



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA DE SISTEMAS – INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES

ANÁLISIS DEL ABASTECIMIENTO DE GAS NATURAL ANTE LA EXISTENCIA DE FALLAS
EN SU SUMINISTRO EN MÉXICO, UTILIZANDO SIMULACIÓN

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
MONCERRAT PAULINA MUÑOZ ALVERDE

TUTOR PRINCIPAL
DRA. MAYRA ELIZONDO CORTÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, DF., ENERO 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DRA. SÁNCHEZ LARIOS HÉRICA
Secretario: DRA. MONROY LEÓN COZUMEL ALLENEC
Vocal: DRA. ELIZONDO CORTÉS MAYRA
1^{er}. Suplente: M. EN I. TORRES MENDOZA RICARDO
2^{do}. Suplente: DR. DE LA VEGA NAVARRO JOSÉ A. F.

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: UNAM, Facultad de Ingeniería, México, DF.

TUTOR DE TESIS:

DRA. MAYRA ELIZONDO CORTÉS

FIRMA

(Segunda hoja)

Contenido

Introducción	5
1. Problemática	8
1.1 Breve descripción del procesamiento del gas natural.....	8
1.1.1 Transporte de gas natural	10
1.2 Situación en México del transporte de gas natural.....	10
1.3 Fallas en el transporte de gas natural en México	13
1.4 Planteamiento del problema.....	16
1.5 Objetivo General.....	17
1.6 Objetivos específicos.....	17
2. Marco de Referencia	18
2.1 Estado del Arte	18
2.1.1 Revisión de literatura. Modelos de Corto Plazo.....	19
2.1.2 Revisión de literatura. Modelos de Largo Plazo.....	22
2.1.3 Consideraciones finales para el planteamiento de los modelos en el corto y largo plazos..	26
2.2 Marco Metodológico.....	28
2.2.1 Simulación de eventos discretos.....	29
2.2.2 Simulación de Dinámica de Sistemas	32
2.3 Metodología.....	40
3. Desarrollo de criterios de asignación en el corto plazo	44
3.1. Modelo en el corto plazo	46
3.2. Elección de las variables para el planteamiento del modelo de corto plazo	46
3.3. Obtención y procesamiento de los datos.....	48
3.4. Validación de los datos	56
3.5. Definición de los criterios para la asignación de gas natural	60
d. Obtención de los resultados	66
e. Comparación de los resultados	70
f. Definición de las reglas de asignación.....	77
4. Política en el largo plazo: aumento de capacidad	80
4.1 Revisión de Literatura. Modelo de Dinámica de Sistemas	81

4.2	Formulación de la hipótesis dinámica	83
4.3	Diagrama de Influencia.....	84
4.4	Diagrama causal	87
4.5	Diagrama de Flujos y Niveles.....	90
4.5.1	Descripción del modelo de Flujos y Niveles para el problema de largo plazo	90
4.5.2	Valores del modelo de Flujos y Niveles para el problema de largo plazo.....	94
4.5.3	Modelo de Flujos y Niveles para el problema de largo plazo	95
4.6	Verificación y validación del modelo	96
4.6.1	Validación de los datos del modelo de Flujos y Niveles.....	96
4.6.2	Validación del modelo de Flujos y Niveles para el problema de largo plazo	98
4.7	Resultados del modelo para el problema de largo plazo	108
	Conclusiones	112
	Bibliografía	115
	Anexo 1. Tabla del Estado del Arte	120

Introducción

El sector energético de un país es de gran importancia, debido a que su desarrollo promueve el crecimiento de los demás sectores industriales. Por otro lado, la energía juega un papel importante dentro de la generación de empleo. Un suministro estable de energía hace posible operar negocios y empresas que ofrecen bienes y trabajos. Por lo tanto, el sector energético tiene un efecto multiplicador en el ámbito laboral.

Con la finalidad de promover la eficiencia y la sustentabilidad energética, México ha impulsado el aprovechamiento de fuentes de energía renovables y el uso de energías más limpias. Se consideró que el gas natural puede ayudar en la transición al uso de dicha energía. El gas, se transporta principalmente por gasoductos. Sin embargo, la expansión del sistema nacional de gasoductos en México ha sido limitada, lo que ha resultado insuficiente para atender la creciente demanda, derivada de la transición del combustóleo hacia el gas natural. Dada la falta de capacidad de transporte y la creciente demanda, continuamente el sistema se satura. Por seguridad del sistema, se realizan suspensiones al suministro, provocando pérdidas económicas.

Ante esta problemática, en esta investigación se propusieron dos modelos de simulación, uno que solucionara el problema en el corto y otro en el largo plazo. Se optó por ambos modelos ya que se consideró que podría brindarse una solución correctiva al problema de corto plazo; promoviendo acciones que subsanaran los daños a los usuarios más afectados. En cambio, la solución obtenida para el problema de largo plazo se consideró preventiva. Se aplicó a nivel nacional debido a que el sistema de transporte afecta a todo el país.

Se pueden obtener distintas soluciones a una problemática, depende del punto de vista de quien lo analiza. En esta investigación se propusieron dos soluciones complementarias. Se utilizó la simulación para contribuir en la creación de políticas. En el primer modelo se sugirieron acciones para asignar el gas natural cuando la oferta se encontraba restringida y sólo unos cuantos pudieran consumirlo. Se utilizó la simulación de eventos discretos para emular las fallas al suministro, considerando cada falla (falta de suministro) como un evento y así determinar políticas de asignación de gas utilizando

modelos lineales de optimización. En el modelo de simulación, la oferta reducida de gas fue asignada a clientes industriales utilizando distribuciones de probabilidad para determinar cada cuánto ocurrían y cuánto duraban las fallas al suministro. Se eligió el criterio (modelos lineales de optimización) que otorgaba una asignación de gas más adecuada.

En el segundo modelo se propuso una tarifa adicional al precio del gas natural, a fin de desarrollar el sistema de transporte acorde a la necesidad de los usuarios. El objetivo fue la promoción de inversión en gasoductos, así, el transporte se desarrollaría paulatinamente, en función del crecimiento de la demanda. Se utilizó la simulación de Dinámica de Sistemas para poder solucionar el problema de falta de capacidad en el transporte.

La simulación analiza los sistemas complejos, genera una representación simplificada de la realidad que puede experimentarse con ella. Una vez emulado el comportamiento, se pueden extraer conclusiones y tomar decisiones. La simulación es una herramienta que trata de entender el sistema (el mercado de gas natural en México) y se propuso utilizarla pues podrían obtenerse políticas que subsanaran el problema vivido. La simulación de eventos discretos se refiere a sistemas que pueden ser representados por una secuencia o serie de eventos. El tiempo de la simulación avanza de evento en evento. En cambio, la simulación de dinámica de sistemas estudia un sistema a través de sus elementos. El comportamiento del sistema depende sólo de su estructura y de la interacción de sus elementos en el tiempo. Ambas técnicas se consideraron en este tema de investigación.

La gravedad de este problema fue que el mercado de gas natural en México era regulado (el gobierno determina políticas para evitar monopolios) y por ende se debió dar una solución, sin embargo, no se otorgó alguna, desembocando en una grave pérdida económica que este problema ocasionó.

En los próximos capítulos se describirá ampliamente el trabajo de investigación realizado. En el capítulo 1 se describe el contexto del mercado de gas natural en México y problemática planteada. En el capítulo 2 se plantea el marco teórico, se describe el estado del arte (que fungió como sustento al trabajo de investigación) y la metodología aplicada. En el capítulo 3 se describe el modelo en el corto plazo (desde su planteamiento, formulación, validación y presentación de soluciones). En el capítulo 4

se describe el modelo en el largo plazo (planteamiento, soluciones, validación y presentación de resultados).

1. Problemática

1.1 Breve descripción del procesamiento del gas natural

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos simples que se encuentra en estado gaseoso, en condiciones ambientales normales de presión y temperatura. El gas seco es el gas comercial, que está compuesto en un 95% por gas metano (CH_4). Puede contener pequeñas cantidades de etano, propano y otros hidrocarburos; además, puede contener trazas de nitrógeno, bióxido de carbono, ácido sulfhídrico y agua. El gas natural es inodoro, por lo que para su venta comercial se adiciona un odorizante conocido como mercaptano. En la Figura 1.1 se presenta un esquema que muestra los pozos de donde se extrae el gas, retomado de la Administración de Información Energética (*Energy Information Administration*):

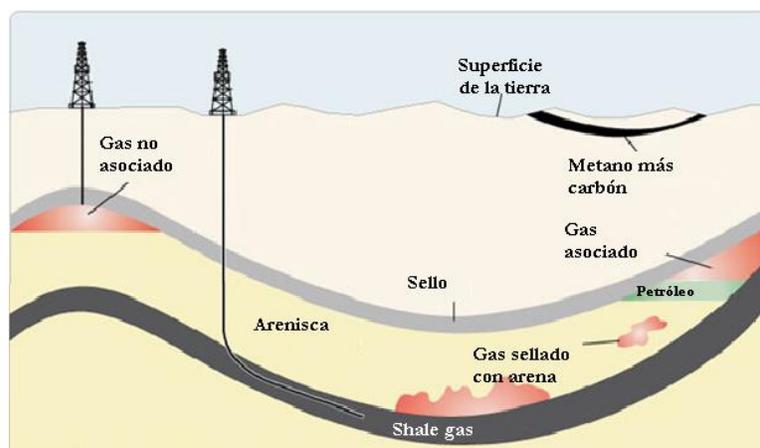


Figura 1.1. Pozos de extracción del gas natural. Fuente: Energy Information Administration (EIA)

En México, la cadena de valor inicia con la exploración y producción de hidrocarburos. Por mandato constitucional, esta actividad corresponde a la Nación a través de Petróleos Mexicanos (Pemex). El gas natural extraído de un pozo puede contener hidrocarburos líquidos y gases sin hidrocarburos. Esto se conoce como gas natural "húmedo". A partir del procesamiento del gas húmedo y de condensados en los Centros Procesadores de Gas (CPG), se obtiene gas natural comercial denominado gas seco y gas LP. El proceso finaliza cuando se envía a través de gasoductos a una empresa de distribución local, y, en última instancia, a los consumidores.

Existen ocasiones en que el gas seco proviene directo de campos, y que por norma cumple su especificación, puede ser directamente inyectado a gasoductos para su transporte y comercialización. En algunos casos, el gas puede almacenarse y aprovecharlo en épocas de mayor consumo, como por ejemplo en invierno. Para su almacenamiento se utilizan sistemas subterráneos, tales como pozos de petróleo y de gas, viejas o cavernas formadas en camas de sal. De manera más detallada, en la Figura 1.2 se muestra el procesamiento de gas natural:

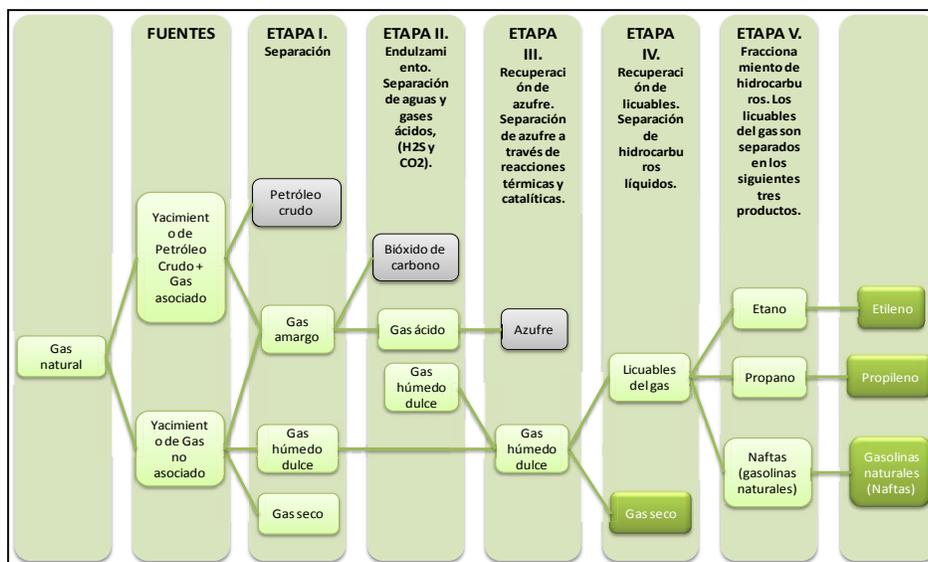


Figura 1.2. Procesamiento del gas natural. Fuente: Secretaría de Energía

Como se ha explicado, el gas natural se transporta a través de gasoductos desde los yacimientos hasta los consumidores. El gas llega a las comunidades en las que se utilizará mediante ductos llamados principales, a partir de éstos, desembocan en conductos más pequeños, llamados "servicios" que se conectan directamente a los hogares o edificios en los que se utilizará.

El gas seco (gas natural comercial) se utiliza como:

1. Combustible en:
 - 1.1. Transporte (autobuses y taxis).
 - 1.2. Hogares (calentadores de agua, estufas, calefacción).
 - 1.3. Comercios (aire acondicionado, calentadores de agua, hornos).
 - 1.4. Industrias (sistema de calefacción, secado, generación de vapor, hornos).

2. Generador de energía eléctrica por medio de plantas de ciclo combinado CCC. Esta tecnología consiste en utilizar la combustión del gas natural y el vapor que producen los gases de escape para generar electricidad de manera complementaria.

3. Materia prima en la elaboración de productos petroquímicos ya que de forma relativamente fácil y económica puede ser convertido a hidrógeno, etileno, o metanol, para fabricar diversos tipos de plásticos y fertilizantes.

1.1.1 Transporte de gas natural

El transporte de gas natural desde el campo de la producción hasta su entrega al consumidor se describe en los siguientes puntos:

- A. Sistemas de recolección; desplazan el gas natural crudo desde el pozo de extracción hasta una planta de procesamiento de gas natural o a la interconexión de una línea principal de transporte.
- B. Plantas de procesamiento; separan el gas natural de líquidos e impurezas antes de entregar el combustible a un sistema de transmisión principal.
- C. Estaciones de compresores (o estaciones de bombeo); ubicadas estratégicamente a lo largo de la longitud de la red de ductos, mantener el gas natural que fluye hacia delante a lo largo del sistema de tuberías.
- D. Las empresas locales de distribución de gas natural ofrecen a los usuarios finales a través de líneas de servicio para uso en residencias y establecimientos comerciales.

Esta descripción se apega mucho a la cadena de valor del combustible en México. En el siguiente apartado se describe la situación en nuestro país para finalmente describir la problemática que se aborda en esta investigación.

1.2 Situación en México del transporte de gas natural

En 1995, se reformó la Ley Reglamentaria del Art. 27 Constitucional en el Ramo del Petróleo, la cual permitió la participación del sector privado en las actividades de transporte, almacenamiento, distribución y comercialización en la industria del gas natural de México. En cambio, la producción, extracción y refinación, hasta el año 2013 seguían siendo actividades exclusivas del Estado a través de

Pemex¹. Dicha reforma, buscaba maximizar los beneficios ligados a este combustible y desarrollar una infraestructura de gasoductos acorde con las necesidades del país. En esencia, permitió la participación privada en actividades que previamente estaban reservadas al Estado a través de Pemex, tales como el transporte, el almacenamiento, distribución por medio de ductos, así como el comercio exterior y comercialización de gas en territorio nacional.

En México, la infraestructura de transporte de gas natural está integrada principalmente por el Sistema Nacional de Gasoductos (SNG) y el sistema Naco-Hermosillo, ambos pertenecientes a Pemex Gas y Petroquímica Básica, así como gasoductos fronterizos en las regiones Noreste y Noroeste, algunos conectados al SNG y otros aislados, estos últimos son propiedad de privados.

El SNG cuenta con una extensión de 8,704 km de longitud y pasa por 18 estados de la República, mientras que el sistema aislado de Naco-Hermosillo se extiende con una longitud de 339 km y está conectado al sur del estado de Arizona en Estados Unidos. Actualmente se permite la participación de la inversión privada en el sector del gas natural.

En México, existen tres tipos de usuarios: residenciales (consumo doméstico y microempresas), comerciales (empresas pequeñas) e industriales. Asimismo, hay 24 estados que consumen gas natural; en éstos, se desarrollan varias industrias que utilizan gas, en la Tabla 1.1 se muestra qué ramas del sector industrial utilizan gas natural (SENER, 2012):

¹ Portal de Pemex Gas y Petroquímica Básica <http://www.gas.Pemex.gob.mx/portalpublico/>

Demanda de gas natural por ramas del sector industrial en México	
Metales básicos	26.40%
Química	14.00%
Productos metálicos, equipo eléctrico y de transporte	11.60%
Vidrio y productos de vidrio	10.50%
Alimentos, bebidas y tabaco excepto cerveza	10.40%
Productos de minerales no metálicos	6.90%
Papel y cartón, imprentas y editoriales	6.00%
Resto de las ramas	6.00%
Textiles, prendas de vestir e industria del cuero	3.50%
Minería	2.10%
Cerveza y malta	1.60%
Cemento hidráulico	1.10%

Tabla 1.1 Demanda de gas natural por sector industrial. Fuente: Estrategia Nacional de Energía 2013-2027

El gas se usa ampliamente en diversas industrias de México. En la Figura 1.3 se muestran los diversos usuarios y el porcentaje de uso de cada usuario en el país:

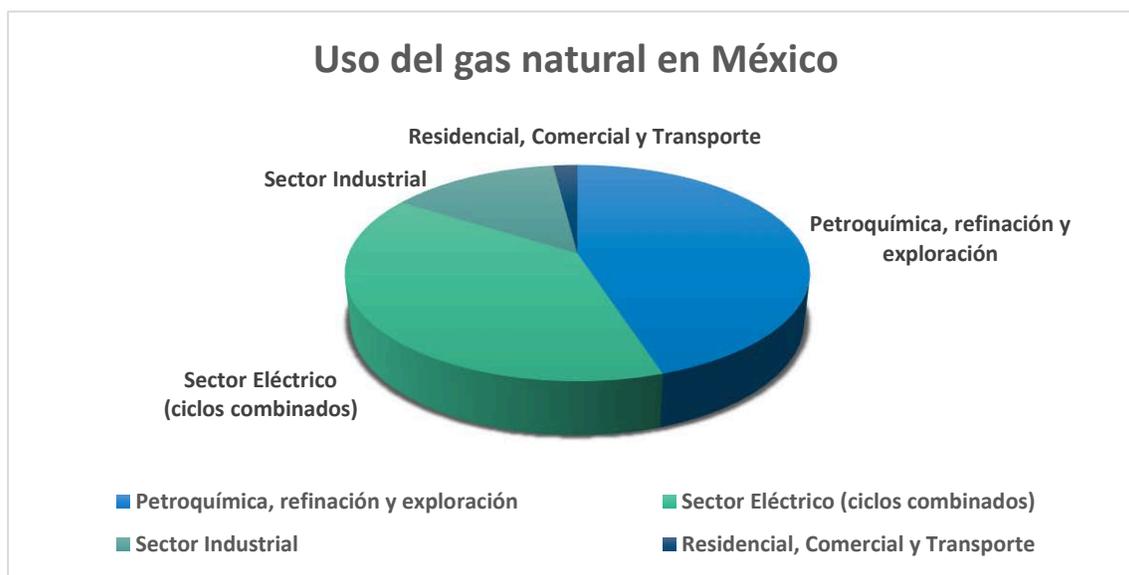


Figura 1.3 Porcentaje de uso del gas natural por sector en México. Fuente: Elaboración propia.

La distribución de la infraestructura, la ubicación de los centros industriales, las actividades petroleras, los puntos de generación de electricidad y concentración poblacional, son factores importantes que determinan el consumo de gas natural en cada Estado. Hasta el 2014, Pemex Gas y Petroquímica

Básica, transportaba el gas natural a los grandes consumidores, así como a la entrada de las ciudades. En cuanto a la distribución al interior de las urbes, en la mayoría de los casos, estaba a cargo de empresas privadas de distribución.

Pese al importante potencial productivo de gas natural en el país, existen restricciones que se tienen que considerar para explicar el déficit entre la oferta nacional. Es necesario examinar las condiciones de suministro y del sistema de transporte del hidrocarburo. En la siguiente sección se describe esta problemática.

