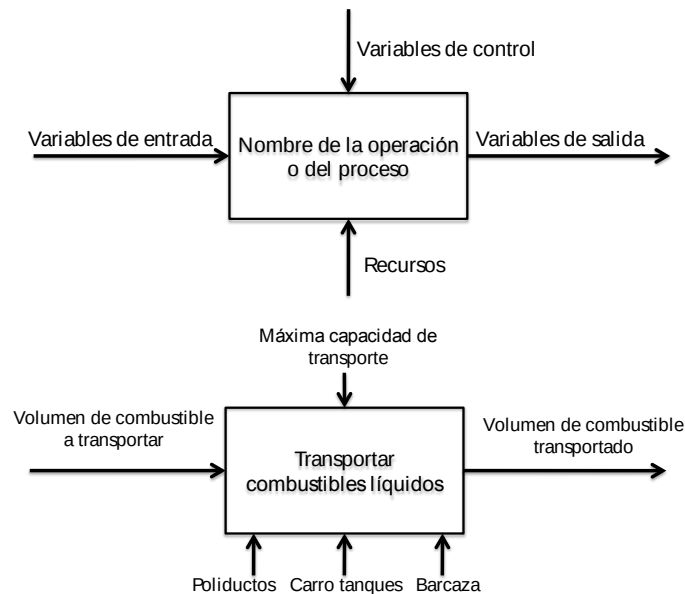


Figura 6-2. Diagrama IDEFo estándar y ejemplo del proceso transportar combustibles líquidos

El ejemplo de la figura anterior describe el proceso de transporte de combustibles líquidos, cuyas variables de entrada y salida respectivamente son el volumen de combustible a transportar y el volumen de combustible transportado. Para ejecutar la acción “Transportar combustibles líquidos” es necesario utilizar los recursos que comúnmente se emplean en el sistema real, que comprenden: la red de poliductos, el parque de carro tanques dedicados al transporte de combustibles y, en el caso de algunos combustibles, las barcazas para transporte fluvial. Debido a que los procesos usualmente tienen restricciones y que los recursos empleados no tienen capacidad infinita, se usan las variables de control. En el caso del ejemplo, la capacidad máxima de transporte de cada recurso es una de las posibles variables de control, pues define el límite de capacidad transportadora de cada uno de los recursos.

El objetivo principal del modelo de simulación es obtener información detallada de cada proceso del sistema, en especial de las siguientes variables:

- Tiempo mínimo, máximo y promedio de ejecución de un proceso específico del sistema (ej. tiempo máximo de transporte por poliducto de un bache de combustible hasta el centro de distribución mayorista)
- Niveles mínimo, máximo y promedio de inventario en tanques del sistema (ej. nivel de inventario promedio en cada una de las plantas termoeléctricas y las plantas de abasto durante el horizonte de simulación)
- Volumen mínimo, máximo y promedio de combustible ingresado a los tanques del sistema (ej. volumen promedio de combustible ingresado en cada una de las plantas termoeléctricas y las plantas de abasto durante el horizonte de simulación)
- Volumen mínimo, máximo y promedio de combustible retirado de los tanques del sistema (ej. volumen promedio de combustible retirado –o consumido- en cada una de las plantas termoeléctricas y las plantas de abasto durante el horizonte de simulación)

- Porcentaje de utilización mínima, máxima y promedio de recursos en cada proceso del sistema (ej. porcentaje promedio de utilización del sistema de poliductos, carro tanques y puertos)

6.3 Premisas y diseño del modelo

Esta sección describe el modelo del sistema adecuado para analizar la logística de combustibles líquidos usados por plantas termoeléctricas en Colombia. El sistema a diseñar, con todas sus variables, se ha programado en el software Arena 14, y se delimita para encontrar una representación conceptual satisfactoria del mismo, debido a que el sistema real es de gran tamaño y complejidad, por todos los elementos que incorpora y la relación entre variables y agentes.

El diseño conceptual del sistema reduce su complejidad al definir fronteras geográficas y las relaciones entre agentes. Se asume que para el abastecimiento de hidrocarburos se utiliza la infraestructura y recursos existentes (y otras variables endógenas) del territorio colombiano, sin tener en cuenta la infraestructura (únicamente las variables exógenas como parámetros constantes) para el abastecimiento de hidrocarburos desde otros países hacia Colombia. Así mismo, se presume que las relaciones de interés a incorporar en el modelo se dan entre los agentes generadores de electricidad (termoeléctricas), distribuidores mayoristas, transportadores de combustibles líquidos, refinadores e importadores. Los efectos causados por otros agentes que demandan combustibles líquidos o intervienen en la cadena de combustibles son tomados como externalidades (variables exógenas o parámetros constantes) y no son modeladas detalladamente.

Para el diseño del modelo se utilizó el diagrama IDEF0 de la Figura 6-3 En este se definen los principales procesos, variables de entrada, variables de salida, variables de control y recursos que hacen parte del sistema de abastecimiento de combustibles líquidos en Colombia. Adicionalmente el diagrama proporciona de manera agregada, la secuencia e interrelación entre los principales procesos y variables del sistema, cuyas definiciones y parámetros se indican a continuación:

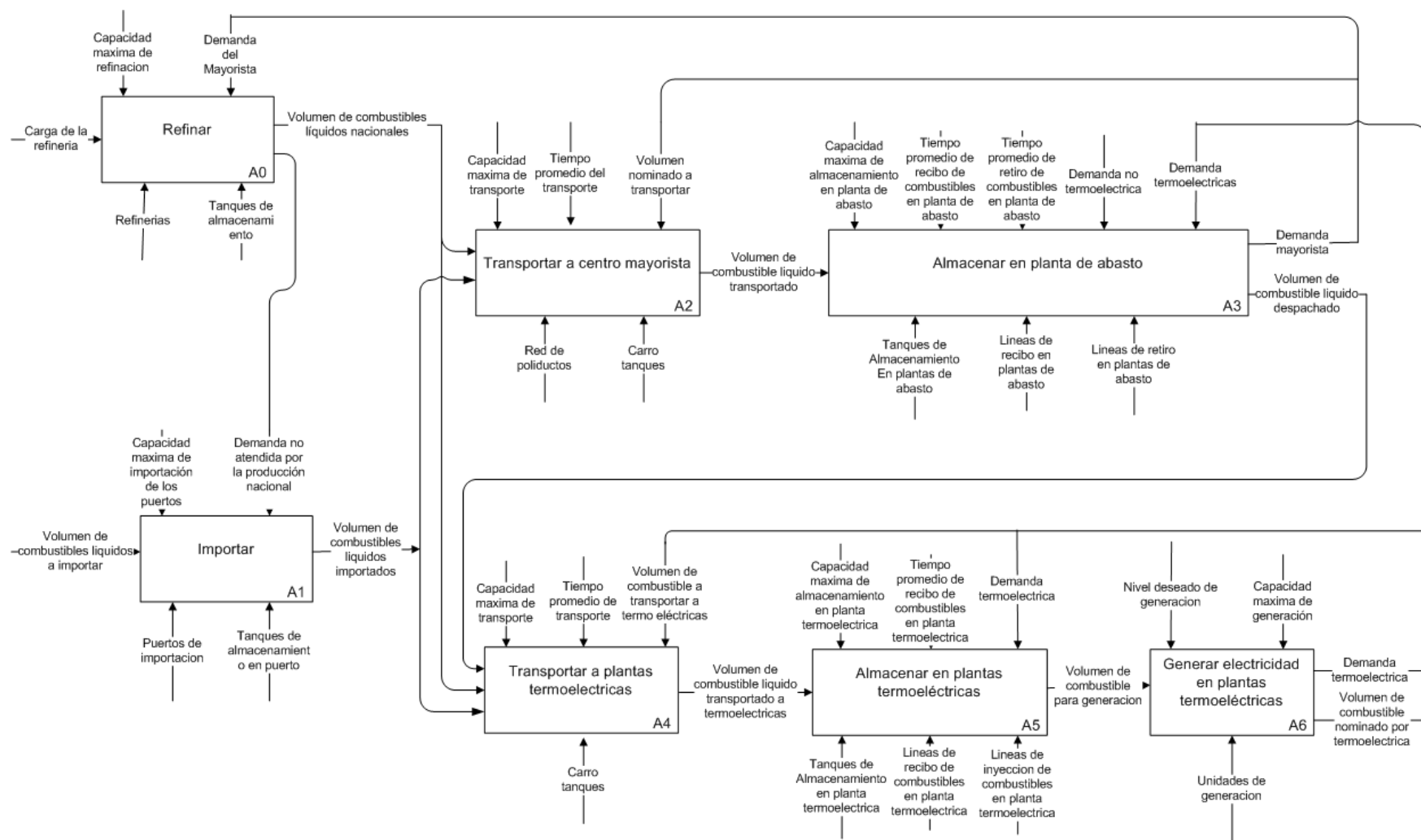


Figura 6-3. Diagrama IDEF0 de los principales procesos modelados del sistema de abastecimiento de combustibles para plantas termoeléctricas en Colombia

6.3.1 Proceso “Refinar”

El proceso refinar se lleva a cabo paralelamente en dos instalaciones las cuales corresponden a la refinería de Barrancabermeja y de Cartagena. Este proceso se modela de acuerdo a las siguientes variables:

Variables de entrada

- *Carga de la refinería $_{i,t}$* : Es el volumen de producción de combustibles de la refinería i en el instante t , la cual esta expresada en *Barriles/día*
- La carga de la refinería varia en el tiempo de acuerdo a la información reportada por Ecopetrol

Variables de salida

- *Volumen de combustibles líquidos nacionales $_{i,j,t}$* : Es el volumen producido del combustible j en la refinería i en el instante t , el cual esta expresado en *Barriles*
- *Demanda no atendida por la producción nacional $_{i,j,t}$* : Es el volumen de combustible j demandado a nivel nacional en la refinería i que no puede ser atendido por la producción nacional y debe ser importado. Esta variable esta expresada en *Barriles*
- Los combustibles modelados son: $j = 1$ corresponde a FO#2, $j = 2$ corresponde a JETA1, $j = 3$ corresponde a FO#6 y $j = 4$ corresponde a Otros.

Variables de recurso

- *Refinería $_i$* : Son las instalaciones físicas de refinación, donde $i = 1$ es Barrancabermeja e $i = 2$ es Cartagena
- *Tanques de almacenamiento $_{i,j}$* : Son los tanques de almacenamiento en la refinería i asociados al producto j
- A pesar de que existen más de dos refinerías, se modelaron solo dos pues representan el 99% de la producción nacional.

Variables de control

- *Capacidad máxima de refinación $_{i,j,t}$* : Es la capacidad máxima operativa de producción del combustible j en la refinería i para el periodo t . Esta variable está dada en *Barriles/día*
- *Demanda mayorista $_{k,i,j,t}$* : Son las nominaciones realizadas por el mayorista k del producto j en la refinería i (desde donde es posible abastecerlo) para el mes t . Esta variable esta expresada en *Barriles* (es una de las variables de salida del proceso “Almacenar en planta de abasto”)

Reglas operativas del proceso

La producción de combustibles líquidos se modeló con una resolución diaria y una vez producidos son almacenados en tanques de almacenamiento dedicados para cada producto j en cada una de las refinerías i . Los combustibles son retirados del tanque a medida que se atiendan los pedidos (nominaciones) de los distribuidores mayoristas que atienden a las plantas termoeléctricas y la demanda regular. Una premisa del modelo, basada en las operaciones reales, consiste en realizar las nominaciones en el mes $t - 1$ para dar espacio a que la logística responda y así el combustible nominado pueda ser retirado de las plantas termoeléctricas o de las plantas de abasto en el mes t .

6.3.2 Proceso “Importar”

La importación de combustibles se presenta cuando la producción nacional de combustibles en determinado periodo no es suficiente para atender la demanda total (demanda termoeléctrica y no termoeléctrica). El cual se realiza a través de los puertos de importación más importantes del país, ubicados en Santa Marta, Barranquilla, Cartagena y Buenaventura. Este proceso se modela a partir de las siguientes variables:

Variables de entrada

- *Volumen de combustibles líquidos a importar $_{l,j,t}$* : Es el volumen de combustible j a importar por el puerto l en el periodo t . Esta expresado en *Barriles*

Variables de salida

- *Volumen de combustibles líquidos importado $_{l,j,t}$* : Es el volumen de combustible j efectivamente importado por el puerto l en el periodo t . Esta expresado en *Barriles*.

Variables de recurso

- *Puertos de importación $_l$* : Son los puertos de importación existentes a través de los cuales se pueden importar combustibles líquidos, y en donde $l = 1$ corresponde al puerto de Pozos Colorados, $l = 2$ al puerto de Cartagena, $l = 3$ al puerto de Buenaventura, $l = 4$ al puerto de Cartagena contratado por Biomax, $l = 5$ al puerto en Mamonal propiedad de Exxon Mobil, $l = 6$ al puerto de Barranquilla propiedad de Petromil y $l = 7$ al puerto de Argos en Barranquilla
- *Tanques de almacenamiento en puerto $_{l,j}$* : Son los tanques de almacenamiento del combustible j en el puerto l .
- Se contemplaron los principales puertos por los que actualmente o en el futuro se importan, se han importado o se importarán combustibles líquidos. La capacidad de los tanques de almacenamiento de los productos j para cada puerto l , así como las tasas de recibo y retiro de combustibles fueron suministradas por los agentes de la cadena y los generadores en los documentos de logística y fueron parámetros de entrada para el modelo.

Variables de control

- *Capacidad maxima de importacion de los puertos $_{l,j,t}$* : Corresponde a la capacidad máxima de importación en el puerto l del combustible j para el periodo t . Esta variable esta expresada en *Barriles/dia*
- *Demanda no atendida por la produccion nacional $_{i,j,t}$* : Es el volumen de combustible j demandado a nivel nacional en la refinería i que no se puede atendido por la producción nacional y debe ser importado *Barriles* (Es una de las variables de salida del proceso “refinar”)

Reglas operativas del proceso:

Como premisa, el modelo siempre agota la producción nacional de combustibles. La decisión de importar, así como el volumen exacto de combustible a importar para las

termoeléctricas se realiza en el mes $t - 1$, y toma entre 17 a 30 días de acuerdo con los datos reportados por los mayoristas que atienden las plantas termoeléctricas.

6.3.3 Proceso “transportar al centro mayorista”

Este proceso se inicia con la nominación de combustibles de los mayoristas al productor o importador. Al tener el volumen de combustible nominado en el puerto o la refinería (salidas de los procesos “refinar” o “importar”) se procede a la asignación de capacidad de transporte por los poliductos como medio de transporte principal. El proceso evalúa si la capacidad de transporte por poliductos es suficiente o no. De no serlo, el combustible se despacha a las plantas de abasto a través de carro tanques. Este proceso se modela con las siguientes variables:

Variables de entrada

- *Volumen de combustibles líquidos nacionales* $_{i,j,t}$: Es el volumen producido del combustible j en la refinería i en el instante t , el cual está expresado en *Barriles* (es la variable de salida del proceso “refinar”)
- *Volumen de combustibles líquidos importados* $_{l,j,t}$: Es el volumen de combustible j efectivamente importado por el puerto l en el periodo t . Está expresado en *Barriles* (es la variable de salida del proceso “importar”)

Variables de salida

- *Volumen de combustible líquido transportado* $_{j,m,n,t}$: Es el volumen del combustible j que es transportado por poliducto o carro tanques desde el punto de refinación o importación m hasta la planta de abasto n para el periodo t . Esta variable está expresada en *Barriles*.

Variables de recurso

- *Red de poliductos* $_p$: Corresponde a cada tramo p de la red nacional de poliductos que transportan combustibles líquidos refinados (diferentes al petróleo). Donde $p = 1, 2 \dots 23$ y para todo p existe una conexión a las plantas de abasto n .
- *Carro tanques* $_j$: Corresponde al parque automotor de carro tanques de capacidad de 10,500 Gl que están dedicados al transporte de combustibles j .
- La capacidad de cada tramo p de la red de poliductos fue suministrada por CENIT y fueron parámetros de entrada para el modelo.

Variables de control

- *Capacidad máxima de transporte* $_{j,t}$: Se refiere al volumen máximo de combustible j que se puede transportar por medio de la red de poliductos y carro tanques. Esta variable está expresada en *Barriles*
- *Tiempo promedio de transporte* $_{j,m,n}$: Es el tiempo que dura mover cierto volumen de combustible j (un bache) desde el punto de importación o refinación m hasta la planta

de abasto n por medio de los distintos recursos como la red de poliductos, o carro tanques. Esta variable esta expresada en $horas$.

- *Volumen de combustible a transportar* $_{j,m,n,t}$: Es el volumen del combustible j que ha sido nominado por el distribuidor mayorista y debe ser transportado por poliducto o carro tanques desde el punto de refinación o importación m hasta la planta de abasto n para el periodo t . Esta variable esta expresada en *Barriles*.

Reglas operativas del proceso:

Como premisa, el modelo da prioridad de transporte por el sistema de poliductos a los combustibles cuyo destino final es el consumo no termoeléctrico. De haber excedentes de capacidad de transporte por poliductos, son asignados al transporte de combustibles para consumo termoeléctrico. Adicionalmente, se modelaron carro tanques con capacidad máxima de transporte fija (250 B) y baches de combustible fijos (10,500 Gl)

6.3.4 Proceso “almacenar en planta de abasto”

Este proceso comienza luego del transporte por poliductos o por carro tanques. Consiste en almacenar el combustible nominado y transportado desde las refinerías o los puertos de importación. Este proceso se modela con las siguientes variables:

Variables de entrada

- *Volumen de combustible liquido transportado* $_{j,m,n,t}$: Es el volumen del combustible j que es transportado por poliducto o carro tanques desde el punto de refinación o importación m hasta la planta de abasto n para el periodo t . Esta variable esta expresada en *Barriles* (es la variable de salida del proceso “Transportar a centro mayorista”)

Variables de salida

- *Demanda mayorista* $_{k,i,j,t}$: Son las nominaciones realizadas por el mayorista k del producto j en la refinería i (desde donde es posible abastecerlo) para el mes t . Esta variable esta expresada en *Barriles*.
- *Volumen de combustible liquido despachado* $_{j,n,k,q,t}$: Es el volumen del combustible j despachado desde la planta de abasto n del mayorista k con destino al consumidor final q en el periodo t . Esta variable esta expresada en *Barriles*. El subíndice q barre el conjunto de las 9 plantas termoeléctricas que se consideraron en el modelo (Termoemcali, Termovalle, Termodorada, Termocentro, Termosierra, Central Cartagena, Termocandelaria, Barranquilla 3 y 4 y Termoflores 1y 4) y los consumidores finales no termoeléctricos.

Variables de recurso

- *Tanques de almacenamiento en planta de abasto* $_{n,k,j}$: Son los tanques de almacenamiento en la planta de abasto n del distribuidor mayorista k para cada combustible j .

- *Lineas de recibo de combustibles en planta de abasto $_{n,k,j}$* : Es el número de líneas o puntos de recibo en la planta de abasto n del distribuidor mayorista k para llenar los tanques asociados al combustible j
- *Lineas de retiro de combustibles en planta de abasto $_{n,k,j}$* : Es el número de líneas o puntos de conexión de carro tanques en la planta de abasto n del distribuidor mayorista k para retirar combustible los tanques asociados al combustible j

Se contemplaron las principales plantas de abasto n para los combustibles j de interés. La capacidad de los tanques de almacenamiento agregada de los productos j para cada planta de abasto n , así como las tasas de recibo y retiro de combustibles fueron suministradas por CENIT y las termoeléctricas y fueron parámetros de entrada para el modelo.

Variables de control

- *Capacidad maxima de almacenamiento en planta de abasto $_{j,n,k,t}$* : Se refiere al volumen máximo de combustible j que se puede almacenar en la planta de abasto n del distribuidor mayorista k en el periodo t . Esta variable esta expresada en *Barriles*
- *Tiempo promedio de recibo de combustibles en planta de abasto $_{j,n,k}$* : Es el tiempo típico que dura recibir en los tanques cierto volumen de combustible j (un bache) en la planta de abasto n del distribuidor mayorista k . Esta variable está expresada en *horas*.
- *Tiempo promedio de retiro de combustibles en planta de abasto $_{j,n,k}$* : Es el tiempo típico que dura llenar un carro tanque con combustible j en la planta de abasto n del distribuidor mayorista k . Esta variable esta expresada en *horas*.
- *Demanda no termoelectrica $_{j,r,t}$* : Es la demanda de combustible j con destino al sector no termoeléctrico en la zona r para el día t . Está expresada en *Barriles*. El subíndice r barre el conjunto comprendido de cinco zonas (Zona Bogotá, Zona Central, Zona Sur, Zona Oeste, Zona Este y Costa Norte)
- *Demanda termoelectrica $_{j,s,t}$* : Es la demanda de combustible j con destino a la termoeléctrica s para el día t . Está expresada en *Barriles* (es la variable de salida del proceso “Generar electricidad en plantas termoeléctricas”). El subíndice s es un subconjunto de q conformado únicamente por las 9 plantas termoeléctricas (Termoemcali, Termovalle, Termodorada, Termocentro, Termosierra, Central Cartagena, Termocandelaria, Barranquilla 3 y 4 y Termoflores 1y 4)

Reglas operativas del proceso:

Como premisa el modelo considera plantas de abasto agregadas por tipo de combustible y por distribuidor mayorista. Esto se debe a que la información sobre capacidad de almacenamiento en cada planta de abasto entregada por los agentes de la cadena es agregada.

6.3.5 Proceso “transportar a plantas termoeléctricas”

En este proceso, el volumen de combustible nominado por las plantas térmicas es transportado desde los puertos de importación o refinerías (salidas de los procesos “refinar” o “importar”) a las termoeléctricas a través de carro tanques. Este proceso se modela con las siguientes variables:

Variables de entrada

- *Volumen de combustibles líquidos nacionales* $_{i,j,t}$: Es el volumen producido del combustible j en la refinería i en el instante t , el cual esta expresado en *Barriles* (es la variable de salida del proceso “refinar”)
- *Volumen de combustibles líquidos importado* $_{l,j,t}$: Es el volumen de combustible j efectivamente importado por el puerto l en el periodo t . Esta expresado en *Barriles*. (es la variable de salida del proceso “importar”)
- *Volumen de combustible líquido despachado* $_{j,n,k,s,t}$: Es el volumen del combustible j despachado desde la planta de abasto n del mayorista k con destino a la planta termoeléctrica s en el periodo t . Esta variable esta expresada en *Barriles*. (es una de las variables de salida del proceso “Almacenar en planta de abasto”)

Variables de salida

- *Volumen de combustible líquido transportado a termoelectricas* $_{j,m,n,k,s,t}$: Es el volumen del combustible j que es transportado por carro tanques desde el punto de refinación o importación m , o desde la planta de abasto n del mayorista k hasta la termoeléctrica s para el periodo t . Esta variable esta expresada en *Barriles*.

Variables de recurso

- *Carro tanques* $_j$: Corresponde al parque automotor de carro tanques de capacidad del orden de 10,500 Gl que están dedicados al transporte de combustibles j .

Variables de control

- *Capacidad maxima de transporte* $_{j,t}$: Se refiere al volumen máximo de combustible j que se puede transportar por medio de carro tanques. Esta variable esta expresada en *Barriles*
- *Tiempo promedio de transporte* $_{j,m,n}$: Es el tiempo que dura el mover cierto volumen de combustible j (un bache) desde el punto de importación o refinación m hasta la planta de abasto n por medio de los distintos recursos como la red de poliductos, o carro tanques. Esta variable esta expresada en *horas*.
- *Volumen de combustible a trasportar a termoelectricas* $_{j,s,m,n,k,t}$: Es el volumen del combustible j que debe ser transportado por carro tanques desde el punto de refinación o importación m , o desde la planta de abasto n del mayorista k hasta la termoeléctrica s para el periodo t . Esta variable esta expresada en *Barriles*.

Reglas operativas del proceso:

Como premisa, el modelo siempre busca transportar combustibles desde los puertos o plantas de abasto más cercanas a la termoeléctrica, con el fin de minimizar el tiempo de transporte y agilizar la logística. Adicionalmente, se modelaron carro tanques con capacidad máxima de transporte fija (250 B) y velocidades promedio de 40 km/h.

6.3.6 Proceso “almacenar en termoeléctricas”

Este proceso comienza luego del transporte de combustible por carro tanques hacia las termoeléctricas. Consiste en recibir y almacenar el combustible nominado en tanques propios de la planta térmica. Este proceso se modela con las siguientes variables:

Variables de entrada

- *Volumen de combustible liquido transportado a termoelectricas* j,m,n,k,s,t : Es el volumen del combustible j que es transportado por carro tanques desde el punto de refinación o importación m , o desde la planta de abasto n del mayorista k hasta la termoeléctrica s para el periodo t . Esta variable esta expresada en *Barriles*. (es la variable de salida del proceso “Transportar a plantas termoeléctricas”)

Variables de salida

- *Volumen de combustible liquido para generacion* j,s,t : Es el volumen del combustible j despachado desde el tanque de almacenamiento de la termoeléctrica s con destino a las unidades de generación en el periodo t . Esta variable esta expresada en *Barriles*

Variables de recurso

- *Tanques de almacenamiento en planta termoelectrica* s,j : Son los tanques de almacenamiento en la planta termoeléctrica s del combustible j .
- *Lineas de recibo de combustibles en planta termoelectrica* s,j : Es el número de líneas o puntos de recibo en la planta termoeléctrica s para llenar los tanques asociados al combustible j
- *Lineas de inyeccion de combustibles en planta termoelectrica* s,j : Es el número de líneas en la planta termoeléctrica s para inyectar combustible desde los tanques asociados al combustible j hacia las unidades de generación

Variables de control

- *Capacidad maxima de almacenamiento en planta termoelectrica* j,s,t : Se refiere al volumen máximo de combustible j que se puede almacenar en la planta termoeléctrica s en el periodo t . Esta variable esta expresada en *Barriles*
- *Tiempo promedio de recibo de combustibles en planta termoelectrica* j,s : Es el tiempo típico que dura el recibir en los tanques un carro tanque con combustible j en la planta termoeléctrica s . Esta variable esta expresada en *horas*.