1.3 Fallas en el transporte de gas natural en México

A partir de la apertura de la industria, la demanda de gas natural ha crecido constantemente. Desde principios del año 2000, ha aumentado la necesidad de importar mayores volúmenes de gas para satisfacer la demanda interna. Del 2000 al 2012 el consumo ha crecido en promedio 6% cada año, mientras que la producción únicamente un 3.4%, lo que ha desembocado en un aumento de las importaciones, un 19% anual. Durante el año 2014, el 30% de la demanda nacional fue cubierta con importaciones provenientes fundamentalmente de E.U. a través de gasoductos. (SENER, 2012)

Aunado al problema de la caída en la producción de gas y la creciente dependencia del exterior para satisfacer la demanda, México tiene un problema adicional, que es la falta de infraestructura para transportar dicho combustible (Vargas, 2013). Esta última ha crecido marginalmente, de 1995 a la fecha la infraestructura de transporte ha crecido únicamente 1.1% cada año y se encuentra saturada en varias regiones. (SENER, 2012)

A pesar de ser una industria desarrollada, la falta de inversión en el transporte y el crecimiento de ésta han dificultado el suministro de gas, pues no ha habido una planificación del Sistema Nacional de Gasoductos. En la Figura 1.4, se muestra un mapa del Sistema Nacional de Gasoductos (SNG):



Figura 1.4. Sistema Nacional de Gasoductos en México. Fuente: ENE 2013-2017

Durante los años 2011 a 2013, las industrias sufrieron severas restricciones del suministro de gas natural suspendiéndose el suministro hasta por más de 72 horas en cada ocasión, denominadas alertas críticas. Las alertas críticas se definen como declaración que hace el transportista por cierto periodo, debido a que existen condiciones de riesgo operativas que afectan la prestación del servicio en el sistema de transporte de gas natural, (SENER, 2012). La alerta se emite cuando las condiciones de operación no son seguras para continuar operando el gasoducto y entregar gas a los clientes.

No obstante, aún no existe un recurso legal, que permita a Pemex suspender el suministro de gas a los usuarios industriales. Ante una causa de fuerza mayor puede suspenderse el suministro de gas total o parcialmente, (SENER, 2014). Sin embargo, estas alertas críticas fueron frecuentes y los usuarios experimentaron consecuencias económicas, generando a su vez, pérdidas en la industria. Ante eventos tan recurrentes, era necesaria una acción correctiva, no obstante, ésta nunca se planteó.

El aumento en la demanda nacional y las restricciones físicas existentes en la capacidad de transporte, desembocaron en (Lajous Vargas, 2013):

- Saturación de transporte en el Sistema Nacional de Gasoductos, cercanos a su límite de capacidad, es decir, con niveles de uso de 85% o mayores.
- Limitaciones en la disponibilidad del transporte de gas natural, entre los puntos de oferta y los puntos de consumo, lo que hizo inviable la importación de un mayor volumen de gas natural.

El diagnóstico a esta situación fue una red de gasoductos al borde del colapso, pues como ya se mencionó, continuamente se debió suspender el suministro y liberar la presión de los ductos a fin de no causar daños al sistema de transporte. En el año 2013, estas restricciones generaron que los consumidores industriales redujeran sus niveles de consumo, o sustituyeran el gas natural por otros combustibles más caros y contaminantes.

Durante el 2012, el sector industrial perdió alrededor de 16,350 millones de dólares a causa de 109 alertas críticas, de acuerdo con la Confederación de Cámaras Industriales (CONCAMIN) (Rodríguez, 2013). La Secretaría de Economía informó que las industrias más afectadas fueron: industrias del acero, cemento, vidrio, automotriz, químico, metalmecánica, fabricación de llantas, cartón, aceites y la industria agroalimentaria (López, 2013). Por su parte, la CFE registró pérdidas por 18 mil 900 millones de pesos por desabasto de gas en 2012 (Cruz Serrano, 2013).

Para cubrir el déficit entre oferta y demanda, fue necesario diversificar las fuentes de suministro, para lo cual se consideraron las siguientes alternativas: importación por la frontera norte (Chihuahua y Tamaulipas) de gas natural de los Estados Unidos, así como importación de gas natural licuado (GNL). Sin embargo, el GNL resultó mucho más costoso. Normalmente, el gas importado que ingresa por ductos en el norte del país, tiene un precio que oscila entre los 3 ó 4 dólares por millón de BTU. En cambio, el GNL oscila entre 22.45 y 16.47 dólares por millón de BTU (Cruz Serrano, 2013).

La situación descrita se resume en que el Sistema Nacional de Gasoductos intentaba hacer frente a la demanda, lo que produjo una saturación en el sistema. Una solución inmediata fue decidir un punto donde liberar la presión provocada por dicha saturación, generando suspensiones en el suministro. Las zonas más afectadas fueron el Centro y Occidente del país, donde los sectores industriales resultaron los más afectados, pues tuvieron que:

- Reducir sus niveles de consumo o sustituir el consumo de gas natural por otros combustibles más caros y contaminantes.

- Incurrir en pérdidas económicas causadas por la suspensión del gas, pues se generaron pérdidas derivadas de su baja producción.

Los problemas actuales tendrán solución en el largo plazo e implican diversos cambios que reestructurarán el mercado en México, por lo que es incierto el tiempo que tomará este cambio. Sin embargo, la problemática y sus consecuencias afectaron seriamente la industria y no puede haber duda que esto pueda repetirse nuevamente. Una solución planteada en el largo plazo fue ampliar la red de gasoductos. Se planeó que para el periodo 2014 – 2019 se construyeran diversos gasoductos que permitirán abastecer gas a nuevas zonas y disminuir las irregularidades. Con dichos proyectos se espera que disminuyan las importaciones de GNL. Basta mencionar que hasta ahora, las importaciones de gas natural licuado, han encarecido el precio del gas en México, donde el sector más afectado ha sido el industrial. Las tarifas de transporte del gas natural y de electricidad aumentaron durante el 2012 y 2013, ya que CFE es un gran consumidor de dicho energético y tuvo que aumentar sus tarifas derivado de las importaciones de GNL (Vargas, 2013).

Como se puede observar, el problema central fue: la falta de capacidad en el transporte de gas natural, debido a diversos cuellos de botella en la red nacional de gasoductos. Esto provino de la falta de inversión y mala planificación en infraestructura en la industria de gas, provocando fallas al suministro y riesgos a la seguridad del sistema de transporte. Lo que finalizó en pérdidas económicas por 1) la falta de combustible y; 2) sustitución del gas por otros combustibles más costosos.

Así, esto desemboca en el planteamiento del problema a abordar en la tesis, mencionado en el siguiente apartado, así como los objetivos de esta investigación.

1.4 Planteamiento del problema

El problema de investigación es la falta de capacidad en el sistema de transporte de gas natural. Ante falta de capacidad, la pronta respuesta es aumentar dicha capacidad mediante el desarrollo de gasoductos. Sin embargo, la ampliación del sistema de ductos tomará tiempo. Es por esto que debe optarse por una solución correctiva, mientras se desarrolla la red de gasoductos. En esta investigación se propusieron dos soluciones:

- A. Correctiva: que se aplicaría mientras finaliza la expansión del sistema de gasoductos y;

- B. Preventiva: que buscaría ampliar el sistema de transporte de gas y eliminar de raíz el problema de falta de capacidad.

La falta transporte de gas natural y la demanda creciente provocan la existencia de alertas críticas, por lo que, si se expande la red de gasoductos, las fallas al sistema se eliminarían. Por tanto, el problema se definió como:

En el corto plazo no existen medidas que subsanen las pérdidas económicas que ocurren debido a la falta de infraestructura en el transporte de gas natural. Aunado a esto, en el futuro tampoco se han definido políticas que en el largo plazo prevengan la falta de capacidad en el transporte de gas natural.

1.5 Objetivo General

Definir acciones que disminuyan el impacto negativo del desabasto de gas natural en presencia de alertas críticas utilizando simulación de eventos discretos. Así como definir medidas o reglas que eviten futuras fallas en el suministro desabastos utilizando modelos de simulación de Dinámica de Sistemas.

1.6 Objetivos específicos

- Analizar y pronosticar la demanda de gas natural para cada sector industrial.
- Definir dos funciones de distribución de probabilidad, una para el tiempo entre fallas o alertas críticas y otra para la duración de éstas.
- Construir el modelo de simulación de la demanda de gas natural de los sectores industriales.
- Crear escenarios con diferentes volúmenes de gas natural, identificar qué sectores industriales son limitados o racionados y crear políticas de suministro con respecto a la necesidad del suministro.
- Por cada alerta crítica aplicar los cuatro criterios de asignación propuestos.
- Establecer tasas de crecimiento para la demanda de gas natural.
- Diseñar un modelo de Dinámica de Sistemas que defina qué comportamiento debería tener el desarrollo de la infraestructura de transporte.
- Analizar los resultados de ambos modelos y crear lineamientos que contribuyan a la creación de políticas.

2. Marco de Referencia

En el capítulo anterior, se definió que el problema de las fallas del suministro de gas surge de la falta de capacidad en el sistema de transporte. También se explicó que el aumento de la infraestructura llevaría tiempo, por lo que las fallas persistirían hasta que el sistema de transporte pudiera abastecer la demanda solicitada, lo cual sucedería en el largo plazo. Una vez definido el problema, la falta de transporte de gas natural, lo siguiente fue analizar el sistema y su problemática para encontrar información que indicara diversas metodologías de solución.

2.1 Estado del Arte

Como todo recurso, el gas natural es un recurso escaso que debe asignarse a sus diferentes usuarios. La industria del gas se puede ver como una cadena de suministro, con varios proveedores y varios clientes o usuarios. En México, en un amplio sentido, la cadena de suministro se muestra en la Figura 2.1:

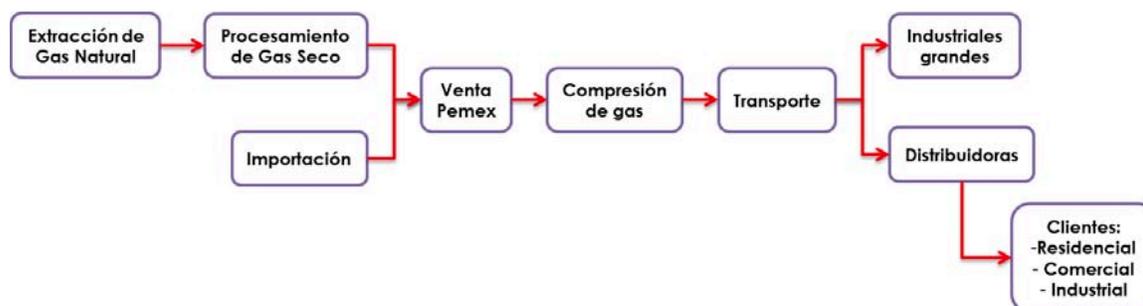


Figura 2.1. Cadena de suministro de gas natural en México. Fuente: Elaboración propia.

Después de estudiar la problemática general, se optó por analizar en dos etapas, una en el corto plazo y otra en el largo plazo, pues se buscaron dos soluciones: la primera correctiva (corto plazo) y la segunda preventiva (largo plazo).

Al revisar la literatura, se buscaron temas relacionados con diversas características:

1. Asignación de un bien a diversos usuarios; ya sea ante suspensiones, ante incertidumbre o limitaciones en el suministro de un bien.
2. Análisis de la cadena de suministro de gas natural; desarrollo de capacidad, crecimiento del mercado, desarrollo de nuevos clientes.

3. Incremento de capacidad; se analizaron las aplicaciones o creaciones políticas, planes a futuro, etc.

Por lo que los modelos encontrados en literatura podrían agruparse en:

- I. modelos de optimización;
- II. modelos de equilibrio y;
- III. modelos de simulación.

Tomando en cuenta estas dos clasificaciones, por plazos y tipo de modelo, se clasificaron diversos documentos que abordaban problemáticas parecidas a las planteadas en este trabajo. Describiendo los modelos encontrados, para el corto plazo se encontraron modelos de equilibrio y de optimización; en el largo plazo se identificaron modelos de diseño de políticas con simulación de Dinámica de Sistemas.

En el Anexo 1, se muestra la tabla 2.1 que describe brevemente las fuentes revisadas que sirvieron como fundamento de esta investigación.

2.1.1 Revisión de literatura. Modelos de Corto Plazo

En cuanto a literatura estudiada para modelos de corto plazo, se encontraron estudios que modelaban la cadena de suministro para planear la asignación del combustible. Desde modelos de programación lineal, programación entera mixta multi-periodos hasta diferentes aplicaciones de simulación. En cuanto a modelos de optimización y asignación de oferta, se observó que existen diversas investigaciones centradas en las cadenas de suministro bajo diferentes aspectos; dichos modelos, ayudan a visualizar el comportamiento de la cadena de suministro. Más adelante se hablará a detalle de esta literatura.

Se observó que se centraban en la asignación o planificación de un bien, utilizaban programación lineal, entera o entera mixta. El objetivo de los modelos se centraba en encontrar una solución rápida, de fácil aplicación y centrada en una minimización o maximización. Por ejemplo, Duffuaa, Al-Zayer y Al-Marhoun (1992), presentaron un trabajo en el que se estudió el impacto de la producción de petróleo en el suministro de gas a las industrias básicas. El modelo de programación lineal se utilizó para investigar la futura disponibilidad de gas para las industrias más importantes, sujeta a diferentes

topes de producción de petróleo. La importancia que reflejaba este documento fue la necesidad de estudiar a fondo la cadena de suministro y realizar un análisis sobre la necesidad de un combustible en el sector industrial. El objetivo principal del modelo fue encontrar la producción mínima de petróleo que satisficiera a las industrias desarrolladas. Así, la producción mínima de petróleo estaba en función de la satisfacción de la demanda y el cumplimiento del marco regulatorio.

En la investigación de los autores Hamedi, Zanjirani y Moattar (2009), se presentó un modelo de optimización multi-periodo para la planeación de la distribución en diferentes etapas de la cadena de suministro de gas natural (producción, refinería, distribución, usuario final). De acuerdo con los autores, un apropiado diseño de la red de distribución puede facilitar el cumplimiento de una variedad de objetivos como el bajo costo y la alta calidad de la respuesta al cliente. En este artículo, los autores plantearon un modelo de programación entera mixta no lineal multi-periodos. Las restricciones del modelo fueron caracterizadas en seis grupos: capacidad, balanceo (entradas y salidas de gas), satisfacción de demanda, continuidad de flujo, de condiciones de entrega y restricciones binarias. La función objetivo minimizaba el total de los costos relacionados con la distribución. Debido a esta modelación, el espacio de soluciones fue discreto, lo que hizo perder cierta sensibilidad de los datos en el modelo. No obstante, la programación entera mixta ha sido usada ampliamente en problemas del sector energético, en especial en el petróleo y gas natural. Cabe mencionar que la mayoría de estos modelos se enfocan a la minimización de costos.

Contesse y Ferrer (2005) utilizan programación entera mixta. En cambio, Kannan y Palocsay (1996) utilizaban programación lineal y programación estocástica. Ambos presentaron un modelo que se enfocaba en las decisiones de la estrategia de la cadena, minimizando costos (transporte, almacenamiento y entrega) y esperando cumplir con la seguridad del suministro. Se consideraron patrones de demanda variable bajo distintos escenarios. Además, se tomaron en cuenta inventarios y posibles reducciones en el suministro. Las restricciones de este modelo involucraron la cantidad de gas entregada y la cantidad de gas demandada en una ciudad, los niveles de inventario y el nivel de respuesta o de transporte al cumplir con la demanda.

Continuando con esta línea, en 1992, se realizó un estudio en el que se consideraron no sólo los costos anteriormente mencionados sino también la confiabilidad en el suministro de acuerdo a los contratos de compra de gas adquiridos y la incertidumbre en el precio. Los autores, Avery, Brown,

John y Wood, deseaban empatar la demanda y el suministro de gas. Utilizando distintas fuentes de suministro se debía asignar el gas a distintos clientes, algunos con la posibilidad de sufrir recortes si excedían a la capacidad de suministro asignada. Las demandas fueron ordenadas con respecto a su prioridad y fueron asignadas a cada una de las fuentes hasta agotarlas. Este modelo se vuelve complicado cuando los contratos de suministro exigen niveles mínimos y máximos de compra (Avery, Brown, John, & Wood, 1992). Su propósito fue desarrollar uno que simplificara la selección de contratos de suministro basados en las condiciones contractuales de compra y brindar seguridad del suministro de los clientes, tomando en cuenta su nivel de prioridad. Por lo que la función objetivo trató de minimizar costos y cumplir con la demanda bajo un modelo entero mixto lineal; donde las restricciones son operativas, tales como la capacidad de transmisión, de suministro y demanda de los usuarios. El modelo fue resuelto con simulación y estimación / optimización de la superficie de respuesta para solucionar el problema de suministro mixto (un usuario con varias fuentes de suministro o una fuente a varios usuarios finales). La última metodología se utilizó para aproximar la función objetivo pues se buscó una simplificación de la búsqueda del óptimo y evitar hacer un gran número de simulaciones.

En 1986 Charnes, Cooper, Gorr y Hsu (Charnes, Cooper, Gorr, & Hsu, 1986), se decidió regular la interrupción ante una escasez del combustible mediante la programación de restricciones. La finalidad de este estudio fue establecer métodos que mejoraran las intervenciones del gobierno ante estos problemas. Cada régimen de decisión tuvo un modelo de decisión distinto aplicable a una gama particular de decisiones de emergencia. Las reducciones directas de consumo a los usuarios finales del sector industrial se basaron en la minimización de costos. A cada consumidor no residencial se le asignó una cantidad mensual de gas, definido como el consumo máximo permitido para los usuarios bajo el régimen de reducción. El rendimiento del sistema implicó un proceso estocástico multivariado que incluyó tanto variables controlables como no controlables. Los recortes de gas o acciones de emergencia deben modificarse periódicamente para adaptarse a las condiciones cambiantes, por lo que los modelos de decisión para la reducción y sistemas de decisiones de emergencia implican decisiones entre distintos periodos para los cuales se usó un modelo de programación por restricciones.

Otro modelo propuesto y ampliamente citado escrito por (O'Neill, Williard, Wilkins, & Pike, 1979), se asignaba el suministro de gas a sus diferentes usuarios con distintas prioridades, dadas por

regulaciones gubernamentales al ocurrir una escasez de gas. En este modelo se consideraron múltiples sistemas de transmisión de gas. Los usuarios fueron divididos en nueve categorías, esquematizadas por prioridades. La red de transporte estaba compuesta de dos tipos de arcos y nodos: los arcos físicos y los nodos que realmente existían en la práctica y unas contrapartes falsas que estaban para la conveniencia del modelo. La función objetivo definía la cantidad de gas transferido entre los dos sistemas, es el conjunto de arcos físicos que conectan dos sistemas para cada prioridad. Cada sistema fue representado como un nodo en el cual se conservaba el balance de gas. En las restricciones, se esperaba que, de acuerdo con la capacidad de almacenamiento, no se suministrara más gas del que podía contener.

A pesar que estos modelos reflejaban una situación de emergencia en la que se debía suspender el suministro de gas, la modelación no mostró la incertidumbre de los diversos factores involucrados. Se mostraron modelos de programación no lineal, así como modelos estocásticos complementarios, sin embargo, todos estos resultaron muy complicados de resolver. Es por eso que los métodos de simulación, así como los modelos de optimización, son una opción para plantear un posible modelo que represente los factores de incertidumbre y variación en el tiempo. Además, que permitan tomar una decisión en un lapso corto de tiempo que den solución al problema planteado.

2.1.2 Revisión de literatura. Modelos de Largo Plazo

Se observó que cuando se deseaban diseñar políticas que involucraban diversos usuarios ante incertidumbre en el largo plazo, se utilizaba la simulación de Dinámica de Sistemas. La Dinámica de Sistemas es un enfoque adecuado para modelar la presencia de múltiples factores del sistema de transporte de gas natural: comportamientos de los consumidores, transformaciones tecnológicas, avances en los procesos de producción, cambios en las regulaciones del mercado y variaciones en los ciclos económicos.

Para el problema de largo plazo planteado, se buscaron artículos que plantearan políticas o reglas que propusieran un incremento de capacidad. De los diversos documentos encontrados, se eligieron aquéllos centrados en la Dinámica de Sistemas pues se ha utilizado este tipo de simulación en diversas investigaciones en el ámbito de energía. En este caso, se describirán los modelos que se enfocan en la

creación de políticas que ayuden a cumplir con una demanda esperada. En 2005, Olaya y Dyner, remarcaron que los modelos para el análisis de políticas deben tener en cuenta las relaciones complejas en la industria del gas y sus interacciones con los otros sectores. En el artículo señalan que para que exista un equilibrio entre la producción y la demanda en un mercado de gas natural depende de los ductos, su capacidad y funcionamiento. El aumento de demanda puede ser una señal para la inversión de una mayor capacidad de transporte de gas. Mencionan que una solución óptima va a satisfacer las demandas regionales y las restricciones en los volúmenes que se pueden realizar a través de los distintos gasoductos de la red. El modelo propuesto debía tratar de reducir los costos totales de producción y transporte, con las restricciones impuestas por la demanda y la capacidad de los gasoductos. Es por esto que se evaluó el modelo al comparar los resultados de la simulación con datos históricos para el período 1980-1997 para el caso de Colombia.

De acuerdo con Teufel, Miller, Massimo y Wolf (2013), existen características importantes como los factores diferenciales que comparan la metodología de Dinámica de Sistemas con los enfoques convencionales de modelado de mercado de gas natural. Características, tales como retrasos en la industria y el desarrollo de nuevas energías, tecnología avanzada y de rápido crecimiento; las limitaciones y agotamiento de recursos; las fluctuaciones de precios; el aumento de los costos; la demanda creciente; la contaminación y los problemas ambientales, problemas políticos, etc. El sector energético tiene una de los sistemas más complicados en el mundo y debe ser visto de manera integral (Kiani, Mirzamohammadi, & Hossein Hosseini, 2010). Por lo tanto, las decisiones y sus desarrollos se pueden modelar de forma descriptiva, considerando delimitada racionalidad.

La Dinámica de Sistemas, permite el modelado de incertidumbres relativas a los precios, la calidad de la información, la demanda futura y especificaciones reglamentarias esperadas (Teufel, Miller, Massimo, & Wolf, 2013). La consideración de incertidumbre en el modelo se conoce como "previsión imperfecta". Continuando con estos autores, consideran que los modelos que se aplican a energía se pueden dividir en:

- *Bottom – Up*; donde la optimización y la simulación son parte del enfoque de abajo hacia arriba de la cadena. Los modelos de optimización se denominan también modelos parciales, ya que se centran en sectores definidos y no cubren en su totalidad las interacciones de los elementos.

Los modelos de simulación se centran en un sistema a través del tiempo, entre éstos se encuentran los modelos de Dinámica de Sistemas.

- *Top – Down*; donde los modelos de equilibrio son parte de los enfoques de arriba hacia debajo de la cadena. Estos modelos tienen una perspectiva más macroeconómica y tratan de modelar la evolución dentro de toda la economía que abarca los sectores más relevantes.

En cuanto a la simulación de Dinámica de Sistemas aplicado en la creación de políticas referentes a la energía se consideraron varias publicaciones. La más importante de ellas, es (Naill & Belanger, 1992). Este modelo integrado de suministro y demanda de energía de los Estados Unidos fue llamado FOSSIL₂, que se utilizó para preparar proyecciones del análisis de política energética en el Departamento de la Oficina de Políticas, Planeación y Análisis de la Energía. El modelo FOSSIL₂ se ha utilizado regularmente como una herramienta para el análisis de la política energética nacional. El autor considera que la energía siempre había sido una buena área del problema para aplicar la metodología de Dinámica de Sistemas. El crecimiento constante de la demanda de energía, el agotamiento de los recursos (petróleo y gas), y las largas demoras en la implementación de fuentes de energías alternativas plantearon la probabilidad de un severo desabastecimiento de energía doméstica. Este modelo trata de crear políticas de planificación de energía de manera holística, tomando los elementos que están relacionados con los consumos de petróleo y gas. Este modelo desea, de manera integral, tomar decisiones a través de diversos escenarios que prueben diversas políticas y observar, mediante las diversas interacciones, los resultados finales.

Se publicaron dos investigaciones que utilizan Dinámica de Sistemas para analizar el mercado de gas natural en China. Uno de ellos, cuyos autores son, (Jingchun, Ding, & Fan, 2010), el modelo de Dinámica de Sistemas de oferta y demanda de gas natural describe la relación que existe entre cada factor del sistema. Se deseó conocer el nivel de desarrollo económico del sector de gas. Además, se utilizó para predecir el nivel de demanda de gas mediante el consumo de energía registrado en años anteriores. Para este modelo, se tomó como suposición que el suministro se encontraba influenciado por la tasa de exploración y explotación de recursos naturales, la tecnología y la capacidad para realizar dichas actividades. En cuanto a la demanda, se tomaron varios factores como el crecimiento de ésta de acuerdo a la demanda anual de energía y en particular de gas. Se crearon modelos de series de

tiempo para conocer o predecir la demanda. Finalmente, se crearon políticas sobre cómo debía ser la exploración y explotación de recursos bajo ciertos supuestos: el desempeño de la economía, la estructura energética, la cantidad de recursos de China, el crecimiento de la demanda de gas, la eficiencia energética y la inversión.

El segundo artículo, de (Chyong Chi, Nuttall, & Reiner, 2009), se deseó conocer el comportamiento general de la industria del gas. Tomó tres sectores principales: exploración (producción), consumo y demanda y sustitución (usuario final). Los supuestos que manejó fueron: un solo productor de gas, precios constantes y no toma en cuenta importaciones ni exportaciones. De todas las variables propuestas, realizó estructuras de comportamiento, basadas en las relaciones de las variables y divididas entre los tres sectores. La simulación consideró regresiones lineales de los datos históricos, como volumen de producción, de consumo, precios y mercado en general. El modelo tuvo como objetivo examinar diversas políticas que pudieron afectar el desarrollo de la industria, bajo distintos escenarios.

En el artículo de Xu Dong y Dash Wu (2010), se desea realizar un estudio de la planificación de la industria del gas en una ciudad de China. En este caso, se utilizó la programación aproximada multi-objetivo y la simulación de Dinámica de Sistemas. El objetivo del estudio fue probar la capacidad de la programación aproximada para predecir el posible fracaso empresarial de la industria. Se decidió utilizar ambas herramientas ya que se necesitaba describir con eficacia los factores externos difusos y aleatorios de los precios del gas. Además, la simulación se utilizó para estudiar el sistema complejo de la industria del gas y pronosticar tendencias.

En el artículo de Junchen, Xiucheng y Jianxin (2011) se utilizó un modelo para predecir los consumos de gas natural. Se dividió el consumo de gas en cuatro subsistemas: industria primaria, secundaria, terciaria y consumo residencia. Los autores justifican que el pronóstico del consumo debido a las dificultades significativas con el establecimiento de un modelo preciso debido a la complejidad del consumo de dicho combustible. Los factores que se tomaron en cuenta: estrategias de producción, política industrial, crecimiento del PIB, construcción de infraestructura y cambio de patrones en la demanda. El consumo de los diferentes sectores se pronosticó por separado para captar mejor la

realidad de la estructura económica de China. En esencia, el PIB y la población total fueron dos factores claves dominantes para proyectar el futuro el consumo de gas natural.

Finalmente, Ansari y Seifi (2012) decidieron estudiar el impacto de la política de eliminación de los subsidios al consumo de energía en la industria del acero bajo diversos escenarios de producción de acero. Se consideró la exportación y el apoyo a las políticas del gobierno en la expansión de la capacidad para los próximos 20 años. Se utilizó la Dinámica de Sistemas para estudiar el comportamiento de la demanda de energía y de sus consumidores en la industria siderúrgica; se consideró la demanda del acero, su producción y el consumo de energía en un marco integrado. Decidieron este tipo de simulación pues consideraron que la estimación de la demanda del sector siderúrgico es un problema complejo debido a los diversos participantes y los procesos de retroalimentación entre los sistemas y los diversos tipos de retrasos del mercado.

2.1.3 Consideraciones finales para el planteamiento de los modelos en el corto y largo plazos

En situaciones adversas como lo es la suspensión total o parcial del suministro de gas, la modelación de la cadena de suministro, involucró distintos aspectos regulatorios y legales, así que el problema se volvía muy complejo y amplio. Una forma en la cual los artículos daban solución a estas situaciones fue mediante la creación de estrategias o políticas. Por estas razones, se concluyó que la simulación era una herramienta apta para la problemática planteada. Ésta puede modelar situaciones emergentes, como lo es la suspensión del suministro, las reservas del recurso y el clima. Se consideró como una herramienta apta para hacer frente a diversas incertidumbres en los sistemas de gestión de recursos energéticos.

Una característica fundamental de la demanda de gas natural es su alta variabilidad. Factores como el clima y desarrollo de actividades industriales afectan directamente los consumos de los sectores residenciales y comerciales. A excepción de los artículos que utilizaban simulación o programación estocástica, los demás escritos revisados, mostraron poco estas variaciones en los modelos.

En la tabla 2.1 se agrupan los artículos revisados que se tomaron como referencia en este trabajo:

Modelo Corto Plazo				Modelo Largo Plazo			
Año	Autores	Título	Modelo	Año	Autores	Título	Modelo
1992	Duffua, Al-Zayer, Marhoun	A Linear Programming Model to Evaluate Gas Availability for Vital Industries in Saudi Arabia	Programación lineal	2005	Olaya, Dyner	Modelling for policy assessment in the natural gas industry	Simulación de Dinámica de Sistemas
2009	Hamed, Zanjirani y Moattar	A distribution planning model for natural gas supply chain: A case study	Programación entera mixta no lineal multiperiodo	2013	Teufel, Miller, Massimo, Wolf	Review of System Dynamics models for electricity market simulation	Simulación de Dinámica de Sistemas
1996	Kannan, Palocsay, Stevens	An optimization model for planning natural gas purchases, transportation, storage and deliverability	Programación entera mixta estocástica	2010	Kiani, Mirzamo Hammadi, Hossein	A Survey on the Role of System Dynamics Methodology on Fossil Fuel Resources Analysis	Simulación de Dinámica de Sistemas
2005	Contesse, Ferrer, Maturana	A Mixed-Integer Programming Model for Gas Purchase and Transportation	Programación entera mixta	1992	Naill, Belanger	A Systems Dynamic model for national energy policy planning	Simulación de Dinámica de Sistemas
1992	Avery, Brown, Rosenkranz, Wood	Optimization of purchase, storage and transmission contracts for natural gas utilities	Programación entera mixta y simulación	2010	Jingchun, Ding, Fan	The simulated system dynamics analysis of the natural gas supply and demand	Simulación de Dinámica de Sistemas
1986	Charnes, Cooper, Gorr, Hsu, Cheng	Emergency Government Interventions: Case Study of Natural Gas Shortages	Programación multivariada estocástica	2009	Chyong Chi, Nuttall, Reiner	Dynamics of the UK natural gas industry: System dynamics modelling and long-term energy policy analysis	Simulación de Dinámica de Sistemas

Tabla 2.1. Artículos referentes a los problemas planteados en el corto y largo plazos. Fuente: elaboración propia.

Después de la revisión de la literatura, se propusieron dos estudios:

- a) En el corto plazo; se propuso un modelo de simulación de eventos discretos que permitiera saber en qué momento sucedería una alerta crítica y cuánto duraría. Posteriormente, por cada alerta crítica se aplicaron cuatro criterios de asignación, los cuales eran modelos de optimización, a fin de crear una jerarquía o una preferencia en los consumos.
- b) En el largo plazo; se propuso un modelo de Dinámica de Sistemas que estableciera un comportamiento de la demanda y de cómo debería crecer la infraestructura a modo de cubrir la primera. De manera adicional, se modeló una tarifa, basada en los costos de inversión. La infraestructura de la oferta debe prevenir el crecimiento de la demanda a fin de evitar suspensiones al suministro. Se propone la obtención de una tarifa que cubra los costos de inversión; dicha tarifa se aplicaría a todos los usuarios.

2.2 Marco Metodológico

Un sistema es una colección de diferentes elementos que juntos producen resultados que no pueden obtenerse si los elementos no se encontraran relacionados. Las características y funciones propias de sus elementos y las derivadas de las interacciones entre sus elementos, son necesarias para producir un sistema. Es importante destacar que el valor del sistema en su conjunto es la relación entre las partes (Modeling and Simulation Center, 2010). Muchas veces se desea estudiar un sistema o parte de éste, por lo que es necesario estudiar las relaciones y sus elementos correspondientes.

Modelación significa hacer una representación lógica, por lo general simplificada, del mundo real o del sistema a estudiar. Al modelar el sistema, no todas sus características se incluyen, aquéllas que sí, son las que ayudan a estudiarlo. Es por eso que algunos de los componentes del sistema se consideran más importantes que otros; así, un modelo es una representación de las partes de un sistema más relevantes para el estudio. Un modelo, es una representación física, matemática, o de otra manera lógica de un sistema, entidad, fenómeno o proceso. Dichas representaciones pueden ser de sistemas reales o artificiales, lo que es de gran ayuda ya que existen sistemas que pueden ser difíciles o imposibles de investigar. (Modeling and Simulation Center, 2010)

La construcción de un modelo válido requiere conocimiento del sistema y de la información fundamental acerca de los patrones de comportamiento de sus entidades. Estos comportamientos se pueden derivar de datos históricos y los que describan su comportamiento pasado. La simulación de sistemas es la ejecución del modelo; se define (Allen T. , 2011) como la técnica para resolver problemas siguiendo los cambios en el tiempo de un modelo dinámico de un sistema. Consiste en construir un recurso experimental que actúe como el sistema de interés, creando un ambiente en el que sea posible obtener información por la vía de la experimentación basada en dichos modelos. En la aplicación de la simulación existen determinados pasos básicos en el proceso. Los principales son (Gordon, 1980):

<i>Proceso de Simulación</i>	Definición del problema
	Plan del estudio
	Formulación de un modelo conceptual
	Construcción de un programa de cómputo para el modelo
	Formulación de un modelo matemático
	Validación del modelo
	Diseño de experimentos
	Ejecución de la corrida de simulación y análisis de resultados

La simulación consiste en monitorear los cambios en el estado del sistema resultantes de la sucesión de eventos. Observa la manera en que cambian todas las variables del modelo con el tiempo. Así, la simulación es utilizada antes de alterar un sistema que ya existe o para construir uno. De esta manera se evitan altos costos o riesgos, cuellos de botella o se simplifican acciones. (Aracil, 1995)

2.2.1 Simulación de eventos discretos

Se denomina simulación de eventos discretos a la creación de un modelo dado un sistema y cómo éste evoluciona en el tiempo, (Sokolowski & Banks, 2010). Los cambios en el sistema pueden notarse a través de las variables estado, que cambian instantáneamente en momentos espaciados en el tiempo. Estos puntos en el tiempo son momentos en los que un evento ocurre; un evento es definido como una

ocurrencia instantánea que puede cambiar el estado del sistema. Dada la dinámica de los modelos de simulación, se mantiene un historial del tiempo de la simulación.

La simulación de eventos discretos se define como modelos provenientes de la abstracción de la realidad, donde una característica principal es el tiempo. El término discreto se refiere al hecho que durante la simulación el tiempo avanza en intervalos discretos, es decir, el modelo da saltos desde el momento de un evento al momento del siguiente evento) y que los eventos son discretos (mutuamente excluyentes) (Barceló, 1996).

Los conceptos básicos de este tipo de simulación son: entidades, atributos, eventos, recursos, las colas y el tiempo (Law & Kelton, 1991):

- Entidades; son objetos que tienen atributos. Pueden ser creadas al inicio o durante la simulación. El tiempo para una entidad puede ser un subconjunto del tiempo de simulación.
- Eventos; consumen recursos y generan colas, durante un intervalo de tiempo.
- Atributos; características propias de cada entidad, le permiten llevar información.
- Tiempo; su manejo discreto significa que el modelo puede avanzar hacia el siguiente evento.
- Estado del sistema; colección de variables estado necesarias para describir el sistema en un tiempo en particular.
- Reloj de la simulación; una variable que da el valor actual del tiempo simulado.
- Lista de eventos; una lista que contiene el momento siguiente cuando cada tipo de evento ocurrirá.
- Variable de tiempo; un subprograma que actualiza el estado del sistema cuando un tipo particular de evento ocurre.
- Variable de conteo; registra el número de eventos y su duración en el tiempo.

Para comenzar a definir una simulación de eventos discretos se define el sistema y los eventos relevantes que pueden ocurrir. La conceptualización debe identificar los puntos de decisión. En cada punto, se considera si se tienen eventos aleatorios (con incertidumbre) o estáticos. Una característica importante en los modelos de simulación de eventos discretos es el manejo del tiempo; éste es continuo y finito. Un número de eventos sucede, modificando el valor de las variables estado del modelo. Las variables de estado monitorean los cambios en un modelo y se modifican cada lapso

de tiempo. Los resultados de estas variables al final de la simulación influirán en el comportamiento del modelo.

Un modelo de simulación tiene dos estructuras: estática y dinámica:

- Estructura estática; especifica los posibles estados del modelo. Se describe generalmente como una colección de objetos y sus atributos.
- Estructura dinámica; especifica cómo el estado cambia con el tiempo.

Se lleva un registro o historial del tiempo de la simulación y éste avanza respecto a la ocurrencia de los eventos, éste puede clasificarse en:

- Instante; valor de tiempo del sistema en la que el valor de al menos un atributo de un objeto puede ser asignado, denominado t_1, t_2, t_3 , así sucesivamente.
- Intervalo; es la duración entre dos instantes sucesivos, denominado A_1, A_2, A_3 .
- Lapso de tiempo; sucesión contigua de uno o más intervalos.
- El estado de una variable; es la enumeración de todos los valores de los atributos de ese objeto en ese instante. El estado se compone de todos los estados de una variable en un instante determinado.

En la figura 2.2 se muestran dichos instantes de tiempo entre cada uno de los eventos e_1, e_2, e_3 :

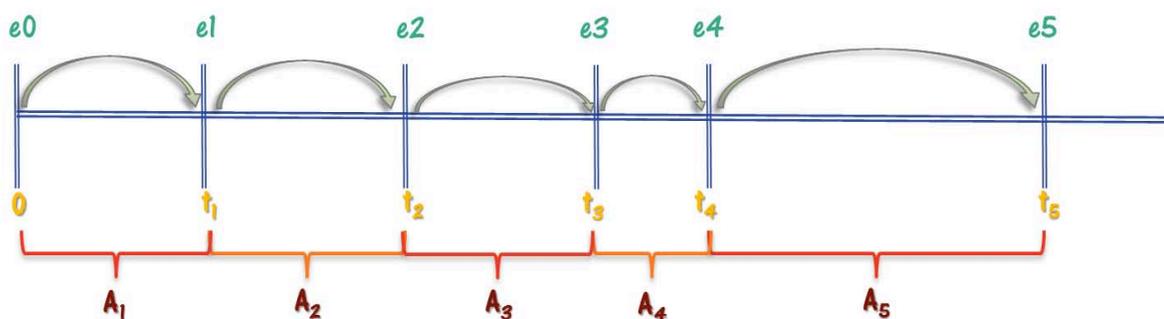


Figura 2.2. Esquema del registro del tiempo en una simulación de eventos discretos.

Fuente: (Law & Kelton, 1991)

Otra característica de este tipo de simulación es la inclusión de incertidumbre y variabilidad en el estudio de los sistemas. Existen ciertos elementos del sistema que se comportan de manera repetitiva, su conducta puede ser representada por una secuencia de eventos a medida que el tiempo transcurre. Cada vez que se repita un suceso o conducta, se considera un evento discreto. Dichas observaciones se pueden analizar como variables aleatorias. La simulación describe cada evento discreto a través de una variable aleatoria sujeta a una función de distribución de probabilidad que se ajuste a dicho comportamiento. Así, el evento se estudia mediante la generación de variables aleatorias. El proceso generador debe producir variables aleatorias de cualquier tipo, continuas o discretas. El término "generar una variable aleatoria" se refiere a la actividad de obtener una observación, o realización, de una variable aleatoria a partir de la distribución seleccionada. Para esto, se emiten variables aleatorias independientes, idénticamente distribuidas que finalmente reproducen el evento deseado. De esta manera, puede decirse que un modelo de simulación de eventos discretos es estocástico y dinámico con la característica que sus variables de estado cambian su valor en cada tiempo discreto, cada que sucede un evento (Allen T. , 2011).

Como se mencionó, se dividió el horizonte de tiempo para definir diversos modelos que estudiaran la problemática descrita. Para el modelo de corto plazo se utilizó la simulación de eventos discretos que definía un comportamiento en el que existía incertidumbre. Dicha incertidumbre provenía de la periodicidad de las fallas en el sistema (alertas críticas), cuánto duraban y con qué frecuencia se daban. Se consideró que las fallas en el suministro podrían ser tratadas como una simulación de eventos discretos. Cada falla se trató como un evento. Además, se definieron dos variables aleatorias: tiempo entre fallas y duración de la falla. Para cada una se obtuvo una función de distribución de probabilidad. De esta manera se definió la simulación del sistema en el corto plazo.

En cuanto al modelo de largo plazo, en la investigación se aplicó la simulación de Dinámica de Sistemas. Sobre este tipo de simulación se habla en el siguiente apartado.

2.2.2 Simulación de Dinámica de Sistemas

Un sistema se entiende como una unidad cuyos elementos interaccionan juntos; continuamente se afectan unos a otros, de modo que operan hacia una meta común. Esta interacción es el resultado de

elementos que influyen unos sobre otros, provocando cambios en el sistema. Las distintas variables se interrelacionan, de diversas maneras, desembocando en un comportamiento final del sistema. (Sokolowski & Banks, 2010)

Los sistemas dinámicos requieren (Kiani, Mirzamohammadi, & Hossein Hosseini, 2010):

- a) Herramientas para obtener y representar los modelos mentales de los problemas que se observan;
- b) Modelos formales y métodos de simulación para probar y mejorar los modelos mentales, diseñar nuevas políticas, o predecir comportamientos;
- c) Los métodos para agudizar las habilidades de razonamiento científico, mejorar los procesos grupales, e identificar los elementos y sus interrelaciones.

Por lo que, para comprender el comportamiento de un sistema, se necesita saber cómo está integrado, cuáles son los mecanismos que producen sus elementos y finalmente su comportamiento. Existe una disciplina que estudia las relaciones entre la estructura y el comportamiento de un sistema con ayuda de modelos informáticos de simulación, denominada Dinámica de Sistemas (Aracil, 1995).

La Dinámica de Sistemas se desarrolló entre los años 1960 y 1970 por el profesor *Jay W. Forrester*. Aplica los fundamentos de la "Teoría de Control", que fue desarrollada originalmente para los sistemas mecánicos e industriales dinámicos. Donde las retroalimentaciones, los retrasos, las existencias y los flujos juegan un papel importante en el comportamiento del sistema. *Forrester*, observó que muchos de los sistemas humanos y socioeconómicos, pueden ser modelados y analizados con las mismas técnicas (Forrester, 1971).