- *Demanda termoelectrica j,s,t* : Es la demanda de combustible j con destino a la termoeléctrica s para el día t . Esta expresada en *Barriles* (es la variable de salida del proceso “Generar electricidad en plantas termoeléctricas”)

Reglas operativas del proceso:

Como premisa, el modelo simula el recibo de carro tanques en las plantas térmicas, y los descarga si, y solo si, el tanque en la termoeléctrica no está lleno. Adicionalmente, una vez carro tanque descarga todo el volumen en la planta termoeléctrica es liberado (por ser un recurso) para que sea usado en el sistema por cualquier planta que lo necesite.

6.3.7 Proceso “generar electricidad en plantas termoeléctricas”

Este proceso comienza luego de almacenar el combustible en la planta termoeléctrica. Consiste en retirar el combustible de los tanques de la termoeléctrica, e inyectar el combustible demandado de acuerdo a la cantidad de electricidad que se ordena generar a la planta (valores tomados de los escenarios de generación suministrados por XM). Este proceso se modela con las siguientes variables:

Variables de entrada

- *Volumen de combustible liquido para generacion j,s,t* : Es el volumen del combustible j despachado desde el tanque de almacenamiento de la termoeléctrica s con destino a las unidades de generación en el periodo t . Esta variable está expresada en *Barriles*

Variables de salida

- *Demanda termoelectrica j,s,t* : Es la demanda de combustible j con destino a la termoeléctrica s para el día t . Está expresada en *Barriles*. Está directamente asociada al nivel de generación que sea requerido de cada planta (ver escenarios de generación de XM)
- *Volumen de combustible nominado por la termoelectrica j,s,t* : Es la cantidad de combustible j nominado por la planta termoeléctrica s para el mes t (el cual es consumido en el mes $t + 1$). Esta variable está expresada en *Barriles*

Variables de recurso

- *Unidades de generacion s,j* : Son las unidades de generación de electricidad propias de la planta termoeléctrica s que consumen combustible j .

Variables de control

- *Nivel deseado de generacion s,j,t* : Se refiere a la cantidad de electricidad (en MWh) a generar por la planta s utilizando combustible j en el día t . Esta variable está expresada en *MWh*
- *Capacidad maxima de generacion s,j,t* : Se refiere a la cantidad máxima de electricidad (en MWh) que puede generar la planta s utilizando combustible j en el día t . Esta variable esta expresada en *MWh*.

Reglas operativas del proceso:

Como premisa, el modelo incluye un nodo de racionamiento en caso de que los tanques de las plantas termoeléctricas no tuvieran el inventario de combustible suficiente para generar la energía requerida.

6.4 Validación del modelo

Una vez programado el modelo en el software Arena 14, se procede a verificar su correcta programación por medio de la opción verificación automática que está incluida en el paquete. Al ver que no se presentan errores de programación se procede a la validación.

La validación se realiza por medio de un proceso de calibración. Inicialmente se corre el modelo para simular la operación del sistema actual de abastecimiento de combustible. Esto incluye únicamente la demanda de combustibles con destino no termoeléctrico y se corre el modelo para un horizonte de un año. A partir de esto se toman estadísticas sobre las principales variables como:

- Racionamiento de la demanda no termoeléctrica de combustibles en todas las zonas
- Niveles en los tanques de las plantas de abasto
- Utilización de carro tanques
- Utilización de la red de poliductos
- Utilización de los puertos

Las estadísticas resultantes del modelo se compararon con la información suministrada por los agentes de la cadena relativa a la operación real del sistema de abastecimiento de combustibles líquidos. Del análisis se concluyó que las variables asociadas a las nominaciones de combustibles con destino a la demanda no termoeléctrica y la frecuencia de envío de los baches a las plantas de abasto, tienen un impacto significativo. Por esta razón, se calibraron estos dos parámetros y así se redujeron a valores no significativos las diferencias entre los resultados arrojados por el modelo y los datos sobre la operación del sistema real.

Con el modelo validado y calibrado, se procede a correr el modelo para los diferentes escenarios de generación termoeléctrica. Los casos corridos y sus características se describen en el anexo de resultados detallados.

Finalmente, en el Anexo 4 se ilustra los módulos del modelo programado en el software Arena 14 y la Figura 6-4 muestra el mímico dinámico o animación del modelo programado.

7 DIAGNÓSTICO DE LA LOGÍSTICA DEL ABASTECIMIENTO DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA

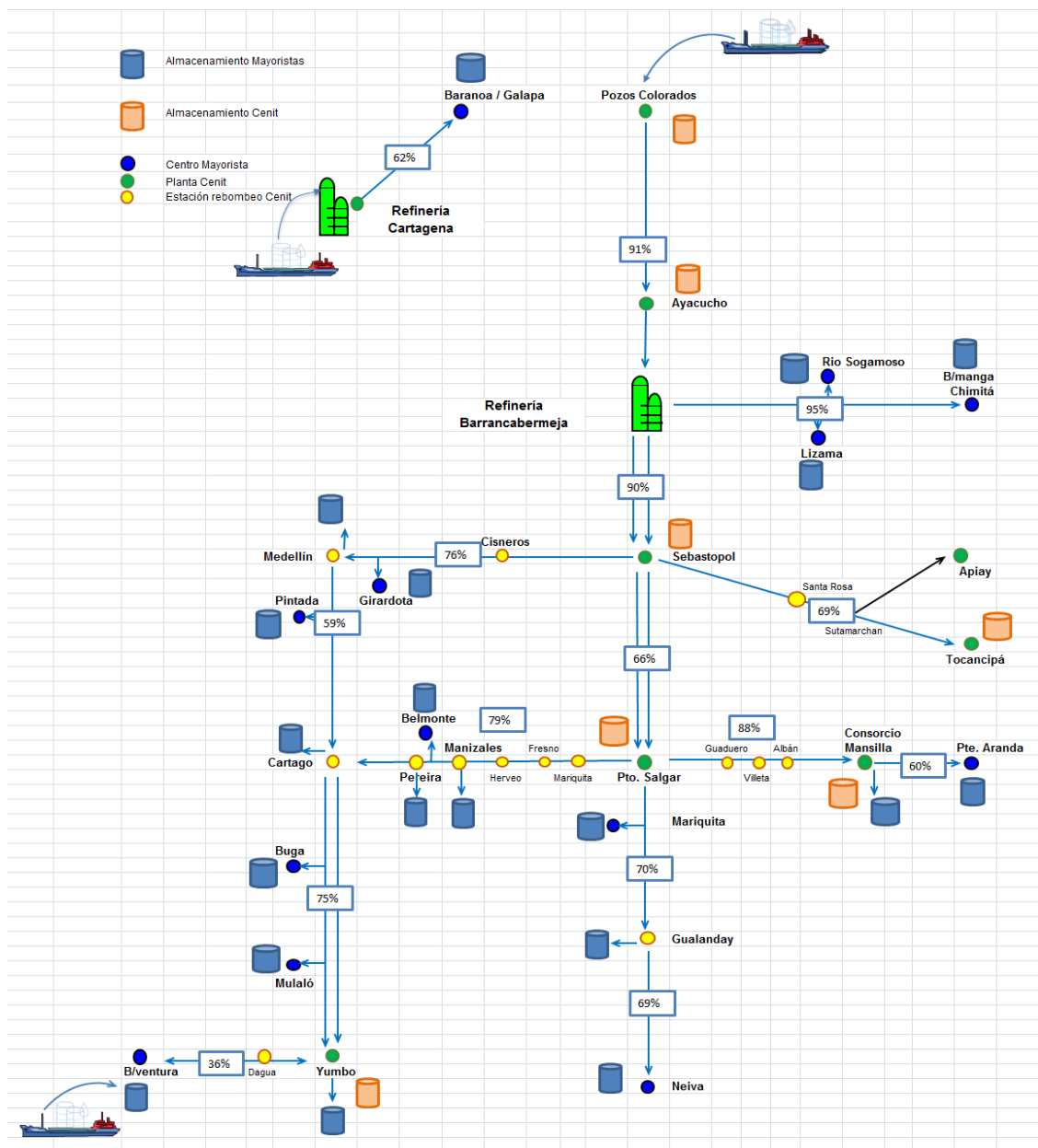
A continuación se presentan los resultados del análisis del comportamiento de la logística de la cadena de abastecimiento de combustibles líquidos para atender las demandas termoeléctricas bajo los diferentes escenarios de generación formulados.

7.1 Situación actual

Con ocasión de la Reunión No. 97 del CACSSE en agosto de 2013, ECOPETROL anunció que su sistema de abastecimiento de FO#2 está copado y que por lo tanto es necesario importar en el futuro inmediato todo el FO#2 requerido por las termoeléctricas, por puertos diferentes a los de su propiedad (Cartagena y Pozos Colorados), y de transportarlo por carro tanque debido a que el sistema de poliductos de CENIT está saturado (con excepción del poliducto Buenaventura-Yumbo que tiene capacidad disponible).

Sin embargo, ECOPETROL ofreció todo su conocimiento y habilidades como importador para facilitar y apoyar el abastecimiento del FO#2 requerido por las termoeléctricas. El alcance del apoyo de ECOPETROL consiste en gestionar la compra, el transporte marítimo y la entrega del combustible en el muelle indicado por el cliente (distribuidor mayorista). El distribuidor mayorista se encarga del proceso de nacionalización y demás trámites para internar el producto, además de disponer del muelle de descargue y el almacenamiento en puerto y contratar el transporte (principalmente por carro tanque) hasta el sitio de la termoeléctrica.

La Figura 7-1 presenta información de la utilización actual de la red de poliductos, así como las capacidades de transporte excedentarias.



Fuente: CENIT

Figura 7-1. Utilización red de poliductos – Excedentes de Transporte en demanda regular (demanda no termoeléctrica).

Estos anuncios de ECOPETROL dan una pista examinar con detenimiento los eslabones clave de la logística de la cadena de abastecimiento de combustibles líquidos para las termoeléctricas, los cuales son: i) los puertos de importación alternativos a los de ECOPETROL, en razón de que el FO#2 debe ser importado por puertos diferentes a los de esta compañía, y ii) el transporte por carretera (que implica disponibilidad suficiente de carro tanques y de vías), ya que, con excepción del poliducto Buenaventura-Yumbo, el sistema de CENIT no tiene capacidad para transportar las demandas de la termoeléctricas.

7.2 Generación termoeléctrica para los distintos escenarios - Simulaciones del SIN con el SDDP

La Figura 7-2 muestra la generación de las plantas termoeléctricas con probabilidad de no ser superada (PNSS) del 95% consumiendo combustibles líquidos, para cada uno de los escenarios del caso estocástico analizados. Por ejemplo, para el escenario de 60 meses (curva celeste), la generación corresponde al caso hidrológico de la corrida estocástica del SDDP de 200 casos independientes, cuya generación termoeléctrica para los 60 meses tiene una PNSS del 95%. Este caso hidrológico conduce a que en los meses cercanos a marzo de 2017 tenga un pico de generación térmica con líquidos superior a 41 GWh/d, y que posteriormente (comenzando en noviembre de 2017) tenga un período prolongado de generación térmica con líquidos de nivel importante, alcanzando cerca de 37 GWh/d en el mes de mayor generación.

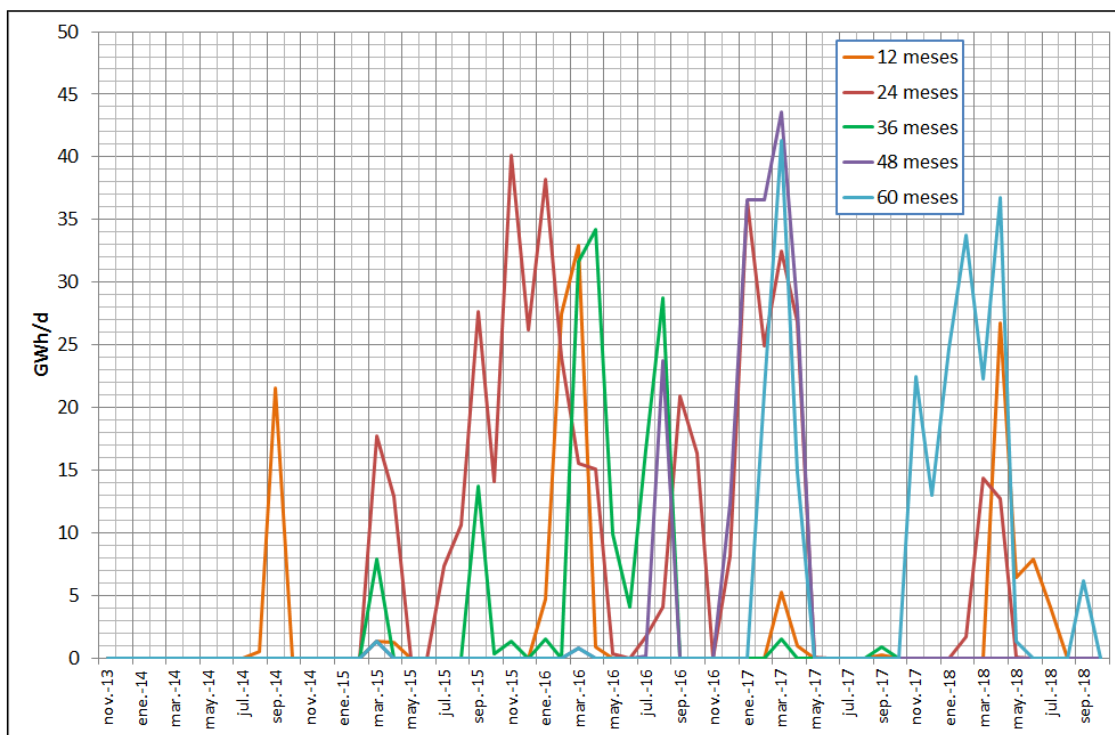


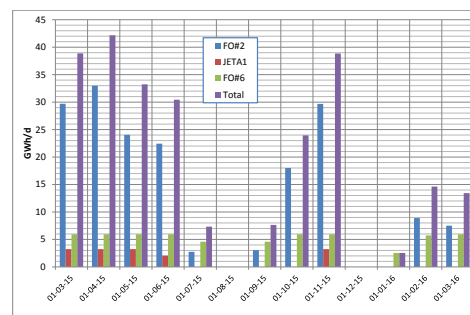
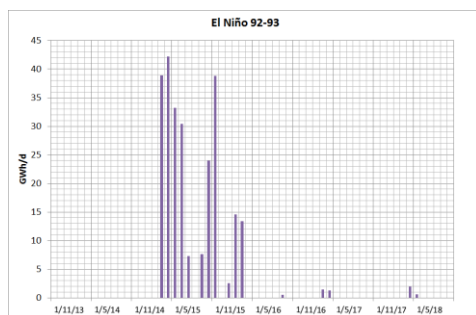
Figura 7-2. Generación termoeléctrica con combustibles líquidos. Casos estocásticos.