La Dinámica de Sistemas asume un punto de vista endógeno: el sistema es considerado como causalmente cerrado. Los elementos externos son vistos como factores desencadenantes de comportamiento del sistema, pero las causas de este comportamiento son consideradas como internas al sistema (Sokolowski & Banks, 2010).

En un modelo de Dinámica de Sistemas se produce una integración de información de tipo cualitativo con información de tipo cuantitativo; una característica importante del enfoque de la dinámica del sistema, es su potencial para la inclusión de las variables "duras" y "suaves" en el modelo.

Los modelos de Dinámica de Sistemas se basan en tres fuentes de información (Kiani, Mirzamohammadi, & Hossein Hosseini, 2010):

- Datos numéricos,
- Base de datos escritos (informes, manuales de operaciones, trabajos publicados, etc.);
- Conocimiento de los expertos, de los principales participantes en el sistema.

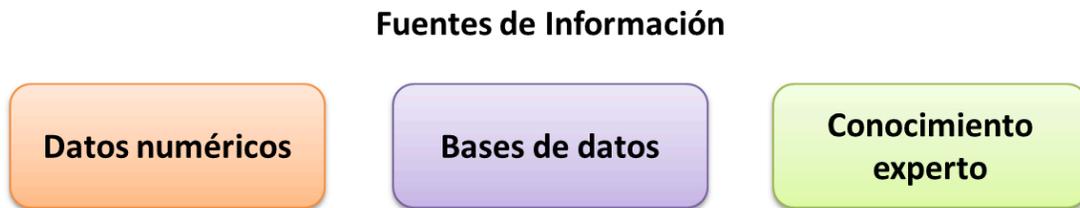


Figura 2.3. Fuentes de información. Fuente: (Kiani, Mirzamohammadi, & Hossein Hosseini, 2010)

La combinación de este tipo de información genera la formulación matemática ayuda a identificar inconsistencias sobre cómo pensamos que el sistema está estructurado y cómo se comporta con el paso del tiempo (Andersen, Rich, & MacDonald, 2009).

La premisa conceptual es que el comportamiento de un sistema depende de la estructura de las relaciones causa y efecto entre las partes, es decir son modelos causales. Identifican cómo la estructura y las políticas de decisión ayudan a generar patrones de comportamiento (Qudrat-Ullah & Seo Seong, 2009). El enfoque de la Dinámica de Sistemas se centra en la explicación y en el diseño de políticas en lugar de la predicción. Un estudio de la Dinámica de Sistemas comprende una serie de etapas, algunas etapas pueden ser devueltas a varias veces. Ellas son (Sharp, 1977):

1. La determinación de que el enfoque de Dinámica de Sistemas es útil para el problema.
2. Identificación de los fenómenos dinámicos de interés en el estudio y la definición de los límites del sistema a ser estudiado.
3. Construcción de una influencia o diagrama de circuitos causales que muestre las principales variables del sistema y sus interacciones.
4. La construcción del modelo de simulación.
5. Validación del modelo mediante la comparación de su comportamiento con el del sistema real.

6. Rediseño de las políticas del sistema para obtener un rendimiento mejorado.

Retomando lo descrito anteriormente, el objetivo de la Dinámica de Sistemas es comprender las causas estructurales que provocan el comportamiento del sistema. Busca estudiarlo a través del ensayo de diferentes políticas. Es por eso que utiliza el análisis causal o estructural, a través de la creación de relaciones de influencia entre variables, parámetros y datos. Se deben integrar las variables que tengan influencia en la evolución del sistema mediante un diagrama de influencias.

El diagrama de influencias se define como el conjunto de relaciones entre los elementos de un sistema. El primer paso para diseñar este diagrama es definir los elementos del sistema que influyen sobre el problema a estudiar. En el diagrama, los elementos se relacionan entre ellos mediante flechas, a las que se les asocia un signo. Los signos indican si las variaciones afectan de manera positiva o negativa. Si se tienen dos elementos A y B, entonces:

- La relación positiva (+), indica que, si A aumenta, entonces aumenta B.
- La relación negativa (-), indica que, si A disminuye, entonces aumenta B.

Creando relaciones de dos o más elementos genera que todos éstos se relacionen, desembocando en la recreación del comportamiento del sistema. Los arreglos mediante los cuales se recrea dicho comportamiento se denomina bucle de retroalimentación. Estos bucles, constituyen estructuras básicas que controlan los cambios que se producen en los sistemas. Pueden ser de dos tipos (Aracil, 1995):

- *Bucle de realimentación negativa.* Representa un tipo de situación en la que se trata de decidir acciones para modificar el comportamiento con el fin de alcanzar un determinado objetivo. Tiene la propiedad de que si, por una acción exterior, se perturba alguno de sus elementos, el sistema, en virtud de su estructura, reacciona tendiendo a anular esa perturbación. Su efecto es, por tanto, tratar de conseguir que las condiciones continúen como están, sin variaciones. Son bucles que estabilizan los sistemas. Es conveniente observar que en un bucle de realimentación negativa lo que se realimenta es la información.

- *Bucle de retroalimentación positiva.* Se trata de un bucle en el que todas las influencias son positivas (o si las hubiese negativas, tendrían que compensarse por pares). Representa un proceso en el que un estado determina una acción, que a su vez refuerza este estado, y así indefinidamente.

Este efecto se conoce vulgarmente como "círculo vicioso" o "bola de nieve". El cambio se amplifica produciendo más cambio. Se trata, por tanto, de amplificar las perturbaciones y desestabilizar al sistema. En este sentido se puede decir que su efecto es contrario al de la realimentación negativa.

Mientras que los bucles de refuerzo determinan el crecimiento o la decadencia del sistema, los de equilibrio conducen a la estabilidad. Los procesos de refuerzo son fuerzas que impulsan el crecimiento (o disminución) de un sistema y, respectivamente, corresponden a lo que comúnmente se llaman círculos virtuosos y círculos viciosos. En los sistemas complejos, coexisten bucles de realimentación positivos y negativos. El comportamiento resultante dependerá de cuáles de los bucles sean dominantes en cada momento. En la Figura 2.4 se observa una estructura formada por dos bucles de realimentación, uno negativo y otro positivo.

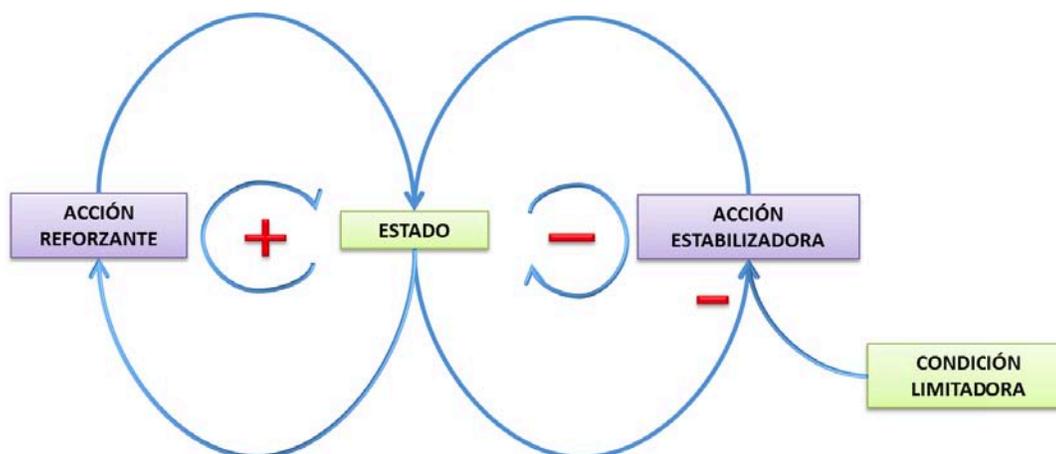


Figura 2.4. Estructura con dos bloques de realimentación (Positivo y Negativo). Fuente: (Aracil, 1995)

El concepto de los *retrasos* es otra característica importante del modelo de Dinámica de Sistemas. Las acciones no siempre se traducen en una consecuencia inmediata. Este retraso puede explicar cómo los problemas que surgen en un sistema no son necesariamente las consecuencias de las decisiones recientes, pero puede datar de mucho tiempo antes, incluso si las consecuencias se hacen evidentes sólo en el presente. En los bucles de realimentación positiva, determinan que el crecimiento no se produzca de forma tan rápida como cabría esperar. En los de realimentación negativa, su efecto puede determinar que ante la lentitud de los resultados se tomen decisiones drásticas que conduzcan a una oscilación del sistema (Aracil, 1995).

Posteriormente, se desea convertir el diagrama de influencias en el diagrama de *Forrester*, que se define como un diagrama que muestra las relaciones entre las variables de un sistema. La conversión se realiza tomando cada nodo del diagrama de influencias y clasificándolo nuevamente en una de las tres posibles variables que utiliza el diagrama de *Forrester*. Las variables se definen como:

- *Variables de nivel o estado*; son normalmente las variables más importantes y representan esas magnitudes cuya evolución es especialmente significativa. Definen el estado del sistema en un punto dado en el tiempo.
- *Variables de flujo*; asociadas a cada variable de nivel. Determinan su variación a lo largo del tiempo.
- *Variables auxiliares*; son el resto de las variables que aparecen en el diagrama, y representan pasos intermedios para la determinación de las variables de flujo a partir de las variables de nivel.

En la Figura 2.5 se muestran los símbolos empleados en el diagrama de *Forrester*.

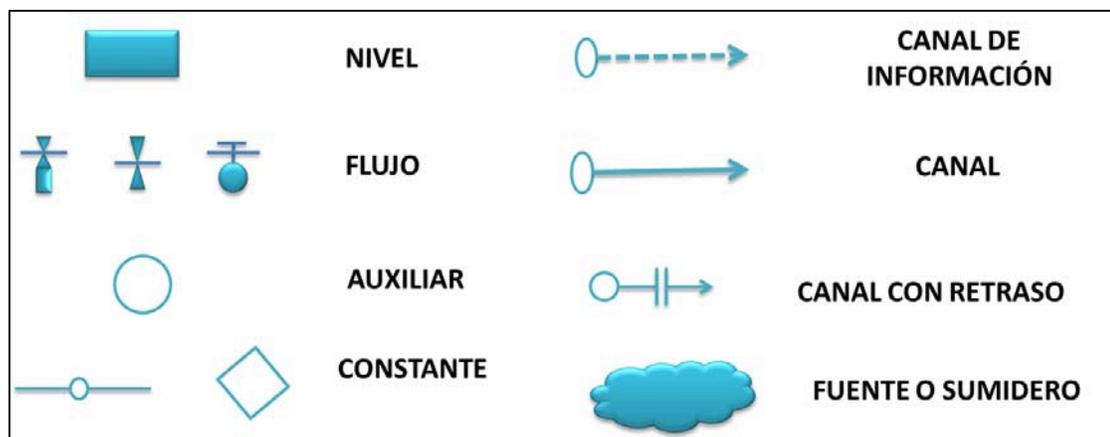


Figura 2.5. Símbolos usados en el diagrama de *Forrester*. Fuente: (Aracil, 1995)

A partir de este último diagrama se crea el modelo matemático. La lógica matemática sobre la cual se sustenta la simulación Dinámica de Sistemas está dada por el comportamiento de un modelo en un instante dado, el cual se encuentra determinado por la situación en el instante anterior más la variación de los parámetros producida en un intervalo de tiempo. Es por esto que se utilizan ecuaciones diferenciales en función del tiempo. Las ecuaciones se obtienen de las asociaciones creadas en el diagrama de *Forrester* (Sokolowski & Banks, 2010).

Los Diagramas de Forrester o Diagramas de Niveles y Flujos, representan modelos continuos. Sin embargo, su simulación es discreta ya que se realiza por medio de una computadora. Esto significa que en lugar manejar diferenciales de tiempo, dt , se utilizan incrementos o intervalos discretos de tiempo Δt . De acuerdo con, (González-Busto Mújica, 1998) la ecuación de la variable de nivel debe verse como:

$$Nivel(t + \Delta t) = Nivel(t) + (Entrada(t) - Salida(t)) * \Delta t$$

La simulación de un modelo de Dinámica de Sistemas se basa en un motor que es una estructura iterativa que dura el horizonte temporal definido, por ejemplo, para el mismo intervalo {inicio, final}, y en la que cada iteración el tiempo (t) incrementa Δt .

El motor de simulación en cada instante o punto de muestreo t , maneja cinco elementos de tiempo como se muestra en la Figura 2.6, donde además del tiempo presente (t), el tiempo siguiente ($t + 1$) y el tiempo anterior ($t - 1$), se tienen en consideración tanto el intervalo siguiente Δt como el intervalo anterior $\Delta(t - 1)$.

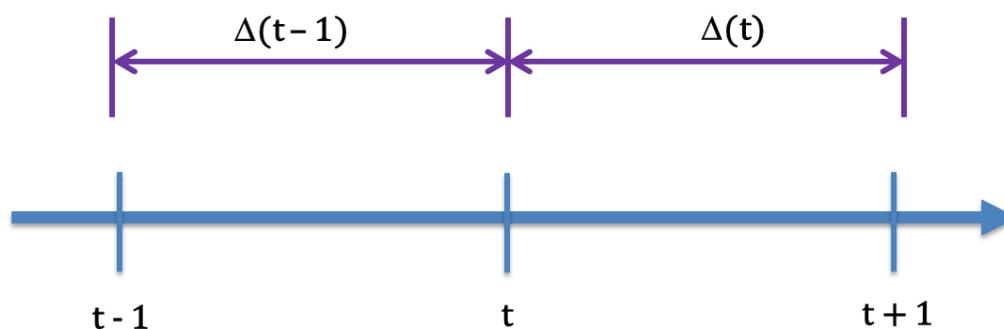


Figura 2.6 Visión del tiempo en Dinámica de Sistemas. Fuente: (Aracil, 1995)

El modelo final es un conjunto de ecuaciones sistémicas, que habitualmente se ejecutan por las propias aplicaciones utilizadas para el diseño del modelo.

La simulación permite ver el comportamiento final generado como resultado de las complejas interacciones de todos los elementos del sistema al mismo tiempo. Por otra parte, se pueden probar una variedad de políticas rápidamente y ver cómo juegan en el largo plazo. El resultado final es un

modelo que representa una teoría proveniente de las fuentes endógenas de los problemas de comportamiento. Al tomar esta visión holística, los sistemas dinámicos capturan retrasos de tiempo, amplificación y distorsión de la información, tal como existen en las organizaciones. Mediante los modelos de simulación por computadora, se trata de comprender las políticas y decisiones internas, así como los fenómenos dinámicos externos que se combinan para generar los problemas observados. Se trata de predecir las consecuencias dinámicas de la política, no pronosticar los valores de las cantidades en un momento dado en el futuro.

Finalmente, cabe hacer notar, que la Dinámica de Sistemas modela entornos que también permiten la creación de "micro-mundos" que son simulaciones de sistemas reales, como una empresa, un mercado, un sistema de producción o un ecosistema, dotado con interfaces fáciles de usar y, a veces, elementos de juego. Los "micro-mundos" ofrecen a los gestores o estudiantes con laboratorios virtuales para probar sus estrategias e ideas. (Sokolowski & Banks, 2010)

Como se detalló anteriormente, la Dinámica de Sistemas es apta en la creación y revisión de políticas. Se considera una herramienta de investigación útil, ya que es una metodología que trabaja con datos e información del sistema; además, utiliza el carácter analítico y la simulación por computadora, obteniendo un marco único e integrado. Finalmente, el modelo ayuda al diseño de políticas razonables y ofrece opciones para mitigar los posibles efectos negativos.

La Dinámica de Sistemas, se basa en las relaciones causales de los distintos elementos del sistema, enfocado a los clientes del sector industrial, tomando en cuenta que:

- Existe competencia por el suministro de gas entre los diversos usuarios, incluidos los sectores eléctrico y petrolero;
- Es común que se enfrenten ciertas incertidumbres que no se pueden controlar, como por ejemplo el clima, los niveles de producción e importación (de gas seco y licuado);
- La demanda de gas ha crecido de manera significativa y existen costos asociados al desarrollo de nuevos pozos y el incremento en las importaciones de GNL;
- Existe una inherente complejidad e incertidumbre estocásticas en la toma de decisiones que no puede ser analizada con métodos determinísticos.

La asignación de un bien a distintos usuarios es afectada por la incertidumbre y las complejas interacciones que surgen entre ellos, por lo que un modelo determinístico convencional no puede ayudar a solucionar esta problemática. Para contrarrestar la complejidad del problema, así como la incertidumbre inherente, se propuso utilizar técnicas de simulación.

Para esta investigación, se definió que, en el largo plazo, se debía formular un modelo que capturara el comportamiento de la incertidumbre en la demanda de gas y cómo debía crecer la infraestructura a fin de evitar las fallas en el sistema. En capítulos posteriores se definirá este modelo de largo plazo.

2.3 Metodología

A continuación, se presenta la propuesta de la metodología para la realización del trabajo de tesis. En ésta, se abordará desde la definición y concepción del objeto de estudio hasta la documentación de la investigación, esto es, la entrega del trabajo escrito. Previo al desarrollo de modelos se realizaron los siguientes pasos:

- *Interés en una problemática*; las fallas en el sistema de transporte de gas natural y el exceso de demanda concluyeron en grandes pérdidas económicas debido al desabasto de este combustible. Sin embargo, aún con todas las dificultades acarreadas nunca se optó por diseñar políticas o reglas de asignación del gas natural.
- *Revisión bibliográfica*; antes de emprender la investigación era necesario saber si las técnicas aprendidas podían aplicarse a esta problemática. Esto no sólo ayudó a estructurar mejor la investigación, sino también no repetir algún procedimiento ya aplicado. Por otro lado, parte de esta investigación bibliográfica ayudó a justificar la utilización de algún método y a orientar al investigador sobre el método elegido.
- *Profundización y limitación de la problemática*; en éste punto se definió el objeto de estudio y el problema a tratar. El objeto de estudio es la falta de capacidad de transporte en el sistema nacional de gasoductos. El problema raíz que genera las fallas al suministro es la falta de capacidad. Así, se concluyó que debía dividirse la problemática en corto y largo plazos. La primera abordaría una

solución mediadora que asignara el gas reducido a los afectados y la segunda propone una solución que subsane el problema central.