Se aprecia que para el horizonte de 12 meses (i.e. para el próximo año de noviembre de 2013 a octubre de 2014 coloreado de naranja) el mes crítico, esto es, el de mayor generación con líquidos, es septiembre de 2014 y el período crítico, es decir, las secuencia de meses con despacho termoeléctrico importante con líquidos, es de dos meses (agosto y septiembre de 2014), alcanzando un máximo de generación termoeléctrica con líquidos de cerca de 24 GWh/d.

De otra parte, se observa que los valores más altos de generación termoeléctrica con líquidos serían del orden de 43 GWh/d en el escenario de 48 meses.

De otra parte, la Figura 7-3 muestra en la parte superior las generaciones de energía eléctrica (en GWh/día) de las plantas termoeléctricas consumiendo combustibles líquidos para el escenario de ocurrencia de El Niño 91-92 y la inferior para El Niño 97-98, provenientes de la corrida respectiva del SDDP. La parte izquierda muestra las cifras agregadas y la derecha desagregadas por combustible.

El Niño
91-92



El Niño
97-98

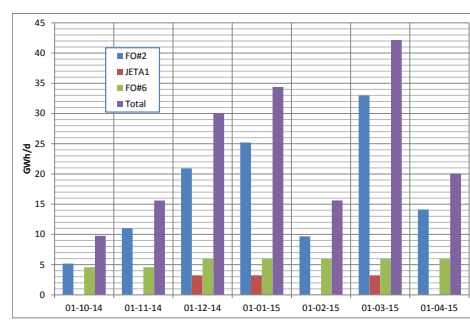
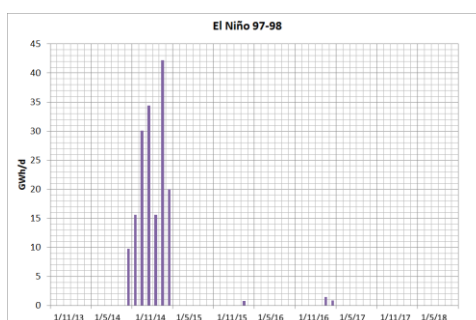


Figura 7-3. Generación termoeléctrica con combustible líquido. Caso 1 y 2.

Se aprecia que las generaciones termoeléctricas con líquidos mayores están del orden de los 42 GWh/d en promedio para el mes más crítico entre marzo y abril de 2015, pero los despachos importantes de estas plantas se iniciarían en septiembre u octubre de 2014 (recuérdese que para los dos escenarios se supone la ocurrencia de un Niño iniciando en 2014).

7.3 Variables de interés en la logística de combustibles líquidos

A través del modelo de simulación desarrollado y descrito en el Capítulo 6, se analizó tanto el “hardware” como el “software” de la logística de combustibles líquidos utilizada para abastecer tanto la demanda no termoeléctrica como la de las plantas termoeléctricas. En esta sección se presenta una síntesis de los resultados más importantes arrojados por el modelo, concentrando la atención en la importación, el transporte por poliductos y carro tanques, el almacenamiento mayorista y el almacenamiento y consumo de combustibles en las termoeléctricas. En especial se observan los resultados medidos a través de las siguientes variables:

- *Termoeléctricas:*
 - Evolución nivel en los tanques de las termoeléctricas
 - Volúmenes de combustible ingresado a los tanques de las termoeléctricas
 - Volúmenes de combustible retirado de los tanques de las termoeléctricas
- *Plantas de abasto:*
 - Evolución nivel agregado en los tanques de las plantas de abasto
 - Volúmenes de combustible agregado ingresado a los tanques de las plantas de abasto
 - Volúmenes de combustible agregado retirado de los tanques de las plantas de abasto
- *Transporte:*
 - Utilización de carro tanques

- Puertos asociados a termoeléctricas:
 - Evolución nivel en los tanques de los puertos asociados a termoeléctricas
 - Volúmenes de combustible ingresado (importado) a los tanques de los puertos asociados a termoeléctricas
 - Utilización de los puertos

Este análisis toma como base la información descrita y analizada en los capítulos anteriores.

7.4 Resultados para los escenarios de escasez hidrológica

A continuación se presentan los resultados más relevantes de los análisis realizados para determinar la capacidad de la logística del abastecimiento de combustibles líquidos en Colombia para atender la demanda nacional de los combustibles líquidos utilizados para la generación termoeléctrica, cuando por condiciones de sequía se requieren despachos significativos de las centrales que los pueden consumir. En el Anexo 5 se presentan los respectivos resultados detallados.

7.4.1 Consumo y racionamiento

La Tabla 7-1 presenta los resultados para el mes crítico y para el período crítico del consumo de combustibles líquidos en las termoeléctricas. El mes crítico (partes superior de la figura) corresponde al mes de mayor consumo y el período crítico (parte inferior de la figura) al conjunto de meses consecutivos en que se consumen combustibles líquidos en el escenario respectivo.

Nótese que el mes crítico es uno de los meses del período crítico. Por ejemplo, para el escenario “El Niño 97-98” (última fila de la tabla), el mes crítico corresponde a marzo de 2015 pues el consumo agregado de combustibles (ie. FO#2, FO#6 y JETA1) es de 60,104 BD y el período crítico es de 7 meses entre octubre de 2014 y abril de 2015.

Cifras en b/d

Mes crítico							
Escenario	Serie	FO2	FO6	JETA1	Total	Racionamiento	Mes
12 meses	Serie 41	20,935	8,747	142	29,824	-	sep-14
24 meses	Serie 193	40,370	11,172	4,420	55,962	-	nov-15
36 meses	Serie 96	46,256	11,171	4,420	61,848	-	abr-16
48 meses	Serie 38	46,256	11,171	4,420	61,848	-	mar-17
60 meses	Serie 187	42,479	11,171	4,420	58,070	-	mar-17
El Niño 91-92		44,513	11,172	4,420	60,105	-	abr-15
El Niño 97-98		44,513	11,171	4,420	60,104	-	mar-15

CONSUMOS PARA ENFICC			
FO2	FO6	JET A1	Total
53.6	11.3	8.7	73.6

Período crítico									
Escenario	Serie	FO2	FO6	JETA1	Total	Racionamiento	Inicio	Final	Durac (m)
12 meses	Serie 41	10,468	4,855	71	15,393	-	ago-14	sep-14	2
24 meses	Serie 193	9,692	5,547	632	15,871	-	jul-15	may-16	11
36 meses	Serie 96	17,769	10,169	1,159	29,097	-	mar-16	ago-16	6
48 meses	Serie 38	29,882	10,988	2,652	43,522	-	dic-16	abr-17	5
60 meses	Serie 187	18,672	8,070	1,263	28,006	-	nov-17	may-18	7
El Niño 91-92		35,175	11,171	4,016	50,362	-	mar-15	jun-15	4
El Niño 97-98		21,365	10,479	1,894	33,738	-	oct-14	abr-15	7

Tabla 7-1. Consumos agregados de combustibles líquidos para el mes y período críticos.

En primer lugar se destaca que en ninguno de los escenarios mostrados se presenta racionamiento alguno de combustibles líquidos para generación termoeléctrica, y dada la prioridad asumida de atender primero la demanda no termoeléctrica, no se presenta tampoco racionamiento en esta demanda no termoeléctrica. Este resultado indica que, si la información suministrada por los diversos actores y recopilada por los consultores es correcta, la logística de abastecimiento de líquidos para todas las termoeléctricas habilitadas para consumirlos, tendría la capacidad suficiente para atender la demanda correspondiente en cada uno de los escenarios de despacho analizados.

En segundo lugar, se observa que el volumen agregado más alto de consumo mensual de combustibles líquidos sería de 61,848 B/d (mes crítico en los escenarios de 36 y 48 meses), el cual es ligeramente inferior al consumo que tendría generar la ENFICC en todas las plantas simultáneamente, el cual es de 73,600 B/d (ver recuadro sombreado con naranja).

Finalmente, la duración máxima del despacho importante de generación térmica con líquidos alcanza los 11 meses.

7.4.2 Importaciones, almacenamiento y utilización de puertos

Para el caso de la ocurrencia del fenómeno de El Niño 97-98, la Tabla 7-2 presenta las importaciones, el almacenamiento y la utilización de los puertos.

El Niño 97-98
periodo critico

Puerto	Volumen importado (b/d)	Volumen entregado (b/d)	Nivel promedio tanques (b)	Nivel mínimo tanques (b)	Nivel máximo tanques (b)	Utilización
Argos FO2 - Barranquilla	7,490	7,706	157,619	-	240,000	38.0%
Petromil FO6 - Barranquilla	-	-	-	-	-	0.0%
Biomax FO2 - Cartagena	7,191	7,628	88,309	250	92,000	89.6%
Exxon Mobil FO2 - Cartagena	1,596	1,595	23,719	-	130,000	13.6%
Biomax JETA1 - Cartagena	-	-	-	-	-	89.6%
Exxon Mobil FO2 - Buenaventura	6,992	6,909	102,059	-	145,000	19.6%
Total	23,269	23,838				

Tabla 7-2. Importaciones, almacenamiento y utilización de puertos. Cado El Niño 97-98

Se observa que los puertos de FO#2 varían significativamente el nivel del almacenamiento, llegando por abajo en la mayoría de los casos hasta el nivel de cero y por arriba hasta la máxima capacidad, lo cual muestra el comportamiento típico de un puerto de desocupar el tanque antes de recibir una gran cantidad de combustible de un barco en el menor tiempo posible. De otra parte, se destaca la alta utilización del puerto contratado por Biomax en Cartagena.

A nivel regional las importaciones se desagregan por tipo de combustible como lo presenta la Tabla 7-3. Nótese que el FO#6 consumido es de producción nacional.

Mes crítico										
Escenario	Caso	Costa Atlántica				Valle				Total
		FO2	FO6	JETA1	Total	FO2	FO6	JETA1	Total	
12 meses	Serie 41	5,975	-	-	5,975	5,418	-	-	5,418	11,393
24 meses	Serie 193	25,476	-	-	25,476	12,204	-	-	12,204	37,680
36 meses	Serie 96	31,362	-	-	31,362	11,770	-	-	11,770	43,132
48 meses	Serie 38	31,362	-	-	31,362	11,770	-	-	11,770	43,132
60 meses	Serie 187	22,036	-	-	22,036	13,175	-	-	13,175	35,210
El Niño 91-92		29,619	-	-	29,619	12,894	-	-	12,894	42,513
El Niño 97-98		29,619	-	-	29,619	12,561	-	-	12,561	42,180
Período crítico										
Escenario	Caso	Costa Atlántica				Valle				Total
		FO2	FO6	JETA1	Total	FO2	FO6	JETA1	Total	
12 meses	Serie 41	8,521	-	-	8,521	4,280	-	-	4,280	12,801
24 meses	Serie 193	5,921	-	-	5,921	129	-	-	129	6,051
36 meses	Serie 96	10,856	-	-	10,856	7,737	-	-	7,737	18,593
48 meses	Serie 38	21,286	-	-	21,286	10,508	-	-	10,508	31,793
60 meses	Serie 187	13,464	-	-	13,464	6,581	-	-	6,581	20,045
El Niño 91-92		21,531	-	-	21,531	12,777	-	-	12,777	34,308
El Niño 97-98		16,277	-	-	16,277	6,992	-	-	6,992	23,269

Tabla 7-3. Importaciones por región y combustible. Cifras en BD

Los consumos de combustibles para generación termoeléctrica por región y tipo se presentan en la Tabla 7-4.

Mes crítico									
Escenario		Costa Atlántica			Magdalena medio			Valle	Total
		FO2	FO6	Total	FO2	JETA1	Total	FO2	
12 meses	Serie 41	8,738	8,747	17,485	8,304	142	8,446	3,893	29,824
24 meses	Serie 193	20,738	11,172	31,909	9,071	4,420	13,491	10,561	55,962
36 meses	Serie 96	26,624	11,171	37,795	9,071	4,420	13,491	10,561	61,848
48 meses	Serie 38	26,624	11,171	37,795	9,071	4,420	13,491	10,561	61,848
60 meses	Serie 187	22,846	11,171	34,018	9,071	4,420	13,491	10,561	58,070
El Niño 91-92		24,881	11,172	36,053	9,071	4,420	13,491	10,561	60,105
El Niño 97-98		24,881	11,171	36,052	9,072	4,420	13,492	10,561	60,104
Período crítico									
Escenario		Costa Atlántica			Magdalena medio			Valle	Total
		FO2	FO6	Total	FO2	JETA1	Total	FO2	
12 meses	Serie 41	4,369	4,855	9,224	4,152	71	4,223	1,946	15,393
24 meses	Serie 193	3,589	5,547	9,136	3,338	632	3,970	2,766	15,871
36 meses	Serie 96	6,579	10,169	16,749	6,120	1,159	7,278	5,070	29,097
48 meses	Serie 38	13,919	10,988	24,907	7,979	2,652	10,631	7,985	43,522
60 meses	Serie 187	8,439	8,070	16,509	6,605	1,263	7,868	3,629	28,006
El Niño 91-92		16,226	11,171	27,397	8,389	4,016	12,404	10,561	50,362
El Niño 97-98		9,302	10,479	19,781	7,629	1,894	9,524	4,433	33,738

Tabla 7-4. Consumos de combustible por región y tipo. Cifras en BD

La Costa Atlántica es la región de mayor participación en los consumos de combustible para generación, seguida del Magdalena Medio y Valle del Cauca. De otra parte, el orden de participación de los combustibles es FO#2, FO#6 y JETA1.

7.4.3 Consumo y almacenamiento en las termoeléctricas

La Tabla 7-5 presenta los consumos en cada una de las termoeléctricas tanto para el mes crítico como para el período crítico.

Mes crítico					
Termoeléctrica	Volúmen recibido (b/d)	Volumen consumido (b/d)	Nivel promedio (b)	Nivel mínimo (b)	Nivel máximo (b)
Barranquilla	4,736	4,736	87,468	85,461	89,408
Cartagena	6,435	6,435	64,330	63,116	65,578
Flores	14,245	14,245	9,293	8,657	9,524
Termoemcali	5,630	5,630	32,524	31,500	32,700
Termocandelaria	10,628	10,636	18,273	16,017	20,588
Termocentro	4,420	4,420	24,850	24,079	25,000
Termodorada	1,366	1,366	9,318	7,619	9,524
Termosierra	7,706	7,706	24,274	21,364	26,501
Termovalle	4,931	4,931	32,803	31,562	33,000
Total	60,096	60,104			

Período crítico					
Termoeléctrica	Volúmen recibido (b/d)	Volumen consu mido (b/d)	Nivel promedio (b)	Nivel mínimo (b)	Nivel máximo (b)
Barranquilla	4,720	4,736	87,512	85,461	90,000
Cartagena	5,716	5,743	65,043	63,116	69,600
Flores	7,706	7,706	9,433	8,657	9,524
Termoemcali	2,272	2,274	32,680	31,475	33,000
Termocandelaria	1,595	1,596	16,814	16,017	20,588
Termocentro	1,894	1,894	24,936	24,079	25,000
Termodorada	384	390	10,054	7,619	10,891
Termosierra	7,217	7,239	24,616	21,364	28,749
Termovalle	2,159	2,159	32,922	31,562	33,000
Total	33,664	33,738			

Consumo a ENFICC KBDO

Planta	FO6	JET A1	FO6
Termoemcali	6.1	-	-
Termovalle	6.0	-	-
Sub totales	12.0	-	-
Termocentro	-	8.7	-
Termosierra	10.1	-	-
Termodorada	1.5	-	-
Sub totales	11.6	8.7	-
Termoflores 1	5.0	-	-
Termoflores 4	12.9	-	-
Termocandelaria 1 y 2	12.1	-	-
Barranquilla 3 y 4	-	-	4.6
Central Cartagena	-	-	6.7
Termonorte* (IFO 380)	-	-	-
Sub totales	30.0	-	11.3
	53.6	8.7	11.3

Tabla 7-5. Consumos de combustible por planta. Cifras en BD

La parte derecha de la tabla contiene el consumo máximo de cada termoeléctrica suponiendo que el 100% de la ENFICC se genera con combustible líquido. Estas cifras son solo una referencia, pues no en todos los casos las OEF están respaldadas 100% con el combustible líquido.

Si se ordenan las plantas desde la de mayor generación a la menor, los ordenamientos son los siguientes:

	Orden mes crítico	Orden período crítico
1	Flores	Flores
2	Termocandelaria	Termosierra
3	Termosierra	Cartagena
4	Cartagena	Barranquilla
5	Termoemcali	Termoemcali
6	Termovalle	Termovalle
7	Barranquilla	Termocentro
8	Termocentro	Termocandelaria
9	Termodorada	Termodorada

Este orden refleja, de un lado la eficiencia económica (no la eficiencia técnica) de la planta, su tamaño y su contrato (este último en razón de que la simulación tiene en cuenta la cantidad máxima contratada para honrar la OEF). Se aprecia que Termocandelaria es la planta que experimenta el mayor cambio al pasar del puesto 2 al 8, seguido de Barranquilla (del 7 al 4). Las demás, en especial Flores, Termoemcali, Termovalle y Termodorada que no cambian su orden, se mantienen estables.

De otra parte, todas las plantas mantienen su almacenamiento en niveles altos, lo cual se logra con un ingreso estable de carro tanques y una generación estable.

7.4.4 Utilización de poliductos que atienden demandas termoeléctricas

La Tabla 7-6 muestra para cada escenario la utilización de los dos poliductos que atienden demandas termoeléctricas (el de Termoflores y el de Buenaventura- Yumbo). Se aclara que el poliducto Buenaventura-Yumbo, que es bidireccional con capacidad de 19,000 BD, para propósitos del transporte de FO#2 para las termoeléctricas localizadas cerca de Yumbo, se considera unidireccional con capacidad de 12,000 BD, es decir, reducido en una cantidad equivalente a la utilización en la dirección contraria (7,000 BD).

Mes crítico			
Escenario	Caso	Termoflores	B/ventura-Yumbo
12 meses	Serie 41	22.5%	27.4%
24 meses	Serie 193	41.2%	49.1%
36 meses	Serie 96	41.2%	50.2%
48 meses	Serie 38	41.2%	50.2%
60 meses	Serie 187	41.2%	47.5%
El Niño 91-92		36.7%	51.1%
El Niño 97-98		36.7%	48.6%

Período crítico			
Escenario	Caso	Termoflores	B/ventura-Yumbo
12 meses	Serie 41	11.6%	13.7%
24 meses	Serie 193	17.3%	25.4%
36 meses	Serie 96	17.3%	25.4%
48 meses	Serie 38	30.5%	38.1%
60 meses	Serie 187	22.0%	19.6%
El Niño 91-92		32.0%	50.7%
El Niño 97-98		20.2%	23.4%

Tabla 7-6. Utilización de los poliductos que transportan FO#2 a termoeléctricas

7.4.5 Utilización de carro tanques

La Tabla 7-7 presenta el número de carro tanque utilizados para cada uno de los escenarios estudiados.

Mes crítico				
Escenario	Caso	Promedio	Mínimo	Máximo
Sin consumo termoeléctrico		54	-	206
El Niño 91-92		260	93	490
El Niño 97-98		221	75	388
60 meses	Serie 187	250	92	438
24 meses	Serie 193	213	60	386
48 meses	Serie 38	233	72	428
12 meses	Serie 41	169	5	245
36 meses	Serie 96	233	72	428

Período crítico				
Escenario	Caso	Promedio	Mínimo	Máximo
Sin consumo termoeléctrico		54	-	206
El Niño 91-92		236	12	490
El Niño 97-98		188	4	413
60 meses	Serie 187	168	13	412
24 meses	Serie 193	164	12	401
48 meses	Serie 38	214	10	452
12 meses	Serie 41	111	1	245
36 meses	Serie 96	164	12	401

Tabla 7-7. Numero de carro tanque diarios utilizados

Se observa que el número de carro tanques diarios que en promedio se utilizan en la actualidad (sin consumos termoeléctricos) es de 54 con un máximo en algún día de 206. Para el escenario con consumo termoeléctrico más exigente (El Niño 91-92), estos números crecen significativamente, alcanzando el promedio diario de 260 carro tanques y un máximo diario de 490.

7.4.6 Capacidad de parque de carro tanques

En Colombia los carro tanques utilizados para transportar hidrocarburos se clasifican en dos grupos. Los que transportan crudos pesados desde los campos productores que no están conectados al sistema de oleoductos y los que transportan productos derivados del petróleo entre diferentes puntos de la geografía nacional.

Los carro tanques que transportan crudos se dirigen desde el interior del país (Llanos orientales y Valle del Magdalena principalmente) bien sea hacia la Costa Atlántica, o bien hasta puntos de entrega al sistema de oleoductos. Buena parte de los carro tanques que descargan el crudo en la Costa Atlántica se devuelven hasta los campos petroleros con nafta importada que se utiliza como diluyente para facilitar su transporte, y nuevamente inician el ciclo hacia la costa. Se estima que no es muy grande el número de estos carro tanques que retornan transportando derivados, no solo por el hecho del retorno con nafta mencionado, sino porque es costoso y engorroso el lavado de los tanques.

Por su parte, los carro tanques destinados al transporte de combustibles derivados, que son los de interés para este estudio, se utilizan para llevar combustible desde los puertos de importación hasta las plantas de abasto mayorista y desde las plantas de abasto hasta los puntos de abastecimiento minorista (estaciones de servicio) y consumidores grandes

regulares (industrias, ingenios azucareros, etc.). Estos carro tanques se registran en el sistema SICOM del MME.

Para establecer si el parque actual de carro tanques destinado al transporte de combustibles derivados es suficiente para atender la demanda (termoeléctrica y no termoeléctrica) de estos combustibles, se desarrolló la siguiente metodología:

- Estimar los carro tanques de aproximadamente 10,500 gal utilizados desde plantas de abasto hasta distribuidores minoristas y grandes consumidores regulares (i.e., sin incluir consumos termoeléctricos)
- Estimar los carro tanques adicionales desde puertos o desde plantas de abasto para atender la demanda regular
- Estimar los carro tanques adicionales para atender las demandas de termoeléctricas
- Comparar con las cifras disponibles sobre el parque (SICOM, ECOPETROL, gremios)
- Concluir sobre la suficiencia del parque

La aplicación de la metodología se realiza a continuación. En la Figura 7-4 se muestran las zonas de distribución minorista dentro de las cuales se mueven los carro tanques transportando combustible desde las plantas de abasto hasta las estaciones de servicio (distribuidores minoristas) y los grandes consumidores diferentes a termoeléctricas. El ciclo de operación de los carro tanques consiste en cargar combustible en la(s) planta(s) de abasto de la zona y llevarla al destino (estaciones de servicios y grandes consumidores) dentro de la misma zona, para posteriormente retornar nuevamente a la(s) planta(s) de abasto a cargar combustible y reiniciar el ciclo.

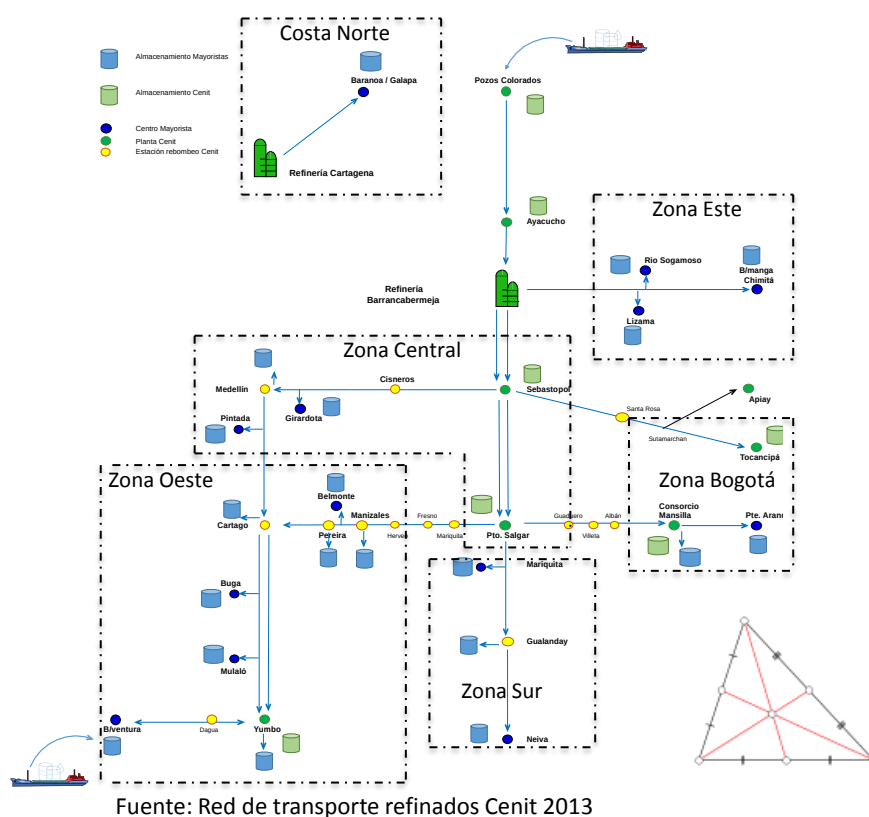


Figura 7-4. Zonas de distribución minorista a estaciones de servicio y grandes consumidores no termoeléctricos

En modelo conceptual consiste es determinar el centroide de la zona de distribución minorista, estimar la distancia media recorrida por cada carro tanque al centroide, considerar la velocidad promedio de los carro tanques, y con la demanda de combustibles y la capacidad de cada carro tanque, estimar el número de carro tanques requeridos en la zona.