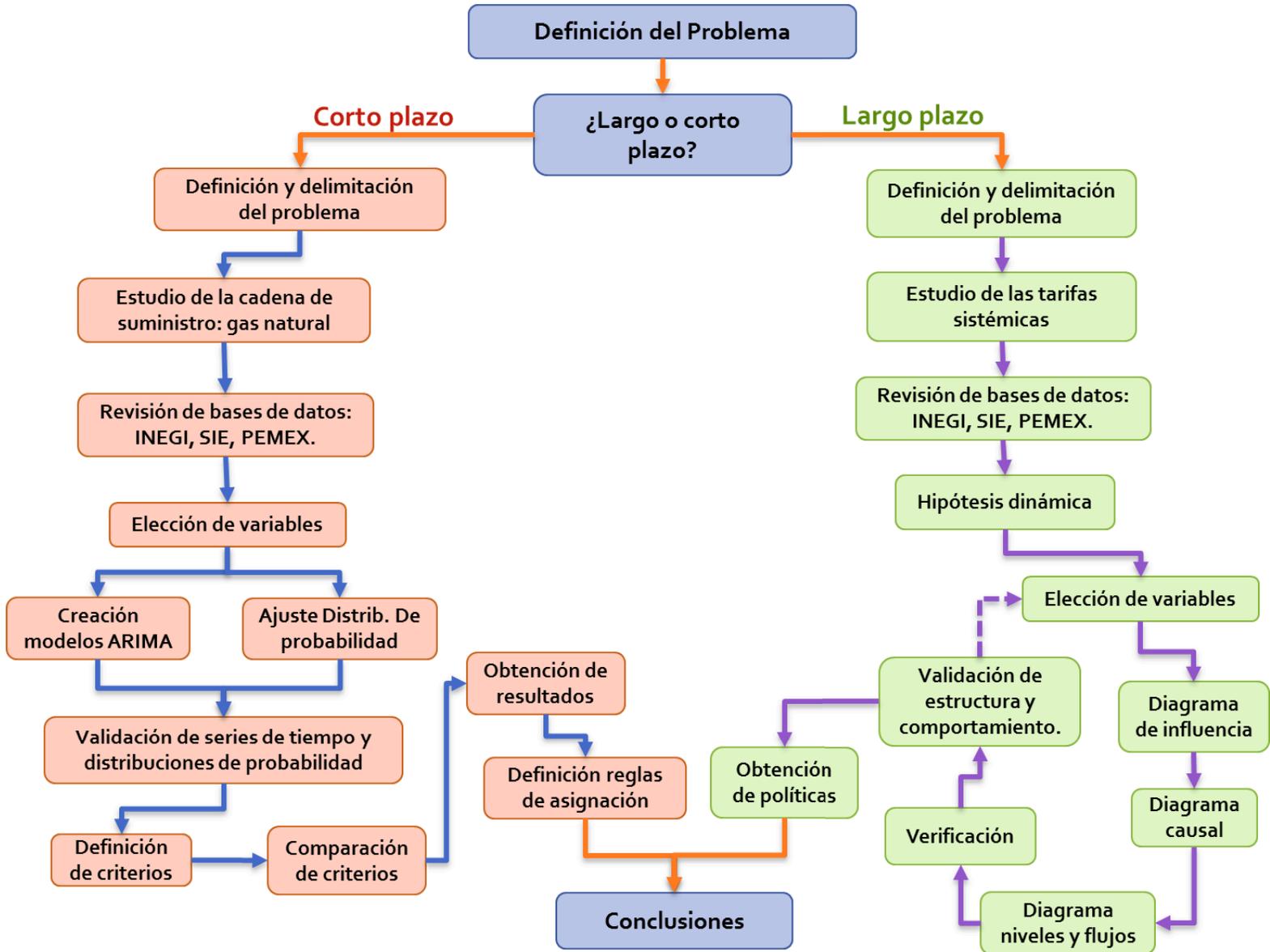
Posterior a la delimitación de la problemática, se plantearon 2 modelos que propusieran una solución a este problema. En la Figura 2.7 se muestra la metodología empleada en esta investigación. En la definición del horizonte de tiempo, se optó por aplicar dos disciplinas, una en el corto y otra en el largo plazo. En los puntos siguientes se describe brevemente la metodología:

- Definición del problema:
 - Corto Plazo: Ante una saturación del sistema de gasoductos, se deberá suspender o reducir el suministro de gas natural, ¿cómo debe ser asignado el combustible racionado entre los distintos sectores afectados a fin de maximizar el beneficio económico?
 - Largo Plazo: Dada la continua necesidad de infraestructura en el transporte de gas natural, ¿qué política debe ser implementada a fin de prevenir fallas en el sistema?
- Definición del horizonte de tiempo: la problemática planteada pudo dividirse en dos perspectivas y proponer soluciones complementarias: 1) suponiendo constante la limitada infraestructura, se propuso una solución correctiva; 2) permitiendo modificar la infraestructura, se propuso una solución preventiva. Se desarrollaron dos procedimientos que describieron la formulación de los modelos de corto y largo plazos. Más adelante se definirá a detalle en qué consisten ambos modelos.
- Desarrollo de las simulaciones en el corto y largo plazos; una vez que fue delimitado el horizonte de tiempo se establecieron definidos dos tipos de simulaciones que se aplicaron a la problemática planteada. En el corto plazo se determinó una simulación de eventos discretos que emulara las fallas al sistema, para posteriormente aplicar modelos de programación entera y lineal. Los 4 modelos sirvieron para analizar desde 4 características (costos, energía, volumen e ingresos) qué modelo asignaba mejor el limitado combustible. En cambio, en el largo plazo, se aplicó la simulación de dinámica de sistemas para modelar la demanda y oferta esperados a nivel nacional. Una vez conocido el comportamiento del mercado de gas natural, se estimó una tarifa que ayudara

a la inversión en nuevos gasoductos y así evitar la generación de fallas en el suministro. En los siguientes capítulos se mostrará a detalle cada procedimiento.

- Conclusiones; como toda investigación realizada, se deben recopilar los conocimientos adquiridos de los modelos, concluir y documentar los pasos realizados, así como los aspectos relevantes obtenidos del tema de estudio. Si en algún momento alguien desea retomar el tema, deberá ser capaz de reproducirlo, por lo tanto, se debe describir qué se hizo y cómo.

Figura 2.7. Diagrama de la metodología propuesta de la creación de la tesis.
Elaboración propia.



3. Desarrollo de criterios de asignación en el corto plazo

La simulación es una metodología aplicada que puede describir el comportamiento de ese sistema utilizando un modelo matemático o un modelo simbólico, (Gordon, 1980). Los modelos de simulación se utilizan para analizar decisiones bajo riesgo, es decir un modelo en el cual uno o más de los factores no se conocen con certeza, conocidos como variables aleatorias. El primer paso en un estudio de simulación es desarrollar un modelo que represente el sistema que va a investigarse. Como se mencionó, no es necesaria una representación completamente realista del sistema. Si no se puede predecir el comportamiento de un elemento es necesario tomar observaciones aleatorias a partir de las distribuciones de probabilidad que se ajusten a éstas. Posteriormente, generar observaciones aleatorias y validar el modelo. El comportamiento de una variable aleatoria se describe mediante una distribución de probabilidad. La simulación de eventos discretos es una técnica de modelado de sistemas. Se caracteriza por un control variable del tiempo que permite avanzar en intervalos, en función de la ocurrencia de los eventos.

Como se explicó en el capítulo anterior, debido a la complejidad del problema planteado, se optó por definir un horizonte de tiempo y resolver el problema desde dos puntos de vista. De acuerdo con la teoría económica, se define el corto plazo como un periodo en el cual algunos factores que afectan la producción como maquinarias y edificios permanecen fijos. En esta investigación no se habla de producción, sin embargo, se habla de un combustible que debe ser entregado a través de gasoductos (bienes de capital), que permanecerán fijos, es decir, sin modificarse en este periodo. De manera esquemática y general, la metodología aplicada para el corto plazo se describe en la Figura 3.1:

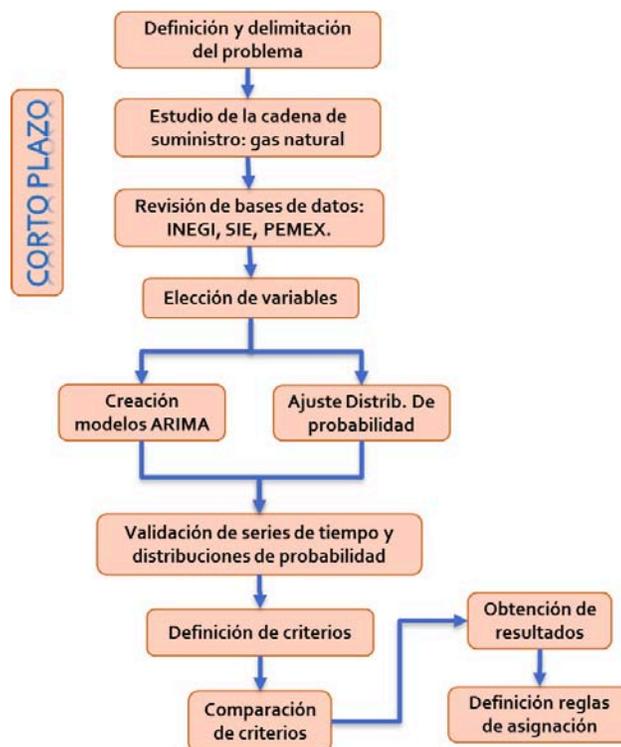


Figura 3.1. Esquema de la metodología aplicada en el corto plazo. Elaboración propia.

En el corto plazo, se estableció que el problema a resolver era la asignación del gas racionado a los sectores afectados. Por esta razón se planteó realizar una simulación de eventos discretos, en la que cada alerta crítica se consideró un evento. La aleatoriedad de cada alerta se definió ajustando distribuciones de probabilidad para la duración de las fallas y el periodo entre éstas. La oferta y la demanda de gas natural se pronosticaron mediante modelos ARIMA. En cuanto a la asignación de gas, se tuvo el siguiente planteamiento: se consideraron 29 sectores, por tanto, se tenían muchas variables de decisión. Al aplicar algún tipo de criterio de asignación de gas, se notó que una solución óptima era difícil de encontrar. Con el fin de dar la mejor asignación de gas a dichos factores, se buscó una opción dentro de un espacio de diversas soluciones, delimitado por restricciones de la oferta de gas. Es por esto que se optó por el diseño de modelos de programación lineal y entera que establecieran una cantidad de gas natural a los sectores.

3.1. Modelo en el corto plazo

Para la realización del modelo en el corto plazo, se realizó una investigación bibliográfica sobre la regulación aplicada en otros países al momento de sufrir de fallas en el sistema. Se notó que países como Estados Unidos, Colombia y los pertenecientes a la Unión Europea aplicaban criterios como *pro rata*, en el cual, ante una falla en el suministro, todos los usuarios sufren el mismo porcentaje de reducción, (Comisión Reguladora de Energía y Gas Natural, 2012), (Comisión Reguladora de Energía y Gas Natural, 2009). Otros criterios implican medir el valor presente neto de las empresas que son afectadas por la falla y aquéllas que tengan un valor presente mayor, serán abastecidas, (FERC, 2011). Después de esta revisión se plantearon los criterios que se utilizaron en esta investigación.

3.2. Elección de las variables para el planteamiento del modelo de corto plazo

De acuerdo con la metodología planteada, se recolectaron los datos, que debieron ser seleccionados en función de lo que se deseaba modelar. Revisando el sistema y la metodología descrita, se observó que se necesitaron los siguientes datos:

- Alertas críticas; fue necesario saber cuántas habían ocurrido en los últimos años y cuál fue su duración.
- Consumo de gas de los diferentes sectores; el gas suministrado es consumido por distintos usuarios. Normalmente, si surgía una alerta crítica, el gas racionado era distribuido entre industriales de manera indistinta. El comportamiento del consumo reflejaba la estacionalidad de la producción industrial en México. Se midió en millones de pies cúbicos diarios, por ser flujo de gas (mmpcd).
- Cantidad total de gas natural; el flujo de gas diario de los Estados que sufrieron una alerta crítica. Si no ocurría una falla, el consumo no se veía afectado, de lo contrario, cada sector industrial competía por una cantidad de gas necesaria.
- Ingreso de cada Estado; el ingreso de cada sector dependió del valor de la generación de producción, por lo que, si el sector obtiene una cantidad de gas, podía realizar su producción y en consecuencia, generar ganancia, reflejada en el PIB.
- Precio de combustibles; uno de los criterios considera la compra de gas natural y / o combustóleo. Esto ya que se necesitaba un sustituto del combustible reducido. Dadas las especificaciones técnicas de algunas industrias, el combustible que puede sustituir al gas natural es el combustóleo.

Sin embargo, los costos de este último son mayores que del racionado. En el criterio propuesto se consideró comprar una cantidad de combustóleo para subsanar la falta de gas.

- Consumo del sector petrolero y eléctrico, consumo residencial y comercial; el gas suministrado es consumido por distintos usuarios. Normalmente, a estos sectores y usuarios anteriormente mencionados, no se les debe suspender el suministro de gas. Si aparece una alerta crítica, el gas racionado primero es distribuido entre estos usuarios y el sobrante a los sectores industriales. Por lo que este consumo se verá como un porcentaje del total de gas disponible.

Después, de acuerdo con la clasificación sobre los sectores que utilizan gas, se agruparon los subsectores económicos. Los principales sectores industriales que utilizan gas natural en México son: Básicas de metales, Química, Maquinaria y Equipo, Vidrio, Tabaco, Alimentos y Bebidas, Producción de Minerales, Papel y Cartón, Cuero e Industria Textil, Cerveza y Malta, Cemento Hidráulico. Los sectores y subsectores son clasificados de acuerdo con el Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte, SCIAN. La Tabla 3.1 muestra esta clasificación:

Clasificación de grupos de ramas industriales	
Grupos de ramas	Sectores, subsectores y ramas SCIAN
Alimentos, bebidas, tabaco excepto cerveza	311 y 312
Celulosa y papel	322 y 323
Cemento	3273 y 3274
Cerveza y malta	31212
Metales básicos	331
Minería	212 y 213
Productos minerales no metálicos	3271 y 3279
Productos metálicos, equipo eléctrico y de transporte	332 a 336
Química	325 y 326
Resto	11, 23, 321, 337 y 339
Textil	313 a 316
Vidrio	3272

Tabla 3.1 Clasificación de los grupos de ramas industriales, tomando como criterio SCIAN. Fuente: (SENER, 2012)

Los Estados afectados por las alertas críticas forman parte de las zonas Centro y Occidente del país, éstos fueron:

- Centro: Distrito Federal, Hidalgo, Estado de México, Morelos, Puebla y Tlaxcala.
- Occidente: Aguascalientes, Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Querétaro, San Luis Potosí y Colima.

De los mencionados, sólo algunos sufrieron severamente los cortes de gas: Jalisco, Michoacán, San Luis Potosí, Estado de México, Distrito Federal, Querétaro e Hidalgo (Cruz Serrano, 2013). Los Estados elegidos se derivan de publicaciones de cámaras industriales, así como de notas periodísticas que señalaban a estos Estados como los que sufrieron más pérdidas económicas y desabastecimiento de gas. Para esta investigación, se consideraron 5 Estados pertenecientes a las zonas Centro y Centro – Occidente que sufrieron más desabasto de gas durante las alertas críticas: (López, 2013), (CONCAMIN, 2012). Se consideraron los sectores industriales de cada Estado que consumían gas natural, para lo cual se utilizó la clasificación SCIAN explicada anteriormente. Los Estados elegidos con sus respectivos sectores se describen en la Tabla 3.2:

Sectores Industriales	Jalisco	Edo. Méx.	Michoacán	DF	SLP
Alimentos, bebidas y tabaco	x	X	x	x	x
Celulosa y papel	x	X	x	x	x
Metales básicos	x	X	x	x	x
Productos metálicos	x	X		x	x
Química	x	X	x	x	x
Textil	x	X	x	x	x

Tabla 3.2 Sectores industriales de los cinco Estados utilizados en el modelo. Elaboración propia.

3.3. Obtención y procesamiento de los datos

Los datos fueron obtenidos de diversas fuentes:

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI);
- Secretaría de Energía (SENER);
- Sistema de Información Energética (SIE);
- Pemex Gas y Petroquímica Básica (PGPB);

En el caso de la generación de valor, primero se obtuvo por cada Estado el beneficio económico mensual de los sectores industriales, desde el año 2007 hasta 2013. Después, de acuerdo con la clasificación sobre los sectores que utilizan gas, se agruparon los subsectores económicos.

En el caso del consumo de gas natural, se obtuvo del SIE y la información sobre las alertas críticas fue solicitada a PGPB.

Las series obtenidas de INEGI que mostraban la generación de valor de la producción se encontraban en millones de pesos. Para reflejar el comportamiento real de los datos, se eliminó el efecto de la inflación. Con esto, el crecimiento que ocurría de un año a otro podía ser visto tal cual sucedió, eliminando el posible crecimiento que de la inflación. Para lo cual se utilizó el Índice Nacional de Precios al Consumidor (INPC) de diciembre 2012.

Después de estudiar el comportamiento de las series económicas y de los volúmenes de gas natural, se observó que lo más adecuado es tratarlas como series de tiempo, específicamente como modelos autorregresivos e integrados de promedios móviles (ARIMA por sus siglas en inglés). Los modelos ARIMA para series estacionales se caracterizan por estudiar series que tienen una tendencia y/o ciclos de larga duración. Muestran fluctuaciones que se repiten anualmente y existe una similitud de comportamiento entre observaciones para el mismo mes en años consecutivos.

Aun cuando la estacionalidad se considera un fenómeno repetitivo anual, no implica que no pueda existir un modelo de comportamiento periódico con una duración menor a un año. Para series con observaciones mensuales, como es este caso, se tienen en cuenta estas posibles relaciones: 1) entre meses contiguos dentro de un mismo año; 2) entre diferentes años para los mismos meses.

Un modelo autorregresivo es una ecuación de regresión lineal que se caracteriza por tomar sus propios valores observados en valores anteriores a cierto periodo t como la variable dependiente y ponderarlos de acuerdo con los coeficientes autorregresivos. Normalmente, se espera que sean estacionarios y que los parámetros converjan a un valor, sin embargo, esto no ocurre en las series estacionales. En el caso de las series no estacionarias, se tendrán dos parámetros, uno que caracterice la regresión de los datos no estacionales y otro que caracterice a los datos estacionales. Normalmente, se utiliza la variable p para denotar al parámetro de la autorregresión no estacional y P para el de la autorregresión estacional (Aguirre Jaime, 1994).

Los modelos de promedios móviles representan un proceso estocástico, cuyos valores pueden ser dependientes unos de otros, como una suma finita ponderada por choques aleatorios independientes. Los choques aleatorios se representan por desviaciones de la serie respecto a su media. Los promedios móviles son estacionarios, esto implica que las fluctuaciones de la serie se encontrarán alrededor de un punto de equilibrio. De manera análoga al modelo autorregresivo, se espera que tenga estacionariedad y que sea explicada mediante un parámetro. Para las series no estacionarias, el parámetro que defina a los datos no estacionales se denota q y para los datos estacionales se denota Q . Tomando en cuenta las relaciones anteriores, el modelo ARIMA se define como (Aguirre Jaime, 1994):

$ARIMA(p, d, q) \times (P, D, Q)_E$, donde:

Estacional	No Estacional
D = Diferenciación	d = diferenciación
P = autorregresivo	p = autorregresivo
Q = promedio móvil	q = promedio móvil

En cuanto al parámetro de diferenciación, se decidió realizar un tratamiento en los datos antes de realizar los pronósticos. Con la finalidad de minimizar la varianza y dejar una serie estacionaria, se optó por aplicar el logaritmo natural a las series originales y después realizar una primera diferencia, estacional y no estacional. La primera diferencia no estacional se define como: $Z_t = Y_t - Y_{t-1}$, donde Y es el valor original. La primera diferencia estacional se define como: $Z_t = Y_t - Y_{t-12}$, en este caso, la estacionalidad se repetía cada año y al tener los datos mensuales, se restaba el consumo de un mes menos ese mismo mes del año anterior. Con los datos tratados se obtuvieron las funciones de autocorrelación parcial muestral y autocorrelación parcial.

Después de estudiar las funciones de autocorrelación parcial muestral y autocorrelación parcial, se probaron distintos valores de los parámetros para cada serie. Se realizaron cuatro pruebas de validación para cada pronóstico:

- Raíz cuadrada del error cuadrático medio;
- Error medio absoluto;
- Error cuadrado medio;
- Coeficiente de determinación (bondad de ajuste);

Para las tres primeras, se deseó que fuera el mínimo y para la última, se deseó que fuera el máximo. Para este ejercicio, no se utilizó el porcentaje absoluto medio del error, pues se calcula igual que el error medio absoluto, sólo que el primero se muestra como porcentaje. Ambos indicadores establecen que deben ser lo más pequeños posibles para considerar al pronóstico como el adecuado (Aguirre Jaime, 1994). Así, que fue suficiente que sólo uno de ellos se ocupara. La obtención de parámetros se realizó con los datos del consumo de gas de enero 2007 a diciembre 2011. Cuando se obtuvieron los pronósticos, las pruebas anteriormente mencionadas se aplicaron para los datos del periodo enero 2012 a diciembre 2013 y así validar los datos.

Se analizaron 31 series de tiempo: 29 series de los sectores industriales una serie de la oferta de gas para los Estados y una que englobara a los sectores: eléctrico, petrolero, residencial y comercial de los cinco Estados. Las Tablas 3.3 y 3.4 muestran los modelos de las 31 series:

Series	Modelo ARIMA
Oferta de gas	ARIMA(2,0,2) × (1,0,1)
Sectores con preferencia	ARIMA(1,0,3) × 3,0,3)

Tabla 3.3. Información para crear los pronósticos del consumo basado en modelos ARIMA de la oferta de gas y los sectores con preferencia. Fuente: Elaboración propia.

Estado	Sector Industrial	Modelo ARIMA
Distrito Federal	Alimentos, bebidas y tabaco	ARIMA(1,0,2) x (1,0,0)
	Celulosa y papel	ARIMA(1,0,1) x (1,0,2)
	Metales básicos	ARIMA(2,0,2) x (2,0,2)
	Productos metálicos	ARIMA(1,0,2) x (2,0,1)
	Química	ARIMA(2,0,2) x (2,0,2)
	Textil	ARIMA(2,0,2) x (2,0,2)
Jalisco	Alimentos, bebidas y tabaco	ARIMA(1,0,1) x (3,0,3)
	Celulosa y papel	ARIMA(2,0,2) x (2,0,2)
	Metales básicos	ARIMA(1,0,1) x (2,0,2)
	Productos metálicos	ARIMA(2,0,3) x (1,0,1)
	Química	ARIMA(2,0,2) x (2,0,2)
	Textil	ARIMA(1,0,1) x (3,0,3)
Estado de México	Alimentos, bebidas y tabaco	ARIMA(1,0,2) x (1,0,2)
	Celulosa y papel	ARIMA(2,0,2) x (2,0,2)
	Metales básicos	ARIMA(2,0,2) x (2,0,2)
	Productos metálicos	ARIMA(1,0,1) x (1,0,0)
	Química	ARIMA(2,0,2) x (2,0,2)
	Textil	ARIMA(1,0,1) x (1,0,2)
Michoacán	Alimentos, bebidas y tabaco	ARIMA(2,0,1) x (2,0,1)
	Celulosa y papel	ARIMA(1,0,1) x (0,0,1)
	Metales básicos	ARIMA(1,0,1) x (1,0,2)
	Química	ARIMA(1,0,1) x (1,0,2)
	Textil	ARIMA(1,0,2) x (1,0,2)
San Luis Potosí	Alimentos, bebidas y tabaco	ARIMA(1,0,2) x (1,0,2)
	Celulosa y papel	ARIMA(2,0,2) x (2,0,2)
	Metales básicos	ARIMA(1,0,2) x (2,0,1)
	Productos metálicos	ARIMA(1,0,2) x (2,0,1)
	Química	ARIMA(1,0,1) x (1,0,0)
	Textil	ARIMA(1,0,3) x (3,0,1)

Tabla 3.4. Información para crear los pronósticos del consumo de gas de los sectores industriales utilizando los modelos ARIMA. Fuente: Elaboración propia.