La Tabla 7-8 presenta para cada zona de distribución minorista, la(s) planta(s) de abasto asociada(s), la distancia media al centroide y la velocidad promedio de los carro tanques, que es función de la topografía de la zona. El tiempo medio de viaje al centroide (última columna) es un resultado determinante de la demanda de carro tanques para atender las necesidades regulares de combustible.

Zona	Plantas de abasto asociadas	Distancia media al centroide de consumo (km)	Velocidad promedio de los carro tanques (km/h)	Tiempo medio de viaje al centroide de consumo(h)
Zona Bogotá	Mansilla	28.0	15	1.9
	Puente aranda			
Zona Central	Girardota	164.3	35	4.7
	La pintada			
	Medellín			
	La Dorada			
Zona Sur	Sebastopol	140.6	35	4.0
	Gualanday			
	Mariquita			
Zona Oeste	Neiva	129.5	40	3.2
	Buenaventura			
	Buga			
	Cartago			
	Manizales			
	Mulalo			
Zona Este	Pereira	114.3	40	2.9
	Yumbo			
Costa Norte	Bucaramanga	55.8	35	1.6
	Lizama			
	Cartagena			
	Galapa			
	Baranoa			

Tabla 7-8. Numero de carro tanques diarios utilizados

La Tabla 7-9 muestra para cada zona la demanda de todos los combustibles que compiten por los carro tanques de la zona (principalmente gasolinas, FO#2 y JETA1), los tiempos de viaje de ida, de regreso y total, el tiempo total del ciclo, el número de viajes de los carro tanques de 250 B de capacidad, y el número de carro tanques requeridos.

Region	Demanda Total (BD) (*)	Tiempo promedio de viaje a centro de consumo (h)	Tiempo promedio de regreso a planta de abasto (h)	Tiempo total por viaje (h)	Numero de viajes necesarios para atender la demanda (viajes/dia)	Numero de viajes desde la planta de abasto al centro de consumo (viajes/carrot/d)	Numero de carrotanques necesarios
Zona Bogota	78,384	1.87	1.87	9.33	330	1.07	308
Zona Central	25,938	4.69	4.69	14.99	109	0.67	164
Zona Sur	15,648	4.02	4.02	13.63	66	0.73	90
Zona Oeste	36,884	3.24	3.24	12.07	155	0.83	188
Zona Este	17,392	2.86	2.86	11.31	74	0.88	84
Costa Norte	38,355	1.59	1.59	8.79	162	1.14	143
Total	212,601				893		977
(1) Tiempo promedio de cargue en planta de abasto: 1.2 h							
(2) Tiempo promedio de descargue en centro de consumo: 2.4 h							
(3) Tiempo muerto promedio por viaje: 2 h							
(3) Tiempo disponible de trabajo de un carrotanque: 10 h/d							
(*) Demanda de FO2, JETA1 y gasolinas							

Carro tanques (con utilización del 100%) de 250 Barriles se dedican al transporte de la demanda regular de combustibles

Tabla 7-9. Numero de carro tanques utilizados por zona de distribución y total

En consecuencia se estima que 977 carro tanques son utilizados permanentemente en las zonas de distribución mayorista.

La información contenida en el sistema SICOM del MME indica que existen 1547 carro tanques en el país de capacidad cercana a 10,500 gl. Esta cifra es aproximadamente la misma que estiman ECOPETROL y los gremios del transporte.

La Tabla 7-10 muestra el balance de oferta y demanda de carro tanques para el caso más crítico de requerimientos que, como se vio, corresponde a la ocurrencia de una sequía como la provocada por el fenómeno de El Niño 91-92.

		Promedio	Máximo
Oferta	SICOM	1547	1547
Demanda	Regular	977	977
	Termoeléctrico	261	490
	Total	1238	1467
Excedentes		309	80

Tabla 7-10. Balance de oferta y demanda de carro tanques para abastecer el consumo de combustibles líquidos (termoeléctricos y no termoeléctricos) – caso crítico

Se observa que la demanda de 1238 carro tanques en promedio (y de 1467 para el día de máximos requerimientos) puede ser atendida con el parque disponible de 1547 registrado en el SICOM.

Es preciso anotar que, en la medida en que se construyen oleoductos para movilizar crudos, existe una tendencia al incremento del número de carro tanques disponibles en el mercado de transporte de los combustibles derivados, lo cual se traduce en una mayor seguridad en el suministro de transporte de los combustibles requeridos para atender las eventuales demandas termoeléctricas.

7.4.7 Tráfico por carretera y puntos críticos

El objeto de este numeral consiste en hacer un análisis sobre el transporte de combustibles por carro tanque y su impacto sobre el tráfico vehicular regular en las principales rutas del país, las cuales pudien verse afectadas por un despacho continuo de las termoeléctricas.

7.4.7.1 Rutas principales para el transporte de carro tanques a termoeléctricas

Como se mencionó, a partir de la información suministrada por CENIT, y los grandes agentes de distribución mayorista e importación, el análisis de la logística permite concluir que el abastecimiento de combustibles a termoeléctricas se llevaría a cabo con carro tanques. Adicionalmente, los combustibles demandados por las plantas de generación se transportarían desde los principales puertos de importación (asociados a los mayoristas que tienen contratos con plantas termoeléctricas) más cercanos a las plantas con el fin de disminuir los costos, el tiempo de tránsito de los combustibles y la confiabilidad de un suministro oportuno. Esta premisa operativa implica que plantas de generación térmica como, Flores 1, Flores 4, Barranquilla 3 y 4, Termocandelaria, central Cartagena, Termosierra, Termocentro y Termodorada deben ser abastecidas de combustibles a través de los puertos ubicados en la Costa Atlántica. Análogamente, el suministro de combustibles a unidades de generación como Termovalle y Termoemcali debe realizarse por el puerto de Buenaventura y por las plantas de abasto de distribuidores mayoristas más cercanas.

A partir de estos resultados se encontraron las rutas principales para el transporte de combustibles líquidos a las termoeléctricas y se identificaron todos los puntos de peaje en cada una de las rutas principales con la ayuda del mapa de la red vial del INVIAS. Por otro lado se obtuvieron los datos del volumen de tráfico vehicular en cada peaje con la información más actualizada suministrada por el Instituto (INVIAS 2011). Las rutas seleccionadas, peajes y datos sobre los volúmenes de tránsito se presentan en Tabla 7-11, Tabla 7-12 y Figura 7-5.

Ruta	Tramo	Peaje	TPDS				
			Media ² (Vehículos/día)	Desviación ² estándar ² (Vehículos/día)	%Automóviles	%Buses	%Camiones
Pozos-Cócora-Bosconia	La Gran Vía-Aracataca	Tucurín	4941	1130	32	11	57
Barranquilla-Bosconia	Palermo	Puerto Laureano-Gómez	5520	543	43	15	42
Barranquilla-Bosconia	Tasajero-Ciénaga	Tasajero	6236	810	47	16	37
Barranquilla-Bosconia	La Gran Vía-Aracataca	Tucurín	4941	1130	32	11	57
Cartagena-Bosconia	Variante Gambote-Cartagena	Gambote	3664	1587	60	12	38
Cartagena-Bosconia	Carretero-Carmen de Bolívar	Carmen de Bolívar	6205	1041	41	7	52
Bosconia-Yumbo	Cruce de la Tierra-cuatro Vientos	La Boma	4543	1113	34	8	57
Bosconia-Yumbo	Burro-la Mata	Pailitas	5388	913	38	8	54
Bosconia-Yumbo	Pto Araujo-la Izama	Aguas Negras	4276	863	37	8	55
Bosconia-Yumbo	Pto Araujo-Pto Serviez	Zambito	3703	716	39	6	55
Bosconia-Yumbo	Estación Uribe-La Manuela	Pavas	5011	1383	68	11	21
Bosconia-Yumbo	zarzal-la Paila	Corozal	7867	1451	54	13	33
Bosconia-Yumbo	la Paila-la Uribe	Uribe	13115	2497	34	12	54
Bosconia-Yumbo	Tuluá-Buga	Betania	17339	1975	38	14	48
Bosconia-Yumbo	cerrito-guacari	cerrito	13267	2298	56	13	31
Bosconia-Yumbo	rozo-cruce de Guajira	Rozo	5357	1793	67	14	19
Buenaventura-yumbo	Buenaventura-Loboguerrero	Loboguerrero	4388	596	28	7	65
Buenaventura-yumbo	Mediacanoa-Vijes	Mediacanoa	3492	1440	39	5	56
Buenaventura-yumbo	Vijes-Yumbo	Paso de la Torre	5609	1390	50	7	43
Buenaventura-yumbo	Yumbo-Cementos del Valle	Cencar	26722	2440	50	18	32

Tabla 7-11. Principales rutas, peajes y TPDS para el abastecimiento de combustibles a Termoeléctricas

Esta red se puede clasificar en rutas, tramos y puntos de peaje pertenecientes a tres grandes regiones como son: i) la Costa Atlántica, ii) el Magdalena medio y iii) el Valle del Cauca.

Como datos de claves para el análisis, se tienen la media y desviación estándar del Transito Promedio Diario Semanal (TPDS) que consiste en el número de vehículos que cruzan diariamente un punto de medición (en este caso un peaje) promediado en un intervalo de tiempo de una semana. Por otra parte, la Tabla 7-11 incluye la participación por tipo de vehículo (automóviles, buses y camiones) en la composición del tráfico, y es de especial interés la cantidad de camiones que circulan por estas rutas, pues permite determinar el aumento del tráfico causado por este tipo de vehículos (carro tanques) ante un abastecimiento continuo de combustibles a termoeléctricas.

Ruta	Tramo	Peaje	TS Camiones	
			Total Camiones (Camiones/semana)	Camiones 5 y 6 ejes (Camiones/semana)
Pozos Colorados-Bosconia	La Gran Vía-Aracataca	Tucurínca	19696	9452
Barranquilla-Bosconia	Palermo	Puente Laureano Gómez	15289	4434
Barranquilla-Bosconia	Tasajero-Ciénaga	Tasajera	14244	4360
Barranquilla-Bosconia	La Gran Vía-Aracataca	Tucurínca	19696	9452
Cartagena-Bosconia	Variante Gambote-Cartagena	Gambote	17431	6294
Cartagena-Bosconia	Carreto-Carmen de Bolívar	Carmen de Bolívar	22414	8129
Bosconia-Yumbo	cruce la Tierra-cuatro vientos	La Loma	18168	8392
Bosconia-Yumbo	Burro-la Mata	Pailitas	20340	9278
Bosconia-Yumbo	Pto Araujo-la Lizama	Aguas Negras	16409	5311
Bosconia-Yumbo	Pto Araujo-Pto Serviez	zambito	14259	5027
Bosconia-Yumbo	Estación Uribe-La Manuela	Pavas	7482	996
Bosconia-Yumbo	zarzal-la Paila	Corozal	18194	5187
Bosconia-Yumbo	la Paila-la Uribe	Uribe	49380	14586
Bosconia-Yumbo	Tuluá-Buga	Betania	58746	14901
Bosconia-Yumbo	cerrito-guacari	cerrito	28693	6889
Bosconia-Yumbo	rozo-cruce Guajira	Rozo	7234	904
Buenaventura-yumbo	Buenaventura-Loboguerrero	Loboguerrero	19780	9846
Buenaventura-yumbo	Mediacanoa-Vijes	Mediacanoa	13695	3638
Buenaventura-yumbo	Vijes-Yumbo	Paso de la Torre	16702	4919
Buenaventura-yumbo	Yumbo-Cementos del Valle	Cencar	60487	13897

Tabla 7-12. Principales rutas, peajes y TS camiones para el abastecimiento de combustibles a Termoeléctricas

La Tabla 7-12 contiene el Transito Semanal (TS) de camiones y en especial el número de camiones de 5 y 6 ejes que circulan en promedio cada semana por las diferentes rutas. Los carro tanques usualmente empleados para el transporte de combustibles líquidos se encuentran dentro de la categoría de 5 y 6 ejes, con lo cual esta información es de gran importancia para identificar el aumento del tráfico pesado ante un eventual suministro de combustibles a termoeléctricas.

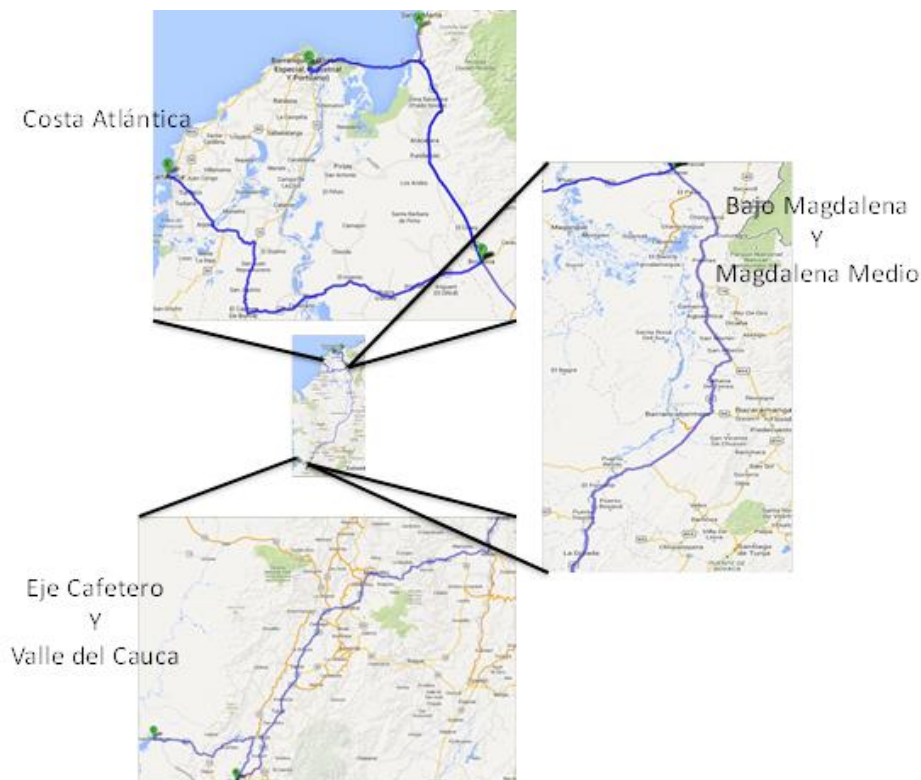


Figura 7-5. Mapa de las rutas principales desde plantas de abasto a Termoeléctricas

Ruta	Tramo	Peaje	Análisis			
			Factor de pico	media +2dev (TPDS 95%)	Trafico Hora Pico	Numero de servidores estimado
Pozos colorados-Bosconia	La gran vía-Aracataca	Tucurínca	1.4	7201	420	
Barranquilla-Bosconia	Palermo	Puente Laureano Gómez	1.4	6606	385	
Barranquilla-Bosconia	Tasajero-Ciénaga	Tasajera	1.61	7856	527	4
Barranquilla-Bosconia	La gran vía-Aracataca	Tucurínca	1.4	7201	420	
Cartagena-Bosconia	Variante Gambote-Cartagena	Gambote	1.4	6838	399	
Cartagena-Bosconia	Carreto-Carmen de Bolívar	Carmen de Bolívar	1.2	8287	414	
Bosconia-Yumbo	cruce la cierra-cuatro vientos	La loma	1.2	6769	338	
Bosconia-Yumbo	Burro-la mata	Pailitas	1.2	7214	361	4
Bosconia-Yumbo	Pto Araujo-la Lizama	Aguas Negras	1.2	6002	300	
Bosconia-Yumbo	Pto Araujo-Pto Serviez	zambito	1.2	5135	257	
Bosconia-Yumbo	Estación Uribe-La manuela	Pavas	1.61	7777	522	
Bosconia-Yumbo	zarzal-la Paila	Corozal	1.4	10769	628	
Bosconia-Yumbo	la paila-la Uribe	Uribe	1.4	18109	1056	
Bosconia-Yumbo	Tuluá-Buga	Betania	1.4	21289	1242	8
Bosconia-Yumbo	cerrito-guacari	cerrito	1.4	17863	1042	
Bosconia-Yumbo	rozo-cruce guajira	Rozo	1.4	8943	522	
Buenaventura-yumbo	Buenaventura-Loboguerrero	Loboguerrero	1.2	5580	279	4
Buenaventura-yumbo	Mediacanoa-Vijes	Mediacanoa	1.2	6372	319	
Buenaventura-yumbo	Vijes-Yumbo	Paso de la torre	1.4	8389	489	
Buenaventura-yumbo	Yumbo-Cementos del Valle	Cencar	1.61	31602	2120	3

Tabla 7-13 Selección de puntos de peaje en rutas a Termoeléctricas con probabilidad de tráfico crítico

La Tabla 7-13 presenta el análisis preliminar de los puntos de peaje en donde el tráfico vehicular podría ser crítico (filas sombreadas en gris). Para este análisis se calcularon variables como: i) Factor de pico; ii) el percentil TPDS 95%, iii) el Trafico hora pico y iv) Numero de servidores existente en el peaje.

El factor de pico se calculó con el fin de diferenciar el tráfico en horas pico en puntos cercanos a grandes ciudades (por ende de gran demanda y variación). Este valor corresponde a un número entre 1.2 y 1.61, el cual fue calculado a partir de datos reales sobre la variación horaria del volumen de tránsito en la Estación 93 (Paipa-Duitama) para la semana del 28 de noviembre al 4 de diciembre de 2009 descrito en el informe del INVIAS sobre los volúmenes de tránsito en 2009. Para este cálculo se hizo el promedio semanal de tráfico para cada una de las 24 horas del día, excluyendo del promedio semanal el lunes por ser un día atípico por la ocurrencia frecuencia de festivos. Cada uno de estos 24 promedios se dividió entre la media global dando como resultado un factor de pico máximo de 1,61 como se puede observar en la Figura 7-6.



Figura 7-6. Tráfico pico de referencia para el caso Paipa-Duitama 2009

Análogamente, el TPDS 95% representa un TPDS crítico, que se calcula como el TPDS medio en cada ruta más dos veces la desviación estándar, de tal manera que este valor sea cercano al percentil 95 de la distribución de probabilidad para esta variable. Finalmente, el tráfico de hora pico asociado a los peajes se estimó a partir del TPDS del 95% descrito anteriormente, y se explica mediante la siguiente expresión:

$$Tráfico\ pico_i = \frac{TPDS\ 95\%_i}{24} * Factor\ de\ pico_i$$

7.4.7.2 Análisis de tráfico en la ruta más crítica cercana a una termoeléctrica

Con el fin de determinar el efecto del transporte de combustible por carro tanque a las principales termoeléctricas que consumen líquidos, se simuló el caso del peaje más crítico y para el cual se tiene muy buena información. Este es el caso del peaje CENCAR, que se encuentra en la vía Buenaventura-Yumbo, el cual está en una de las rutas de transporte de combustible a Termovalle y Termoemcali. Como se puede observar en la Tabla 7-13, este es el punto con mayor tráfico de vehículos (TPDS y tráfico en hora pico).

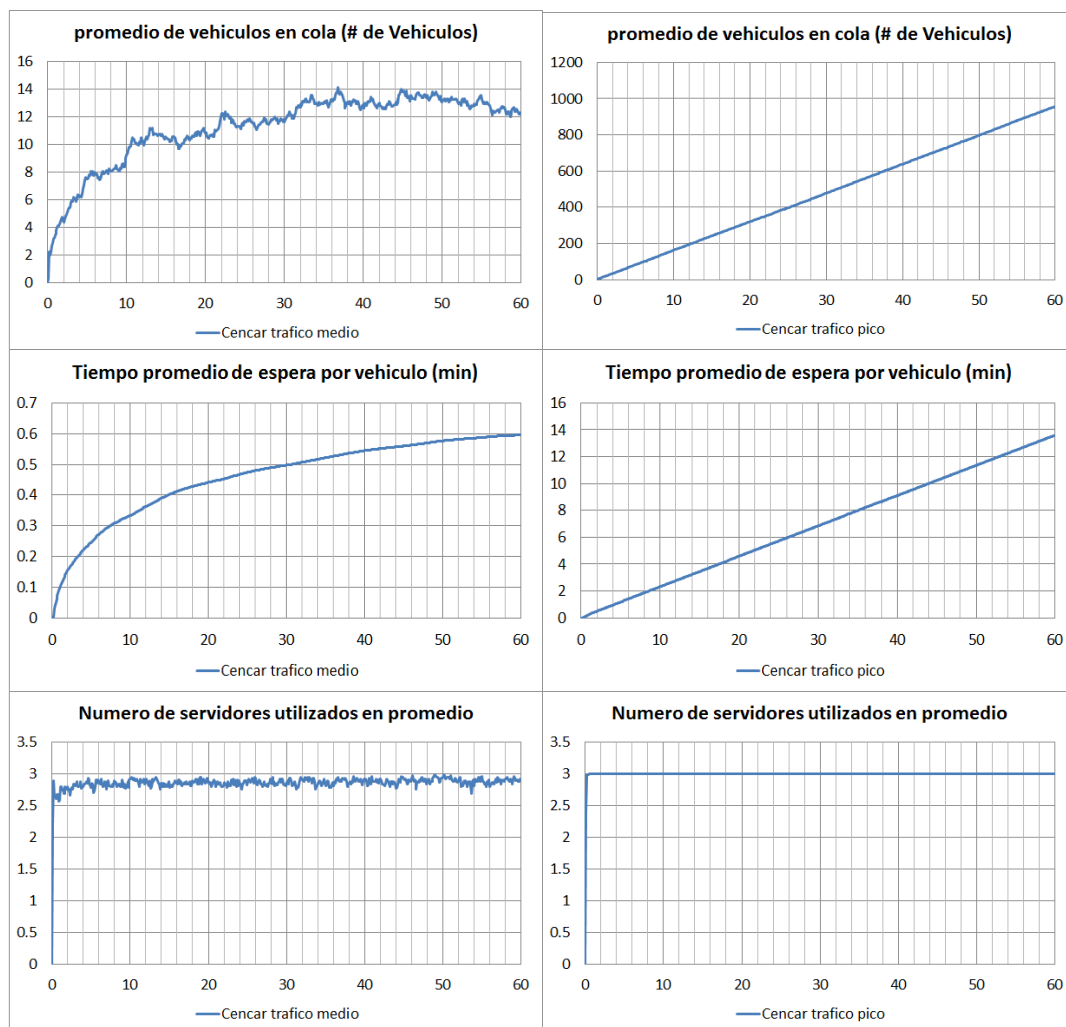


Figura 7-7. Resultados del tráfico de vehículos en el peaje CENCAR para horas promedio y hora pico

La Figura 7-7 ilustra tres variables de gran interés para el análisis del tráfico: i) promedio de vehículos en cola, tanto para horas promedio como para hora pico, ii) tiempo promedio de espera por vehículo para horas promedio y hora pico, y iii) número de servidores utilizados en promedio para horas promedio y hora pico. El eje x de cada gráfica representa el tiempo en minutos (para 1 hora de simulación de la operación) y el modelo se corrió 100 veces (simulación Montecarlo) para mejorar la precisión de los resultados.

Los resultados muestran lo siguiente: (i) el tráfico en las horas promedio (i.e. fuera de pico y sin incluir carro tanques con combustible a las termoeléctricas) no es un problema debido a que el número promedio de vehículos en cola sumados en los tres servidores o casetas del peaje CENCAR no supera los 15, y el tiempo de espera de cada vehículo en promedio es inferior a 0.6 minutos, y ii) el tráfico en las horas pico es pesado (sin incluir los carro tanques que transportan el combustible a las termoeléctricas) forma colas cercanas a los 980 en los 3 servidores, el tiempo de espera puede llegar a cerca de los 14 minutos por vehículo y los servidores estarían utilizados a su máxima capacidad.

Estos resultados sugieren, que el tráfico adicional de carro tanques causado por despachos termoeléctricos no tendría un impacto significativo en la congestión del peaje de CENCAR en horas fuera de pico, y la congestión vehicular en hora pico, que hoy es alta, no aumentaría significativamente, pues el número de carro tanques diarios que deben

ingresar a las dos termoeléctrica localizadas en la zona es del orden de 50 (es decir unas 2 por hora). Nótese que con estas cifras es viable evitar el tránsito de los carro tanques en la hora pico.

Los análisis y resultados presentados para el peaje de CENCAR se pueden aplicar a los demás peajes comprometidos en el abastecimiento de combustible a todas las termoeléctricas del país y que son considerados en este capítulo. Por lo tanto, no se considera un cuello de botella en la cadena logística. Sin embargo, la recomendación es programar el despacho de carro tanques en horas valle o de bajo tránsito vehicular, para abastecer de combustibles a las plantas térmicas a tiempo.

7.5 Resultados para los escenarios de emergencia

Dado que las situaciones de emergencia ocurren de manera intempestiva, el despacho termoeléctrico con líquidos se inicia de manera inmediata. En consecuencia, la respuesta de la termoeléctrica es función de la cantidad de combustible (nivel) almacenado permanentemente en el(los) tanque(s) de la planta, de la cantidad contratada y almacenada en tanques del distribuidor mayorista, y de la respuesta de éste a la solicitud de suministro del generador.