Utilizando la información anterior, se obtuvieron los consumos y la oferta de gas de manera diaria para el periodo de tiempo planteado, dos años. La intención fue reflejar el comportamiento de éstos lo más cercanos posible a la realidad. Saber que, dado el consumo en el año, existirían días en los que una

reducción en la oferta afectaría más que en otros; por ejemplo, la afectación sería más grave en días de invierno que en días de verano.

En cuanto al comportamiento del desabastecimiento de gas natural, se solicitó un reporte de las alertas críticas a Pemex Gas y Petroquímica Básica (PGPB). La información entregada comenzaba en enero 2002 y finalizaba en mayo 2013 y describía las fechas en las que había sucedido en una alerta crítica, su duración y el volumen de reducción.

Considerando estos datos, se calcularon los siguientes conceptos:

- 1) Duración de los días en que se mantuvo la alerta crítica.
- 2) Tiempo durante el cual no hubo alertas críticas.

Con estos conceptos se optó por calcular 2 probabilidades de distribución. Después de ajustar los datos de las alertas críticas, por medio del método de máxima verosimilitud se dedujo que:

- Duración de las alertas críticas se ajustó a una variable aleatoria log-logística con parámetros, mediana: 2.18265 y forma: 0.616219.
- Tiempo entre alertas críticas se ajustó a una variable aleatoria Weibull con parámetros, forma: 0.67079, escala: 35.67 y umbral inferior: 1.

Para obtener estas distribuciones de probabilidad se utilizó un *software* estadístico que permitiera calcular los ajustes de datos en variables aleatorias, *Statgraphics*. En la Tabla 3.5 se da una mayor descripción de las funciones de probabilidad:

	Parámetros	Definición	Tiempo Inicio	Tiempo Fin	Escala Medición
Weibull	Forma: 0.67079, Escala: 35.67, Umbral inferior: 1	Tiempo entre alertas críticas	Momento en que terminaba una alerta crítica	Momento en que iniciaba la siguiente alerta crítica	Días
Log-Logística	Mediana: 2.18265, Forma: 0.616219	Tiempo de duración de las alertas críticas	Momento en que iniciaba una alerta crítica	Momento en que finalizaba dicha alerta	Días

Tabla 3.5. Funciones de distribución de las alertas críticas. Fuente: Elaboración propia.

Después de ajustar la distribución del tiempo entre alertas críticas, se generaron 30 corridas para generar números aleatorios y se tomó el promedio de cada una de ellas. Lo siguiente a realizar fue obtener un promedio de las 30 corridas, el resultado se tomó como la duración entre las alertas críticas. La simulación inició el 1 de enero de 2012 y finalizó el 31 de diciembre de 2013, ya que durante estos años la problemática resultó más crítica. Para determinar los días en que ocurrirían las alertas críticas se sumó el número el primer promedio obtenido de las corridas al 1 de enero de 2012, determinando así la primera alerta crítica.

Para determinar la duración de las alertas críticas se utilizó el mismo procedimiento que para la primera distribución de probabilidad. Nuevamente, se generaron los números aleatorios mediante 30 corridas y se obtuvieron los promedios de los números aleatorios y se redondearon los resultados. Este último valor se sumó a la fecha en la que inició la primera corrida. La idea general fue utilizar de manera complementaria los datos de ambas distribuciones. Primero se determinó en qué fecha ocurriría la alerta crítica y luego se sumaban el número de días que ésta duraba. Posteriormente se sumaba el valor de la siguiente alerta crítica y volvía a sumarse el número de días que duraría. Si se define como w_i las fechas en las que iniciaba la alerta crítica y como l_i la duración de la alerta crítica en el siguiente diagrama puede verse cómo se realizó la construcción del periodo de alertas críticas:



Así, se obtuvieron 172 alertas críticas para los 731 días para el modelo de corto plazo. Las alertas críticas duraron entre uno y cuatro días. Durante cada alerta crítica se aplicó alguno de los cuatro criterios de optimización.

Se plantearon 30 corridas, de acuerdo con Law y Kelton (1991), se deben realizar diversas corridas, hasta tener un número suficientemente considerable que permita mostrar la aleatoriedad de los datos y evitar sesgos.

Después de una revisión de literatura (Gordon, 1980), se encontraron las siguientes justificaciones que explican por qué se utilizaron estas distribuciones de probabilidad.

- La distribución Weibull es quizás el modelo más utilizado para tiempos de fallo. Se usa tanto para modelar tiempos de duración de piezas manufacturadas como para modelar tiempos de aparición de tumores en medicina.
- Una variable aleatoria T se dice que tiene una distribución log-logística, si su logaritmo $Y = \log(T)$ sigue una distribución logística. La distribución logística se parece mucho a la normal, con soporte en todos los reales, pero con expresiones más sencillas.

Para el caso del volumen a reducir, no fue posible dar una distribución, debido a que la decisión en cuanto a qué volumen debía reducirse el gas se seleccionaba de manera arbitraria. Por lo tanto, se fijaron diversas disminuciones de volumen, cada una conformó un escenario. Las disminuciones fueron desde el 20%, 30%, 40% y 50% de reducción. Así, se podría saber cómo se verían beneficiados o perjudicados los sectores.

Con los resultados obtenidos, se realizaron 30 corridas de la simulación para saber cuántas veces y cuántos días durarían las alertas críticas. Se obtuvo un promedio y se obtuvieron 172 alertas críticas para los 2 años del periodo de simulación. Después, en cada día que ocurría una alerta crítica se

disminuyó la oferta de gas natural, al 80%, 70%, 60% y 50%. Finalmente, en cada alerta crítica, se asignó el gas mediante cada uno de 4 criterios. En las siguientes secciones se describirá este proceso.

3.4. Validación de los datos

A continuación, se muestra la validación de los datos. Los primeros datos fueron los ajustes de las distribuciones que mostraban el tiempo entre fallas y la duración de éstas. Primero se estudiaron los datos y después se observaron sus gráficas de frecuencias. Se realizaron dos pruebas de bondad de ajuste que validaron la selección de las distribuciones elegidas. De acuerdo con Law y Kelton (1991), las pruebas son:

- Criterio de log-verosimilitud; se utiliza la información de la muestra de datos para elegir un valor basado en la probabilidad de éstos. Sea X_1, \dots, X_n una muestra aleatoria de una población X con función de probabilidad P_θ . Para cada muestra particular x_1, \dots, x_n , la función de verosimilitud se define como la función de probabilidad conjunta de X_1, \dots, X_n evaluada en x_1, \dots, x_n . Entre sus propiedades, este estimador tiene varianza mínima y el valor de su media es muy cercano al de la población.
- Estadística Korlmogorov – Smirnov; cuando los datos no se encuentran agrupados, son continuos y forman parte de una muestra pequeña, este estimador es el más indicado. Éste se basa en una comparación entre las funciones de distribución acumulativa que se observan en la muestra ordenada y la propuesta. La comparación revela una diferencia suficientemente grande entre las funciones de distribución muestral y la propuesta, entonces la hipótesis nula de que la distribución es la propuesta, se rechaza.

En la tabla 3.6 se muestran los estadísticos obtenidos con cada distribución, así como sus gráficas.

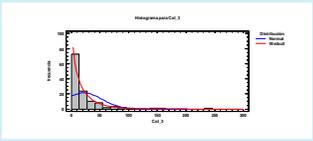
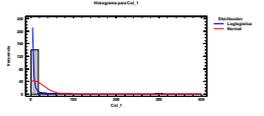
	Log-Ver	K – S	Parámetros	Histograma
Weibull	-479.212	0.199335	Forma: 0.67079, Escala: 35.67, Umbral inferior: 1	
Log-Logística	-334.985	0.0779172	Mediana: 2.18265, Forma: 0.616219	

Tabla 3.6. Validación de los tiempos entre fallas y la duración de éstas. Fuente: Elaboración propia.

Ambas distribuciones Weibull y Log-Logística, pertenecen a un grupo de distribuciones utilizadas en los análisis de supervivencia y riesgo. Estos análisis se caracterizan por un tiempo de fallo o tiempo a la ocurrencia de un evento, en el que la variable aleatoria especifica el tiempo que transcurre hasta que un evento acontece. Se toma en cuenta el tiempo entre la ocurrencia de dos eventos, inicio y fin, o bien la duración de un evento (operación en un sistema). Se conocen como tiempos de vida, falla o supervivencia. Se caracterizan por ser variables aleatorias no negativas que contienen un evento de origen, una escala de medición y un evento de fin (Law & Kelton, 1991).

Para la simulación, se tomaron los pronósticos obtenidos de los consumos de gas y las fallas en el sistema para recrear los años 2012 y 2013. El último registro de las fallas se tiene en junio del 2013, por lo que, para validar el modelo, se realizó la simulación desde el 1° de enero de 2012 hasta el 7 de junio de 2013.

En este modelo se simularon las series de tiempo de los consumos de los sectores y de la disponibilidad del gas, por lo que los datos se encontraban autocorrelacionados. Para validarlo, se tomó en consideración esta característica. Se calcularon los intervalos de confianza de una prueba t pareada. Se tomó en cuenta una comparación entre dos sistemas (el modelo y la realidad). Los intervalos se crearon para las diferencias entre las medias. En una prueba de hipótesis, se estableció la hipótesis nula como la que considera que las medias son iguales, la hipótesis alternativa, promovía lo contrario. En el caso de los intervalos, se considera que si el intervalo contiene el cero no se rechaza la hipótesis nula y si falta el cero, se rechaza.

Retomando las sugerencias realizadas por Law y Kelton (1991), para esta prueba, se esperaba que cada muestra tuviera el mismo número de elementos, pero no se debía que asumir que hubiesen sido independientes entre ellas. La prueba toma las diferencias de los resultados del sistema real menos los resultados del modelo: $Z_j = X_{1j} - X_{2j}$. El intervalo se crea con la media y la desviación estándar de las diferencias:

$$\text{Media del intervalo: } \overline{Z(n)} = \frac{\sum_{j=1}^n Z_j}{n} \quad (3.1)$$

$$\text{Varianza del intervalo: } \widehat{Var}[Z(n)] = \frac{\sum_{j=1}^n [Z_j - \overline{Z(n)}]^2}{n(n-1)} \quad (3.2)$$

$$\text{Estadístico prueba } t \text{ pareada: } \overline{Z(n)} \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\widehat{Var}[Z(n)]} \quad (3.3)$$

Se tomó un nivel de confianza del 95% y los intervalos obtenidos se muestran en la tabla 3.7:

Sectores	Promedio	Raíz (Var (Zn))	Lím sup	Lím inf
Demás Sectores	-510.940	531.308	610.022	-1,631.902
DF Alimentos	-14.001	8.467	3.862	-31.865
DF CyP	-11.221	6.163	1.782	-24.225
DF MetBas	-21.514	19.817	20.297	-63.324
DF ProdMet	-14.551	9.918	6.374	-35.477
DF Química	-9.436	7.616	6.631	-25.504
DF Textil	-6.092	3.158	0.570	-12.753
EM Alimentos	-25.639	26.258	29.761	-81.039
EM CyP	-14.916	14.637	15.965	-45.798
EM MetBas	-51.151	52.150	58.877	-161.179
EM ProdMet	-34.953	38.066	45.359	-115.264
EM Química	-29.691	33.144	40.237	-99.618
EM Textil	-8.508	8.513	9.453	-26.468
Gas Disponible	-932.012	980.143	1,135.909	-2,999.933
Jal Alimentos	-8.762	9.408	11.086	-28.611
Jal CyP	-11.988	9.071	7.150	-31.126
Jal MetBas	-16.425	16.735	18.883	-51.733
Jal ProdMet	-11.282	12.189	14.435	-36.999
Jal Química	-11.592	12.296	14.351	-37.534
Jal Textil	-14.611	7.590	1.402	-30.623
Mich Alimentos	-22.094	19.472	18.989	-63.177
Mich CyP	-13.039	13.570	15.592	-41.670
Mich MetBas	-71.929	53.868	41.723	-185.582
Mich Química	-37.738	28.447	22.280	-97.755
Mich Textil	-8.980	7.664	7.190	-25.149
SLP Alimentos	-10.843	8.968	8.078	-29.763
SLP CyP	-16.888	9.685	3.546	-37.322
SLP MetBas	-16.733	17.423	20.027	-53.493
SLP ProdMet	-8.518	9.212	10.918	-27.955
SLP Química	-9.271	8.901	9.508	-28.050
SLP Textil	-9.862	5.665	2.091	-21.814

Tabla 3.7. Validación de la prueba de comportamiento. Elaboración propia.

A simple vista, se observa que todos los intervalos contienen el cero, así que se puede rechazar la hipótesis nula pues no existe suficiente evidencia de lo contrario. Estos resultados ayudaron a concluir que el modelo sí representó la realidad. Una vez validado el modelo conceptual y el de simulación, se

pueden observar los resultados y aportar elementos para emitir políticas de consumo de gas para los diversos sectores industriales. Una vez obtenida la validación de los datos, se aplicaron los cuatro criterios: diversificación de uso de gas, uso de sustitutos, maximización del valor de la producción y asignación basada en consumos.

3.5. Definición de los criterios para la asignación de gas natural

Para esta investigación, primero se realizó la simulación de eventos discretos para un periodo bianual, considerando a cada alerta crítica como un evento. Se definieron 2 distribuciones de probabilidad, para establecer cada cuándo y cuántos días duraría cada alerta crítica respectivamente. Después de 30 corridas, se determinaron 172 alertas críticas que duraron entre 1 y 4 días, distribuidas en este periodo bianual. En cada alerta crítica se redujo el volumen de gas suministrado al 80%, 70%, 60% y 50%; se consideró cada reducción como un escenario. Para la asignación de gas se plantearon cuatro criterios. Después se evaluaron utilizando cuatro indicadores: Costos, Ingresos, Volumen y Eficiencia energética.

Como se mencionó anteriormente, en otros países como Estados Unidos o Colombia, donde se presentó la problemática de desabasto de gas, el gobierno planteó diversos criterios para asignar gas natural. En este trabajo, primero se plantearon diversos criterios y después se compararon con los que ya existen. Finalmente, se propusieron 4 criterios. La Tabla 3.8 muestra de manera resumida dichos criterios:

Criterio	Diversificación del uso del gas	Uso de sustitutos	Maximización del valor de la producción	Asignación basada en consumos
Descripción	Aplicación de una jerarquía basada en el uso del gas de los sectores. Sujeto a la cantidad de gas asignada a los consumidores industriales.	El modelo brinda la opción a consumir otro combustible. Sujeto a la energía necesaria para un sector.	Se utiliza el valor de la producción para otorgar gas. Sujeto a la cantidad de gas asignada a los consumidores industriales.	Se propuso diversificar el gas a aquellos sectores que usen más el gas natural dentro de sus procesos.
Objetivo	Maximizar el uso del gas, mediante la jerarquización. Aquellos sectores que usen menos gas tendrán mayor preferencia.	Minimizar los costos de compra de combustible, gas y combustóleo.	Maximizar el valor de la producción (PIB). Aquellos que otorguen mayor valor, tendrán preferencia.	Racionar el gas entre los sectores dando preferencia a los que tengan un consumo alto del combustible.
Tipo de Modelo	Modelo de programación lineal	Modelo de programación lineal	Modelo de programación entera binaria	N/A

Tabla 3.8. Descripción de los criterios de asignación de gas natural a los sectores industriales. Fuente: Elaboración propia.

- 1) Diversificación de uso de gas.** Algunos sectores industriales, consumen más gas que otros, esto de acuerdo estructura productiva. En este modelo se deseó que los sectores que normalmente consumían menos gas tuvieran una mayor preferencia que los principales consumidores de gas, pues la intención era asignar gas a más usuarios. La jerarquía se estableció de mayor a menor, aquéllos con consumos mínimos tendrán la calificación máxima. Se añadió una restricción más, la cual indica la cantidad de gas que un sector consume en condiciones normales, para indicar que es lo máximo que puede consumir. La Tabla 3.9 muestra la jerarquía:

Sector	Jerarquía	Sector	Jerarquía
DF Textil	8	Jalisco Productos Metálicos	5
SLP Textil	8	Jalisco Química	5
Jalisco Textil	8	DF Metales Básicos	4
DF Celulosa y Papel	8	Michoacán Celulosa y Papel	4
SLP Celulosa y Papel	8	Edo. Méx. Celulosa y Papel	4
DF Alimentos	7	SLP Metales Básicos	4
DF Productos Metálicos	7	Jalisco Metales Básicos	3
SLP Alimentos	7	Michoacán Alimentos	3
Jalisco Celulosa y Papel	7	Edo Mex. Alimentos	3
DF Química	7	Michoacán Química	2
Edo. Mex. Textil	6	Edo Mex. Química	2
SLP Productos Metálicos	6	Edo. Mex. Productos Metálicos	2
Michoacán Textil	6	Edo. Mex. Metales Básicos	1
SLP Química	6	Michoacán Metales Básicos	1
Jalisco Alimentos	5		

Tabla 3.9. Jerarquía de los Estados y sus sectores correspondientes para el modelo del criterio 3. Fuente: Elaboración propia.

El modelo es el siguiente:

$$\max z = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^6 C_{ij} * x_{ij}$$

$$\text{sujeto a: } \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^6 x_{ij} \leq Q, \quad \forall i, j$$

$$x_{ij} \leq q_{ij}, \quad \forall i, j$$

$$x_{ij} \geq 0$$

Donde:

x_{ij} = cantidad asignada de gas natural para el sector j del Estado i .

C_{ij} = valor de la jerarquía para el sector j del Estado i .

Q = cantidad de gas total racionado para los industriales.

q_{ij} = cantidad de gas que en condiciones normales consume el sector j del Estado i .

i = Estados, de 1 a 5

j = sectores, de 1 a 6

- 2) **Uso de combustibles sustitutos.** En este modelo se planteó la posibilidad de consumir otro combustible a fin de subsanar las reducciones de gas. Sólo 4 sectores podían consumir un sustituto en común, el combustóleo. El modelo minimizó los costos de compra, en este caso sólo se consideró el precio de ambos combustibles.

El poder calorífico neto es la relación entre el volumen de cualquier combustible y la energía que puede producir al realizar su combustión², se planteó la posibilidad de suministrar la cantidad necesaria de energía con un volumen de gas natural y de combustóleo. Lo ideal habría sido que el volumen de combustóleo cubriera la disminución del volumen de gas natural ante una alerta crítica. Sin embargo, el precio del combustóleo resultó seis veces en promedio más costoso que el gas natural, por lo que el consumo del primero fue poco. Los sectores en los que se pudo realizar dicha sustitución fueron: Alimentos, Celulosa y Papel, Metales Básicos y Química. Como referencia, se sabe que estos sectores consumen combustóleo, así que se fijó que el volumen que consumieron durante los años 2012 y 2013 fuera la cota inferior, a partir de ésta, se esperaba que el nivel de consumo se elevara. Se determinó como cero la cantidad que podía consumir de combustóleo a aquél que no consumía. Las proporciones o cotas inferiores fueron:

	2012		2013	
	<i>Combustóleo</i>	<i>Gas Natural</i>	<i>Combustóleo</i>	<i>Gas Natural</i>
<i>Alimentos</i>	10.48%	39.64%	6.07%	43.89%
<i>Celulosa y Papel</i>	11.00%	63.36%	10.35%	65.57%
<i>Metales Básicos</i>	2.17%	54.09%	1.41%	55.40%
<i>Química</i>	6.31%	62.03%	4.43%	63.83%

Tabla 3.10. Proporción del consumo de combustóleo para los años 2012 y 2013 de algunos sectores. Fuente: Elaboración propia.

El modelo fue el siguiente:

² El gas natural se encuentra en estado gaseoso, en cambio, el combustóleo es un combustible líquido. Dada esta condición no son sustitutos perfectos.

$$\min z = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^4 P_{GN} * x_{ij} + P_C * y_{ij}$$

$$\text{sujeto a: } x_{ij} + y_{ij} \leq Q_{Eij} \quad \forall i, j$$

$$x_{ij} \leq q_{rg} \quad \forall i, j$$

$$y_{ij} \geq q_c \quad \forall i, j$$

$$x_{ij} \geq 0, y_{ij} \geq 0$$

Donde:

x_{ij} = energía generada por el gas natural asignado al sector j del Estado i .

y_{ij} = energía generada por el combustóleo asignado al sector j del Estado i .

Q_{Eij} = energía necesaria por el sector j del Estado i que en condiciones normales, sería abastecida por el gas natural.

q_{rg} = cantidad de energía generada por gas natural en condiciones normales.

q_c = cantidad de energía generada por el combustóleo en condiciones normales.