La Tabla 7-14 presenta la autonomía con el tanque propio para generar la ENFICC, la autonomía con el almacenamiento contratado y la autonomía total (la suma de las dos). De otra parte, se presenta el tiempo de arribo del primer embarque (que es el crítico, pues después de éste, los arribos se dan secuencialmente sin mayor facilidad) según información suministrada por los distribuidores mayoristas o el generador, y el transporte desde el puerto hasta la planta. Estos dos tiempos determinan la primera entrega a la planta. Nótese que para Termobarranquilla y Termocartagena no hay necesidad de realizar importaciones debido a que el combustible (mezcla) se entrega con producción nacional principalmente.

El tiempo con déficit (última columna) es el número de días que transcurren entre el agotamiento del combustible almacenado en la planta y en instalaciones del mayorista, y la primera entrega. Las cifras negativas (en verde) indican que las plantas respectivas no tendrían problemas para generar permanentemente su ENFICC, y las positivas corresponden a los días en que la planta quedaría sin combustible (y por lo tanto no estaría en capacidad de generar), hasta la primera entrega con combustible importado.

Planta		Tiempo de autonomía con tanque propio [d] (1)	Tiempo de autonomía con almacenamiento o contratado [d] (2)	Tiempo total de autonomía [d]	Tiempo de arribo del primer embarque [d]	Tiempo de transporte de puerto a termoeléctrica [d]	Tiempo total primera entrega [d] (3)	Tiempo con déficit [d] (4)
Termobarranquilla	FO6	21.3	31.1	52.4	-	1.2	1.2	-51.1
Termocartagena	FO6	14.7	4.1	18.8	-	1.2	1.2	-17.6
Termodorada	FO2	6.4	17.7	24.1	17.0	1.0	18.0	-6.1
Termosierra	FO2	3.3	17.1	20.4	17.0	0.9	17.9	-2.5
Termocentro	JET	2.9	13.7	16.5	17.0	0.9	17.9	1.3
Termovalle	FO2	5.5	2.4	8.0	25.0	0.3	25.3	17.3
Termoemcali	FO2	5.4	-	5.4	25.0	0.3	25.3	19.9
Termoflores	FO2	0.5	4.5	5.0	25.0	0.1	25.1	20.1
Termocandelaria	FO2	2.9	2.5	5.4	30.0	0.1	30.1	24.7

(1) Supone que el tanque está lleno permanentemente

(2) Supone que la capacidad contratada con el Mayorista está siempre llena

(3) Para Termocartagena y Termobarranquilla, este tiempo es desde punto de mezcla hasta la termoeléctrica

(4) Las cifras negativas indican que la logística considerada permite atender de manera satisfactoria las demandas de combustibles para generar la ENFICC diaria en forma continua

- El tiempo con déficit corresponde al número de días en que la planta no puede generar su ENFICC debido a que el tiempo de arribo de la primera importación supera el tiempo total de autonomía
- Después del primer embarque todas las plantas pueden generar su ENFICC
- Para Termoflores la autonomía pasaría de 5.4 a 13.4 días con el nuevo almacenamiento

Tabla 7-14. Tiempos de autonomía, tiempos de entrega y tiempo de déficit en emergencias

Los resultados anteriores se probaron en el modelo de simulación, confirmándose que después de la llegada del primer embarque, todos los consumos a ENFICC para todas las termoeléctricas se pueden satisfacer. Claro se requiere de una gran coordinación por parte de todos los actores involucrados para que funcione la logística.

Nótese que los supuestos más fuertes de este análisis son los siguientes: que el tanque de la termoeléctrica está a un nivel del 100% y que la capacidad contratada con el mayorista está siempre llena. No parece existir obligatoriedad regulatoria en cumplir estos supuestos. Por ejemplo si una termoeléctrica consigue gas para respaldar el 100% de su OEF, cuál es el incentivo para (o qué norma lo obliga a) mantener los tanques propios y los contratados repletos de combustible?.

Se aprecia que 4 plantas (Barranquilla, Cartagena, Dorada y Sierra) no tendrían problema para trabajar continuamente en una emergencia generando su ENFICC. Una planta (Centro solo quedaría indisponible por falta de combustible por 1.3 días, y el resto de plantas (Valle, Termoemcali, Flores y Candelaria) quedarían sin combustible por 17 días o más. En el caso de Flores la autonomía crecería a 13.4 días con el almacenamiento que actualmente (diciembre de 2013) se construye en el puerto de Argos, y el número de días sin combustible sería de 11.6 días.

Evidentemente el supuesto de requerirse un despacho simultáneo a ENFICC de todas las termoeléctricas es altamente pesimista y tendría una probabilidad sumamente baja (difícil de estimar), lo cual debería tranquilizar al operador del sistema, XM, que fue quien solicitó este análisis de escenarios de emergencia.

7.6 Conclusiones

Los análisis presentados en este capítulo muestran que la logística del abastecimiento de FO#2 y JETA1 para atender las demandas termoeléctricas que resultarían de la ocurrencia de sequías como las examinadas, funcionaría siempre y cuando la sequía (p.e. El Niño) se pueda prever con cerca de un mes de antelación, de tal forma que se dé inicio oportunamente al proceso de importación del combustible. Para el caso del FO#6 (o las mezclas equivalentes), la situación es menos compleja debido a que el combustible fundamentalmente es suministrado de fuentes nacionales abundantes (FO#6 y crudos pesados) y su proveedor posee suficiente capacidad para importar los complementos requeridos.

Por otra parte, los despachos de generación termoeléctrica con combustibles líquidos asociados con situaciones de emergencia, son factibles si las plantas mantienen niveles de inventario suficientes en sus tanques y en los almacenamientos contratados, para mantener la generación hasta que llegue la primera entrega. Las entregas posteriores son menos complejas de suministrar.

8 CONCLUSIONES

De los análisis realizados se derivan las siguientes conclusiones relativas a la capacidad de la logística de abastecimiento de combustibles líquidos para generación termoeléctrica en Colombia:

- Para todos los escenarios (y casos) de escasez hidrológica analizados, los cuales son representativos de la hidrología nacional ya que preservan la correlación espacio-temporal histórica de los últimos 30 años, es altamente probable que la logística examinada (existente y la prevista) permita atender las demandas de combustibles líquidos (FO#2, FO#6 y JETA1) estimadas para los próximos 5 años. Esta conclusión está sujeta a la veracidad de la información suministrada por todos los actores (autoridades energéticas, generadores eléctricos y agentes económicos de la cadena de abastecimiento de combustibles líquidos) y utilizada en las simulaciones detalladas.
- La anterior conclusión también está sujeta a que los despachos de las plantas termoeléctricas que utilizan FO#2 y JETA1 puedan preverse con una antelación próxima al mes. Este tiempo es el requerido para realizar la primera importación y luego transportarlo hasta la central. Para el caso del FO#6 el tiempo de antelación es menos exigente (una a dos semanas) debido a que el combustible en buena parte proviene de oferta nacional.
- Las demandas de líquidos analizadas en el escenario estocástico tienen una PNSS del 95%. Esta probabilidad está asociada exclusivamente a la distribución de probabilidad de la hidrología. Es decir, no se consideran otras variables aleatorias como las siguientes:
 - Disponibilidad del sistema de abastecimiento de gas
 - Disponibilidad del sistema de abastecimiento de líquidos
 - Disponibilidad de carro-tanques
 - Disponibilidad del sistema vial
- El mes más complejo del período crítico para el funcionamiento de la logística es el primero en razón de la necesidad de activar simultáneamente todos los elementos de la misma. Una vez superado el primer mes, la logística se acomodará con pequeños ajustes de manera más simple.
- De darse la ocurrencia en 2014 de un escenario de escasez hidrológica similar a los fenómenos de El Niño 91-92 y 97-98 se requerirían volúmenes importantes de combustible líquido en los primeros meses de 2015, así:
 - 44.5 KBDC de FO#2
 - 11.2 KBDC de FO#6
 - 4.4 KBDC de JETA1
- La simulación estocástica indica que de darse la ocurrencia del caso de PNSS 95% para un horizonte de los próximos 12 meses, la generación con líquidos ocurriría a finales del tercer trimestre de 2014, pero de menor magnitud que en los casos de el Fenómeno de El Niño, así:
 - 20.9 KBDC de FO#2
 - 8.7 KBDC de FO#6
 - 0.2 KBDC de JETA1

- En consecuencia, es preciso realizar un seguimiento cuidadoso al avance de las logísticas de los siguientes termoeléctricas, debido a que actualmente dicha logística se encuentra en proceso de ampliación, definición o consolidación:
 - Termocandelaria
 - Termoemcali
 - Termoflores
 - Termovalle
- Dado que la demanda del sistema de abastecimiento de FO#2 de ECOPETROL (con excepción del poliducto Buenaventura-Yumbo) y dados los escasos excedentes para JETA1, la logística para el abastecimiento de las termoeléctricas que utilizan estos dos combustibles se fundamenta en (i) las importaciones por puertos diferentes a los hoy utilizados por ECOPETROL (con excepción de Buenaventura), y (ii) el transporte por carretera (con excepción del poliducto mencionado).
- El abastecimiento de FO#6 (combustóleo o mezclas) se basa en la producción nacional y la capacidad de importación de FO#2 de bajo azufre de Petromil, su proveedor.
- Con el incremento en la producción nacional del JETA1 la demanda para generación eléctrica será cubierta con dicha producción.
- Hay evidencias serias de que el parque de carro tanques actuales es suficiente para transportar los volúmenes de líquidos asociados con despachos importantes de generación.
- La logística [Importar + Transportar por carretera] es compleja y no está exenta de riesgos. Los más evidentes están asociados con el transporte, como son:
 - Protestas de los transportadores
 - Derrumbes y problemas en las vías
 - Crecimiento en la producción de crudo
 - Esta logística requiere de una gran coordinación y flujo de información entre todos los eslabones y agentes de la cadena para que funcione.
- Las plantas más vulnerables son las más lejanas a los puertos de importación
- Comparativamente con el año 2009 (cuando se realizó el estudio anterior), la logística de abastecimiento de líquidos para termoeléctricas ha avanzado significativamente, no solo porque se ha tomado más conciencia de su problemática y se ha estudiado más, sino porque han aparecido nuevos elementos. Es el caso de:
 - Puerto y almacenamiento de Oiltanking en Mamonal al servicio de Biomax
 - Puerto del grupo Argos en Barranquilla
 - Puerto de Exxon-Mobil en Mamonal

9 RECOMENDACIONES

- Dada la magnitud de las demandas de combustible para las termoeléctricas comparada con las demandas regulares (por ejemplo, la demanda máxima contratada por Termovalle es 1.3 veces la demanda regular de la planta de abasto de Yumbo), es conveniente que la reglamentación permita que las termoeléctricas puedan tener contratos con más de un distribuidor mayorista.
- Es necesario simplificar, flexibilizar el SICOM para agilizar el proceso de nominación de combustible para las termoeléctricas. Por ejemplo, se requiere mejorar los tiempos de trámites para desbloqueo de usuarios (sea por póliza o por otras causas). Hoy es muy extenso (3 días hábiles).
- Dada la factibilidad técnica de que algunas termoeléctricas pueden consumir gas y además más de un combustible líquido (caso de Termocentro, Termosierra y Termodorada), es conveniente que se permita el cambio de combustible dentro de la vigencia de la obligación, siempre que éste sea también suministro en firme.
- Se requiere articular las resoluciones CREG 089/2013 y CREG 071/2006 con el fin de permitir contratos de suministro y transporte de gas en firme para respaldar el cargo con duración inferior a 1 año si se consiguen dentro de la vigencia de la OEF.
- Conviene flexibilizar la normatividad para permitir el consumo del FO#2 puro en las plantas termoeléctricas.
- En períodos críticos, conviene contar con permisos de circulación de carro tanques permanentes cuando su destino sea las centrales termoeléctricas. En algunas vías las restricciones se han eliminado, pero en otras no.
- Conviene implementar un mecanismo moderno de información actualizado y abierto a la consulta de los interesados que incluya:
 - Producción/importación: capacidades actuales y planeadas, mantenimiento de refinerías y su impacto en la producción, entrada de nuevos proyectos, cantidades planeadas de importación, capacidad de puertos, etc.
 - Almacenamiento: Información detallada de capacidad de plantas de abastecimiento, tasas de recepción, almacenamiento, tasas de cargue de carro-tanques
 - Transporte: capacidad de poliductos, mantenimientos programados, proyectos de expansión
 - Mercado de combustibles
- La complejidad y los riesgos de la logística [Importar + Transportar por carretera] recomienda gran coordinación entre actores de la cadena. Conviene diseñar un mecanismo permanente y operativo, dotado de los recursos necesarios para ejercer esta labor.

- Sobre el abastecimiento de combustibles líquidos, conviene que algunas empresas de generación mejoren el grado de coordinación entre las áreas comerciales y las áreas técnicas. A veces el contrato del combustible pareciera ser una responsabilidad exclusiva del área comercial, lo cual genera dificultades.