P_{GN} = precio mensual de gas natural (\$/GJ).

P_C = precio mensual de combustóleo (\$/GJ).

i = Estados, de 1 a 5

j = sectores, de 1 a 4

- 3) **Maximización del valor de producción.** De acuerdo con la Prospectiva de Gas Natural y Gas L.P. 2013 – 2027, la demanda de gas natural en el sector industrial está relacionada con la evolución del PIB. En este modelo se maximizó el PIB generado por cada sector de cada Estado, sujeto a la cantidad de gas disponible. Los sectores que aportaran mayor valor a la producción generada, resultaban beneficiados y se les otorgaba una mayor cantidad de gas. Se designó una variable binaria para cada sector, multiplicado por la cantidad requerida de gas. Se sumaron estos productos y fueron restringidos a la cantidad de gas total reducida. Si el modelo arrojaba que una variable tomaba el valor de 1, entonces su sector correspondiente tomaba la cantidad de gas necesaria. El modelo fue el siguiente:

$$\max z = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^6 PIB_{ij} * x_{ij}$$

$$\text{sujeto a: } \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^6 g_{ij} * x_{ij} \leq Q, \quad \forall i$$

$$x_{ij} = 0,1 \quad \forall i, k$$

Donde:

x_{ij} = cantidad asignada de gas natural para el sector j del Estado i , mmpcd.

PIB_{ij} = valor de la producción unitario para el sector j del Estado i ., \$/mmpcd

Q = cantidad total de gas disponible para todos los sectores industriales, mmpcd

g_{ij} = cantidad de gas requerida por el sector i del Estado j , mmpcd.

i = Estados, de 1 a 6

j = sectores, de 1 a 5

- 4) **Asignación basada en consumos.** En este modelo, se asignó la cantidad disponible de gas natural a los diversos sectores, pero la asignación se basó en la cantidad de gas demandada. A mayor demanda de gas, mayor preferencia. Si existe gas para cubrir la totalidad de su consumo, se le otorgaba gas, de lo contrario no se le asignaba. Se definieron una serie de instrucciones para asignar el gas. Durante la revisión de literatura, se encontraron dos documentos que describían métodos parecidos, (Charnes, Cooper, Gorr, & Hsu, 1986). Las instrucciones que se realizaron en cada alerta crítica simulada por cada uno de los escenarios de reducción de volumen, son:
- a. Obtener el promedio de los consumos de todos los sectores.
 - b. Establecer una jerarquía organizando los sectores de mayor a menor consumo.
 - c. En cada alerta crítica simulada:
 - i. Identificar el volumen de gas natural reducido.
 - ii. Identificar los volúmenes de gas necesarios por cada sector por cada alerta crítica.
 - iii. Al gas total reducido restar la cantidad de gas necesaria por los sectores con preferencia: sector eléctrico, petrolero y residencial.

- iv. Bajo la jerarquía establecida, dar gas al primer sector de la lista. Si éste es mayor o igual al gas total reducido, entregar gas sector cuyo consumo sea menor o igual a la cantidad reducida, respetando el orden jerárquico.
- v. Calcular el gas disponible restante: gas total reducido menos gas requerido por el primer sector de la lista.
- vi. Si el gas disponible es mayor o igual, asignar gas al segundo sector de la lista, o al sector cuyo volumen requerido sea mejor o igual a la cantidad de gas disponible.
- vii. Hacer esto con todos los sectores hasta terminar la cantidad de gas reducida.

d. Obtención de los resultados

En la Figura 3.2, se despliega un diagrama para describir cómo se aplicó el modelo de simulación y los modelos de optimización. El modelo de simulación se ejecutó de manera diaria, emulando 2 años, del 1° de enero de 2012 al 31 de diciembre de 2013. La simulación tomó variables aleatorias para representar:

- La duración de las alertas críticas
- El tiempo transcurrido entre alertas críticas

En cuanto ocurría una alerta crítica, disminuía la cantidad disponible de gas y esto duraba de uno a 4 días. Por cada alerta crítica se aplicaron los 4 criterios de asignación. La aplicación de los criterios se realizó por cada escenario (reducciones del 20%, 30%, 40% y 50%). Posterior a la ejecución de la simulación, por cada falla se aplicó uno de los cuatro criterios de asignación para saber de qué manera podría quedar la distribución del gas.

Como se observa, el modelo de simulación sólo se enfoca en la oferta y demanda de gas, dejando de lado la cadena de valor del gas natural, es decir: producción, extracción, transporte, etc. Esto debido a que sólo era necesario abstraer de la realidad y modelar esta parte de la cadena. A este tipo de modelos parciales se les llama *Bottom – Up*, definidos en el Estado del Arte. Es común utilizar modelos parciales que se centran en sólo ciertos sectores de la cadena de valor y desean optimizar un sistema o bien, simular los efectos de éste. Así, por medio de la revisión en literatura, se sustentó la simplificación del modelo. Es necesario recalcar que uno de los objetivos de esta investigación fue

contribuir con elementos para diseñar políticas de asignación, así que el modelo se puede clasificar como *Bottom – up* pues se estudió el comportamiento del sistema para luego optimizarlo. (Teufel, Miller, Massimo, & Wolf, 2013)

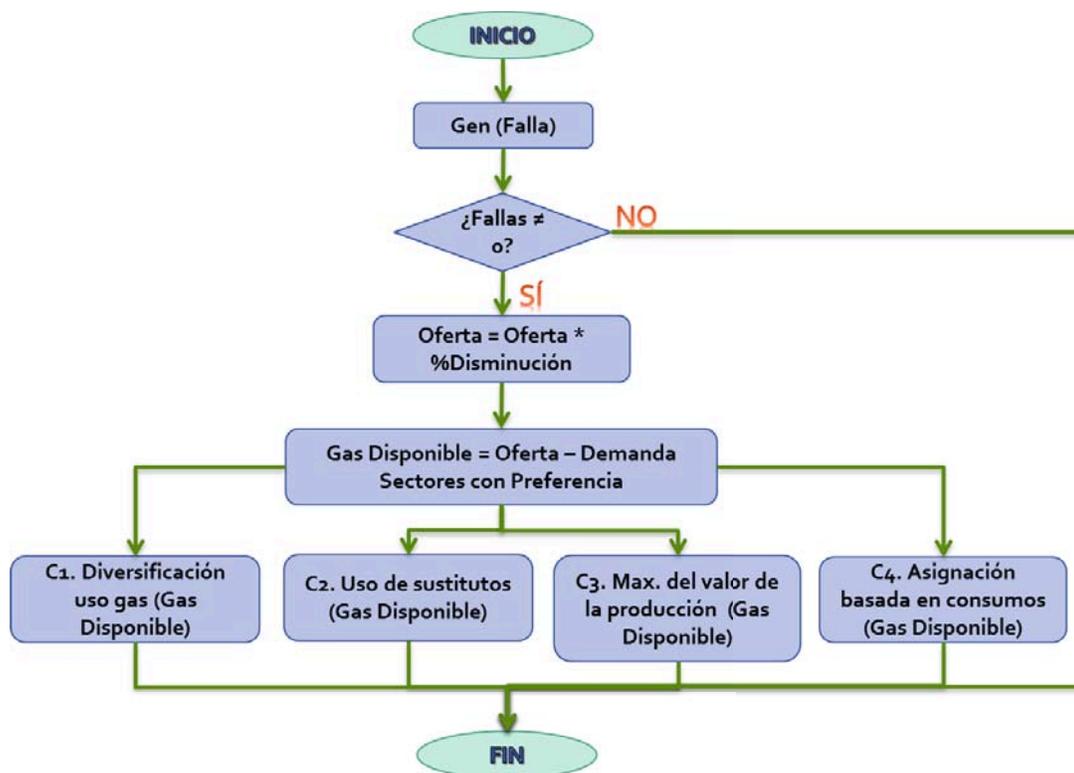


Figura 3.2. Diagrama de flujo del modelo de simulación de corto plazo. Fuente: Elaboración propia.

Haciendo referencia al diagrama de la figura 3.2, los pasos a seguir para el modelo de corto fueron:

1. Realizar la corrida de la simulación. En total, se simularon 172 fallas, la duración de cada una oscilaba entre uno y cuatro días.
2. Establecer las reducciones de gas. Los resultados de la simulación indicaban en qué días disminuía el volumen de gas. Se disminuyó el volumen de gas disponible durante los días en que duraba la falla. El volumen se redujo al 80%, 70%, 60% y el 50%. Posteriormente se restaba la cantidad de gas necesaria por los sectores con preferencia (sectores eléctrico, petrolero, residencial y comercial)

3. Aplicar los criterios de asignación. Si existía una cantidad de gas que podía ser distribuida entre los sectores industriales, se aplicaban los 4 criterios para obtener una cantidad de gas para cada sector.

Los resultados arrojaron que, durante 2 años considerando los ajustes de las distribuciones, ocurrirían 172 fallas cuya duración oscilaba entre 1 y 4 días. En la tabla 3.11 se muestran los volúmenes totales para cada sector. Esto para cada criterio y por cada escenario.

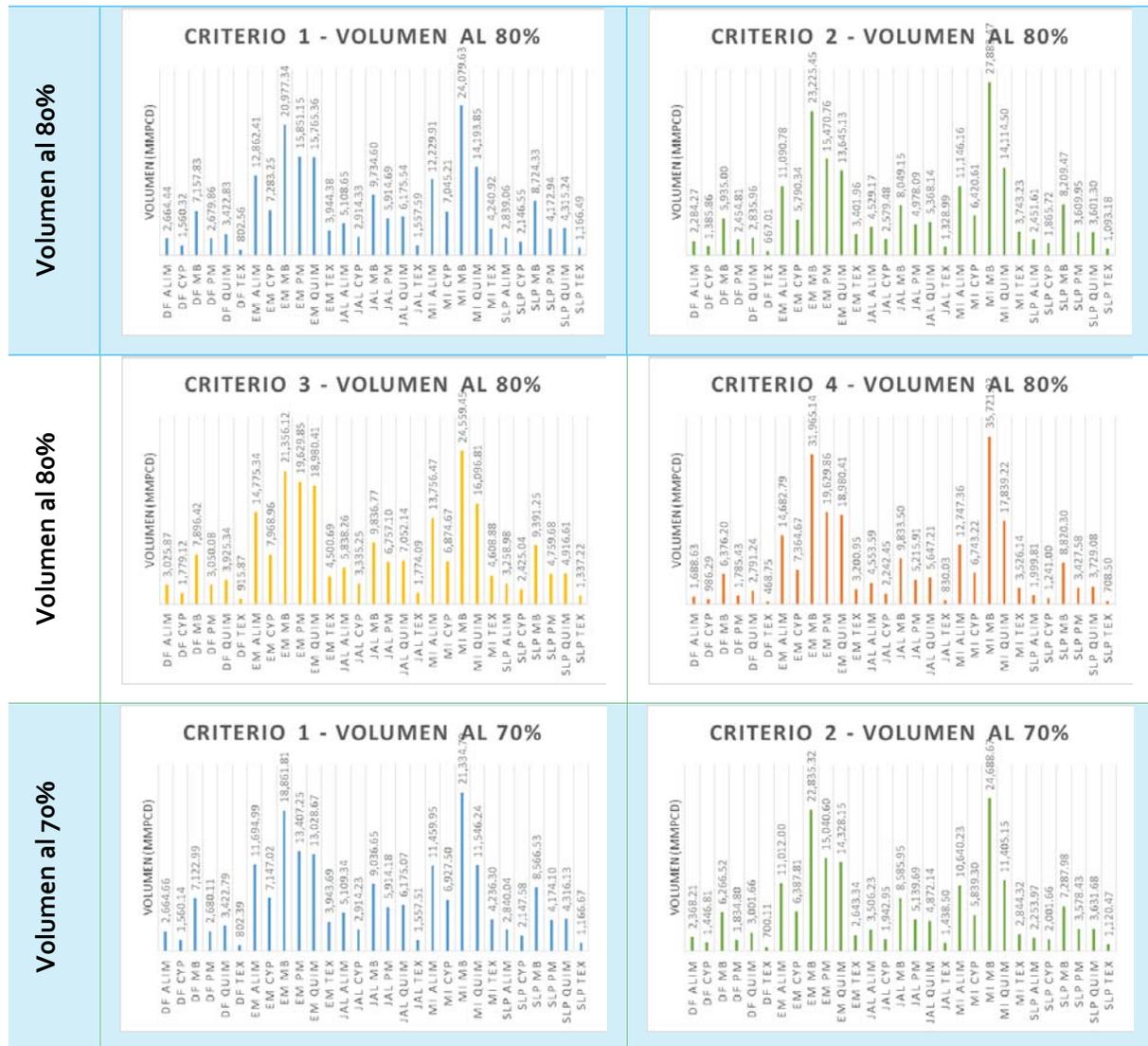






Tabla 3.11. Gráficas de los resultados finales al aplicar los 4 criterios de asignación a cada escenario. Elaboración propia.

A lo largo de esta investigación, se deseó obtener un modelo que representara el comportamiento que sigue el suministro de gas natural de los sectores industriales de las zonas Centro y Occidente del país. Este abastecimiento sigue una estacionalidad propia del mercado, además, existen fallas en el sistema de transporte que impiden, a un número significativo de sectores, obtener lo suficiente para desempeñarse correctamente.

Se obtuvo una amplia cantidad de resultados, así que fueron analizados desde cuatro características y clasificados por Estado y sector industrial:

- A. Costos
- B. Ingresos
- C. Volumen
- D. Eficiencia energética

- A. Costos. Para esta investigación, se consideró el precio del combustible como el único costo. Por cada criterio de asignación, se calculó el costo del volumen asignado a cada sector, multiplicando el volumen de gas natural por el precio mensual. Los resultados se observan en las figuras 3.3a y 3.3b.

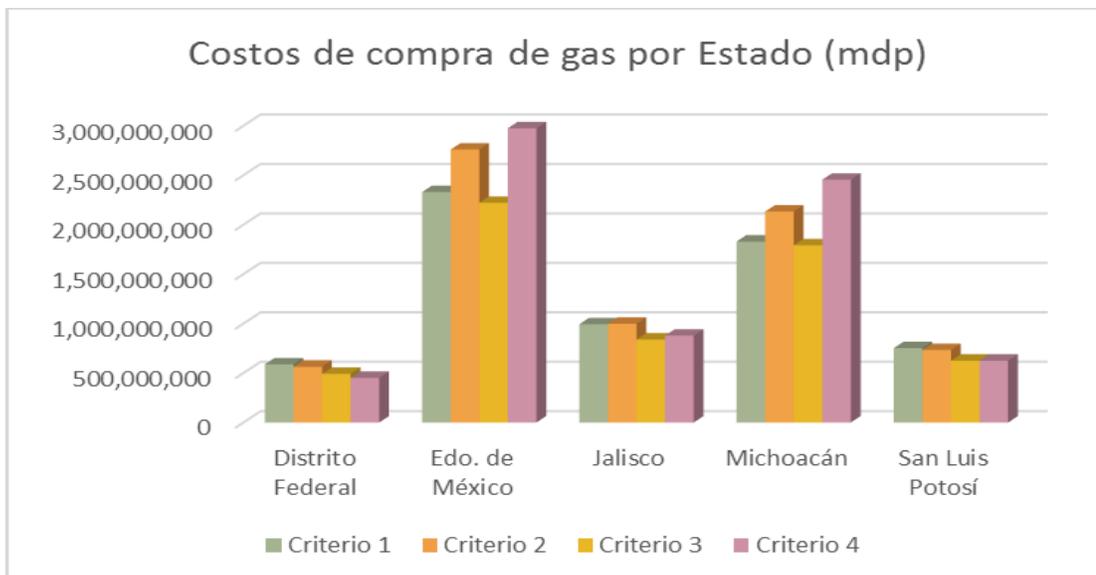


Figura 3.3a. Costos en millones de pesos del gas natural por cada criterio, clasificados por Estados. Elaboración propia.

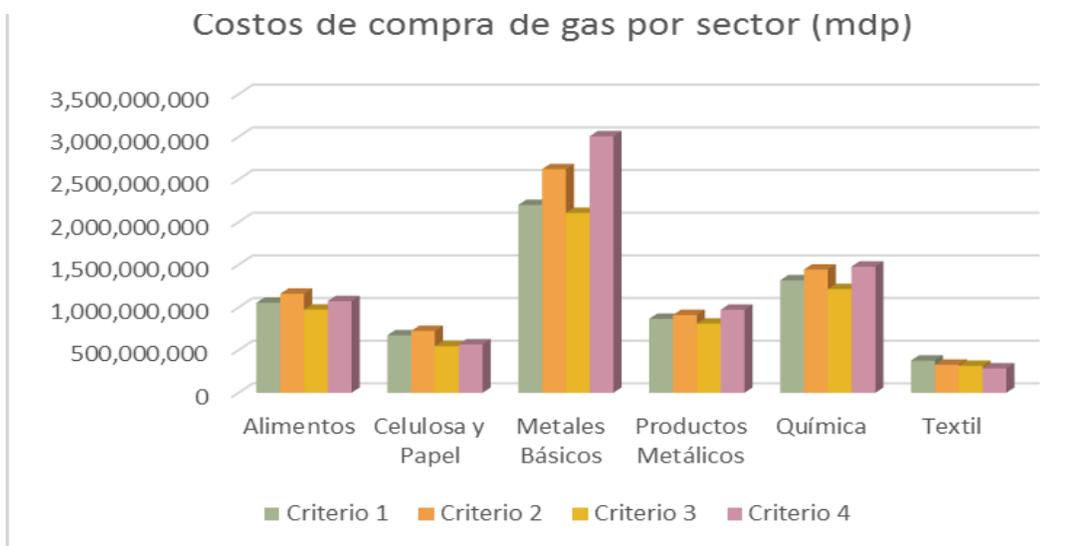


Figura 3.3b. Costos en millones de pesos del gas natural por cada criterio, clasificados por sectores industriales. Elaboración propia.

Entre los Estados que consumen más gas natural están Estado de México y Michoacán; con respecto a los sectores, se encuentran las industrias de Metales Básicos y en segundo lugar Química.

Los Estados que consumen menos gas son Distrito Federal y San Luis Potosí; los sectores son Textil y Celulosa y Papel.

Algo curioso a resaltar es que a pesar de que el criterio 2 refleja los costos de compra del gas natural y del combustóleo (siendo éste seis veces más caro que el gas natural), en la mayoría de los casos, no resultó como el más costoso. En general, se obtuvo que:

- Por Estados; los criterios más económicos fueron 3, maximización del valor de la producción y 4, asignación basada en consumos. Los criterios más costosos fueron 1, diversificación del uso de gas y 4, asignación basada en consumos.
- Por sectores; los criterios más económicos fueron 3, maximización del valor de la producción y 4, asignación basada en consumos. Los criterios más costosos fueron 2 (uso de sustitutos) y 4 (asignación basada en consumos).

B. Ingresos. El valor agregado generado en las empresas contribuye al incremento del Producto Interno Bruto (PIB). Para ponderar la contribución de los Estados o sectores al PIB se calcularon los ingresos mensuales unitarios y se multiplicaron por la cantidad de gas natural que fue asignada mediante los 4 criterios. Los resultados se observan en las figuras 3.4a y 3.4b.

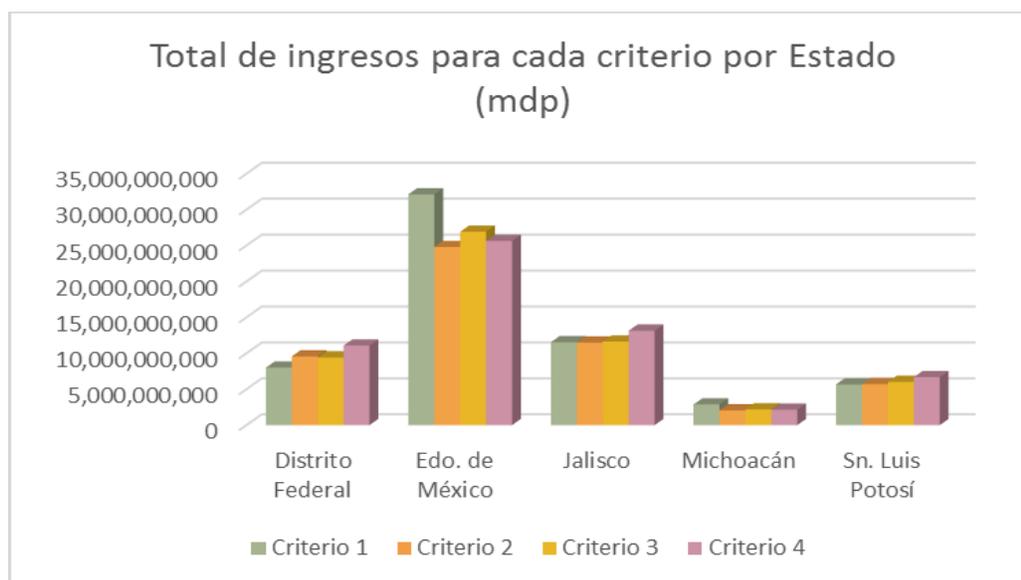


Figura 3.4a. Valor de la producción en millones de pesos por cada criterio, clasificado por Estados. Elaboración propia.

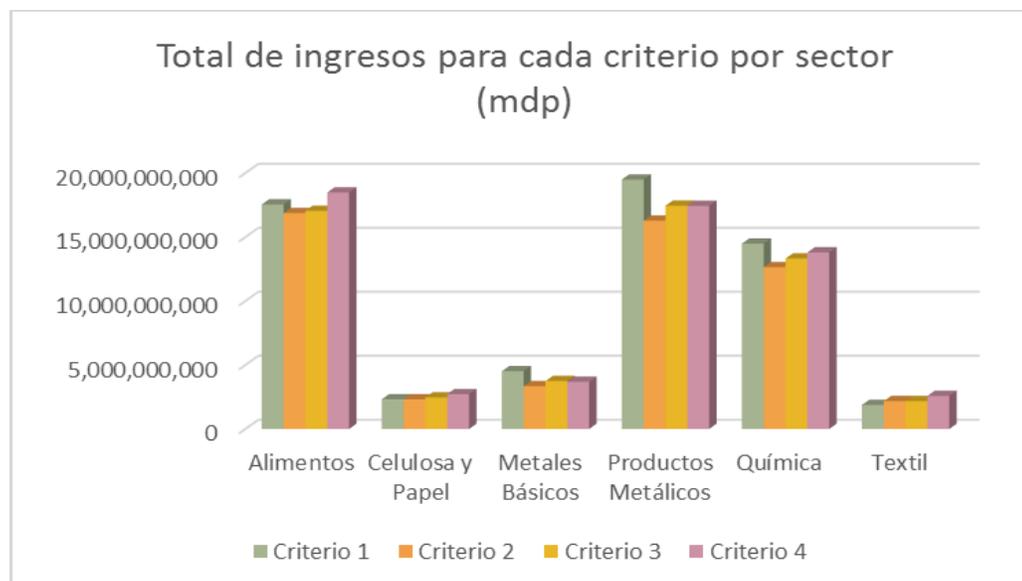


Figura 3.4b. Valor de la producción en millones de pesos por cada criterio, clasificados por sectores industriales. Elaboración propia.

Entre los Estados que contribuyen en mayor medida al PIB son Distrito Federal y Jalisco; en cuanto a los sectores se encuentran Alimentos y Productos Metálicos.

Los Estados que producen menos valor agregado son Michoacán y San Luis Potosí; los sectores son Metales Básicos y Celulosa y Papel. En general, se obtuvo que:

- Por Estados; los criterios que menos PIB aportaron fueron 1 diversificación de uso y 2, uso de sustitutos. Los criterios que más aportaron fueron 1, diversificación del uso de gas y 4, asignación basada en consumos.
- Por sectores; los criterios más económicos fueron 3, maximización del valor de la producción y 4, asignación basada en consumos. Los criterios más costosos fueron 2, uso de sustitutos y 4, asignación basada en consumos.

C. Volumen. Si existe una reducción en el suministro, los sectores no podrán generar adecuadamente su producción. El criterio que aporte mayor volumen será altamente considerado pues lo que se deseó es que el gas se distribuyera entre los sectores de la mejor manera. Aplicando los 4 criterios en los 4 escenarios, se obtuvo un nivel de volumen asignado por cada sector. Finalmente, éstos se sumaron y los resultados se observan en las figuras 3.5a y 3.5b.

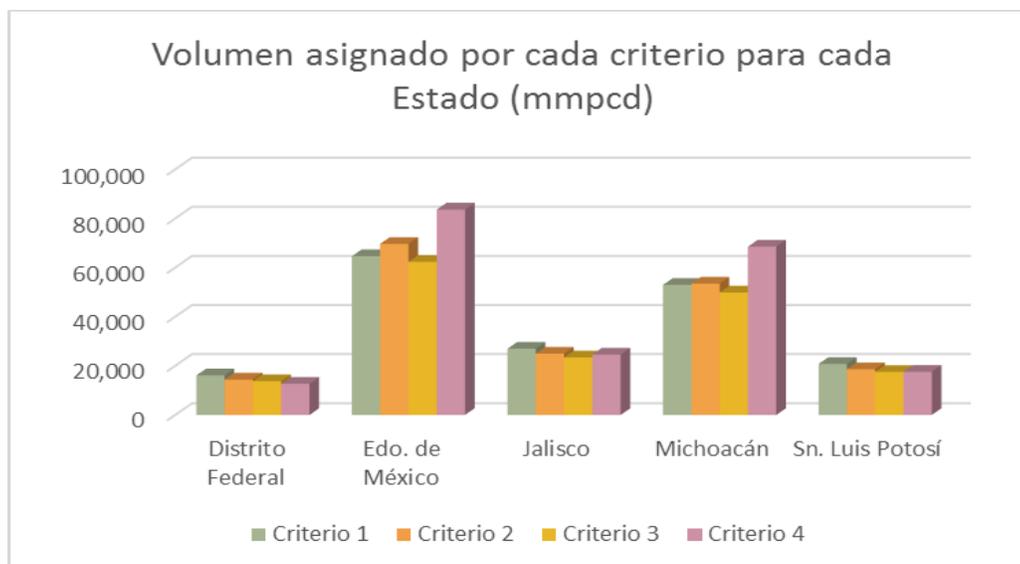


Tabla 3.5a. Volumen asignado a cada criterio, clasificado por Estados. Elaboración propia.

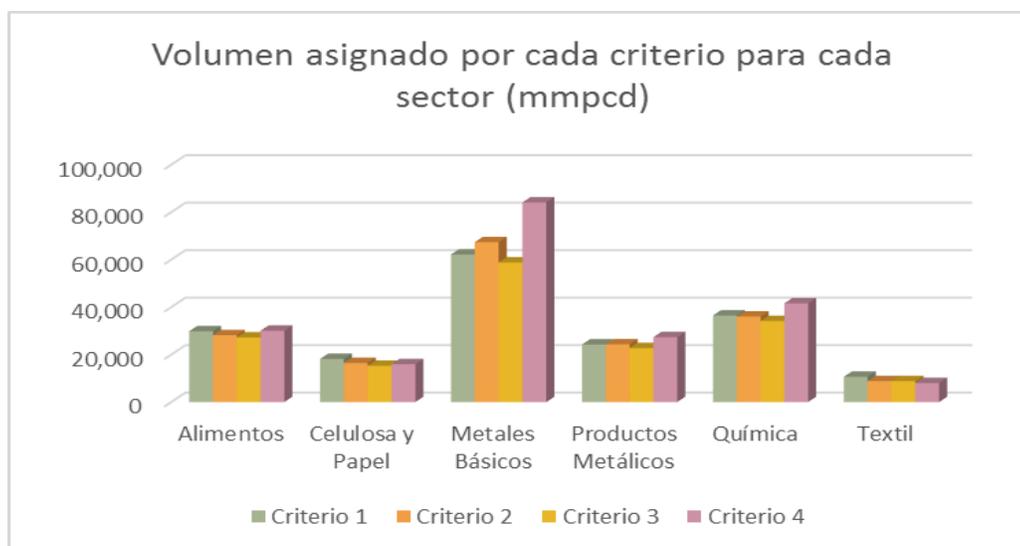


Tabla 3.5b. Volumen asignado a cada criterio, clasificado por sectores industriales. Elaboración propia.

Como información adicional, mediante el análisis de Pareto se obtuvieron cuántos sectores eran cubiertos por el 80% del volumen total racionado en cada criterio³. En la tabla 3.12 se muestra dicha información:

³ El análisis de Pareto ayuda a clasificar y priorizar los problemas en dos clases: los pocos problemas vitales y merecedores de más atención y muchos problemas triviales y un tanto despreciables como una regla de 80/20.

Análisis de Pareto a los 4 criterios por cada nivel de racionamiento (número de sectores)				
	80%	70%	60%	50%
<i>Criterio 1</i>	14	15	16	15
<i>Criterio 2</i>	13	13	13	13
<i>Criterio 3</i>	14	15	15	15
<i>Criterio 4</i>	12	11	12	13

Tabla 3.12. Análisis de Pareto, número de empresas que son abastecidas a un nivel del 80% del volumen racionado. Elaboración propia.

Entre los Estados que contribuyen en mayor medida al PIB son Distrito Federal y Jalisco y los sectores son: Alimentos y Productos Metálicos. Los Estados y sectores que consumen más gas natural: Estado de México, Michoacán y Metales Básicos y Química, respectivamente.

Los Estados que consumen menos son Jalisco y San Luis Potosí; los sectores son Textil y Celulosa y Papel. En general, se obtuvo que:

- Por Estados; los criterios que menos gas aportaron fueron 3 (maximización del valor de la producción) y 4 (asignación basada en consumos). Los criterios que más aportaron fueron 1 (diversificación del uso de gas) y 4 (asignación basada en consumos).
- Por sectores; el criterio que más gas otorgó fue el 1 (diversificación del uso del gas). Los criterios que distribuyeron más gas fueron 1 (diversificación de uso) y 4 (asignación basada en consumos).

D. Energía. El gas natural funge como combustible para la producción industrial. Se usa para generar la energía necesaria utilizada en las plantas y talleres. Se propuso un criterio en el cual, se utilizara otro combustible como sustituto al gas natural, el combustóleo. La idea era que entre ambos combustibles se produjera la energía que los sectores usaran para producir como normalmente lo harían. Dado que el precio del combustóleo resultó seis veces mayor, los resultados indicaron que no era adecuado adquirirlo. En un principio, se pensó que se tendría

un resultado importante, sin embargo, no fue así. A pesar de eso, se presentan los resultados, presentados en las figuras 3.6a y 3.6b.

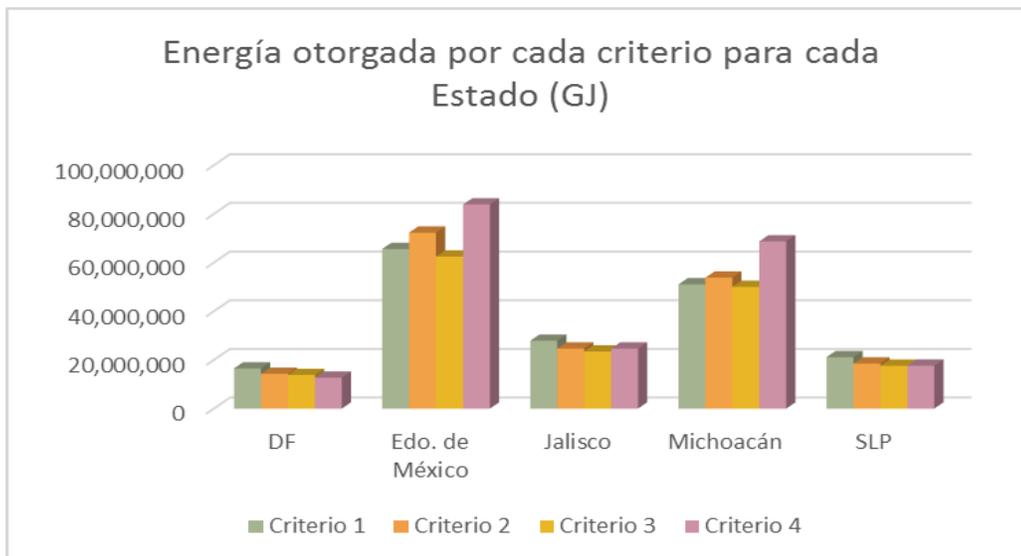


Figura 3.6a. Energía otorgada a cada criterio, clasificado por Estados. Elaboración propia.

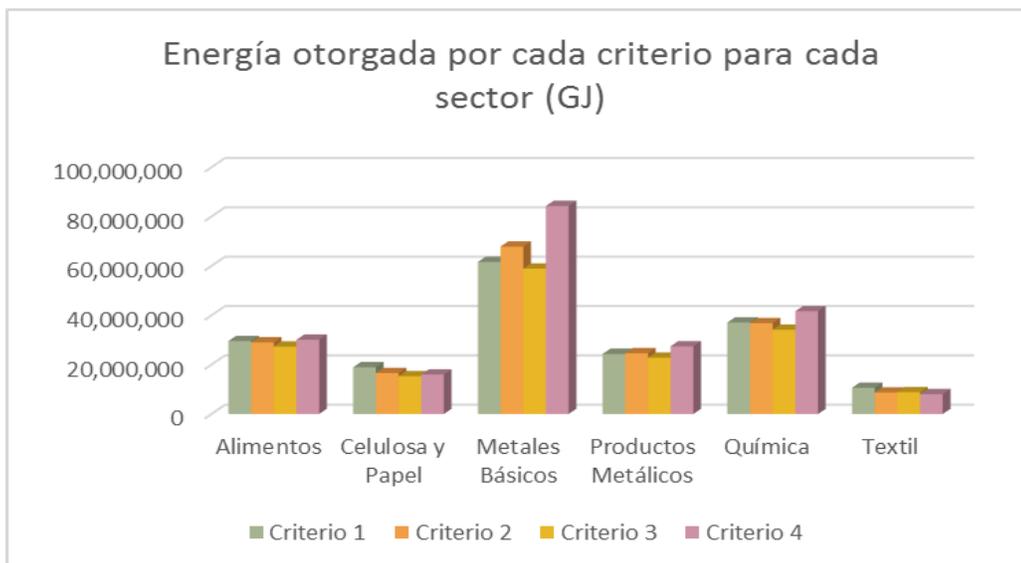


Figura 3.6b. Energía otorgada a cada criterio, clasificado por sectores industriales. Elaboración propia.

Los resultados obtenidos fueron los mismos que en el inciso anterior; los Estados y sectores industriales recibieron más combustible (gas natural y combustóleo) que les permitiría tener la cantidad de energía asignada por los criterios.

Se analizaron los resultados de manera global, es decir, para cada característica (costos, ingresos, volumen y energía) se verificó el total de cada criterio, sumando el total obtenido en cada escenario de reducción de volumen. Los resultados se muestran en la tabla 3.13:

Resultados totales de los criterios de				
	<i>Criterio 1</i>	<i>Criterio 2</i>	<i>Criterio 3</i>	<i>Criterio 4</i>
<i>Costos (mdp)</i>	6,493,932,390	7,188,985,544	5,969,300,615	7,385,897,016
<i>Ingresos (mdp)</i>	60,236,559,968	53,627,026,230	56,225,884,773	58,714,551,624
<i>Volumen (mmpcd)</i>	181,546	181,185	167,014	207,116
<i>Energía (GJ)</i>	182,225,450	183,610,669	167,405,896	207,601,497

Tabla 3.13. Resultado global del modelo de corto plazo clasificado por cada criterio y característica. Elaboración propia.

A simple vista puede observarse que los criterios 1 y 4 generaron los costos e ingresos mayores, pero también brindaron mayor volumen, brindando mayor energía a los sectores industriales. Con esta tabla, pueden observarse además de brindar mayor volumen otorgan mayor energía. Finalmente, lo que se busca es saber qué criterio otorga una mejor asignación del gas entre los criterios 1 y 4. En el último apartado se define qué criterio se eligió al final.

f. Definición de las reglas de asignación

Analizando los resultados de los cuatro criterios fue notable que aquéllos que aportaron más gas natural fueron 1 y 4. El que menos aportó fue el criterio 2. De manera complementaria esto puede ser visto en la tabla 3.12, de la página 69.

Como se mencionó, el criterio 2 otorgó menos gas, lo cual resultó curioso ya que éste promovía la adquisición de otro combustible para subsanar la falta de gas. De los criterios que otorgaron más gas, el criterio 1 asignó gas a más usuarios, en cambio, el criterio 4 aportó a menos usuarios. La preponderancia de algunos sectores o Estados en algunos criterios provino de sus características: generación del valor de su producción (PIB), volumen de gas consumido y energía requerida. Esto se puede ver gráficamente observando la figura 3.7.



Figura 3.7. Diagramas que muestran de mayor a menor, los niveles de consumo de gas natural y los niveles de generación del valor de la producción de los Estados y sectores industriales. Elaboración propia.

Si se analiza cada criterio, se podrá saber por qué se obtuvieron ciertos resultados:

- Criterio 1. Diversificación de uso de gas; se enfocó en los sectores y Estados que menos gas utilizan, así que asignó el gas a un mayor número de usuarios con respecto a los otros criterios. Sin embargo, dejó a algunos sectores, los que necesitan más gas, sin éste.
- Criterio 2. Uso de sustitutos; consideraba consumidores que fueran aptos para utilizar combustóleo. Sólo dos sectores no lo consumían: Textil y Productos Metálicos; así que se esperaba que los demás sectores consumieran combustóleo, permitiendo asignar el gas natural de mejor manera. Dados los costos, esto no pudo ser posible.
- Criterio 3. Maximización del valor de la producción; la producción de un país genera un valor que se ve reflejado en el producto interno bruto (PIB). Este criterio consideró prioritarios a los sectores que mayor valor producían, por lo que a éstos se les entregaba gas en primer lugar. Después a los que menos valor generaban.

- Criterio 4. Asignación basada en consumos; da prioridad a los usuarios que consuman más gas, dejando como minoría a los industriales que menos gas utilizan. En este caso no se utilizó algún modelo lineal sino simplemente fue una asignación basada en una jerarquía.

Por lo tanto, se puede concluir que a pesar de haber elegido criterios basados en distintos objetivos como son costos, ganancias y eficiencia energética, lo que se deseaba era proponer diferentes criterios. Después del análisis, se observó que los criterios 1 (Diversificación de uso de gas) y 4 (Asignación basada en consumos) cumplen de la mejor manera las características descritas; son económicos, generan ganancias y otorgan gas. Desde el punto de vista social, el criterio 1 es mejor, ya que otorgó gas a más usuarios, sin embargo, dejó de lado a los usuarios que normalmente consumen más gas natural. Desde el punto de vista económico, el criterio 4 es mejor, ya que otorgó gas a menos usuarios, pero produce más ganancias y protege a los grandes usuarios. Sin embargo, dado que es un mercado regulado, donde interviene el Estado, la mejor opción es el criterio 1, Diversificación de uso de gas. Este criterio es parecido a uno actualmente utilizado en otros países, llamado pro rata (Comisión Reguladora de Energía y Gas Natural, 2012); en éste se disminuye en la misma proporción la cantidad de gas para cada usuario. En este caso se propone dar prioridad a aquéllos que consuman menos, así, más usuarios podrán consumir la oferta reducida de gas. Cabe mencionar, que algunos de los pequeños consumidores como los sectores Textil y Papel y Cartón no tenían la posibilidad de utilizar otro combustible, así que este criterio fue muy conveniente.

Los criterios ayudarían en el corto plazo, no obstante, fue necesario solucionar el problema central, que era la falta de capacidad en el sistema. Es por esto que en la siguiente sección se describe un modelo propuesto para resolver esta situación.

4. Política en el largo plazo: aumento de capacidad

En el apartado anterior se describió un modelo de simulación que emulaba el desabasto de gas natural sufrido por los sectores industriales. Al describir la problemática, se planteó la utilización de un modelo de Dinámica de Sistemas para crear una política que permitiera el crecimiento de la capacidad de los gasoductos.

Para el análisis de la problemática en el corto plazo, se propuso observar un sistema: el abastecimiento de los clientes industriales que consumen gas natural en las zonas centro y occidente del país. Así también, se había dividido la problemática de acuerdo con el horizonte de tiempo. El problema central continuó siendo el desabasto de gas natural, sólo que en el largo plazo se propuso la modificación de la infraestructura.

De acuerdo con la teoría (Aracil, 1995), los sistemas están formados por diversos elementos que forman relaciones complejas a través de su interacción. Muchas veces, las interacciones entre los elementos, así como sus características inherentes pueden desembocar en problemáticas. Por lo tanto, si se desea resolver la problemática, de acuerdo con la Dinámica de Sistemas, no puede ingresar un elemento exógeno a este sistema que mejore su comportamiento. Una buena herramienta que estudia dicho comportamiento es la simulación de Dinámica de Sistemas; que analiza la estructura y el comportamiento del sistema en el tiempo. El resultado de la simulación genera políticas eficientes que mejoran la gestión del sistema. Retomando lo visto en el Estado del Arte. Utiliza la simulación por computadora para tomar el conocimiento del sistema y su ambiente, con la finalidad de mostrar las causas y efectos que desembocan de su comportamiento. La Dinámica de Sistemas demuestra cómo la mayor parte de nuestras propias políticas de toma de decisiones son la causa de los mismos mecanismos inherentes en el sistema. Existen eventos exógenos que no se pueden controlar, sin embargo, el sistema por sí mismo encuentra un mecanismo para regularlos en el tiempo. El modelo planteado se abstrae del sistema para crear una estructura de éste, al ejecutarlo, se recrea su comportamiento.

Se propuso utilizar este tipo de simulación para analizar el mercado del gas natural en México. La aplicación de la simulación desarrolló un modelo que simplificó el comportamiento del transporte de gas natural en el país con la finalidad de obtener elementos que contribuyan al diseño de una política

que ayudara a aumentar su capacidad. De esta manera, se disminuirían, en el largo plazo, las fallas en el sistema que provocaran el desabasto. En la figura 4.1 se muestra el esquema de la metodología utilizada para la creación del modelo en el largo plazo:

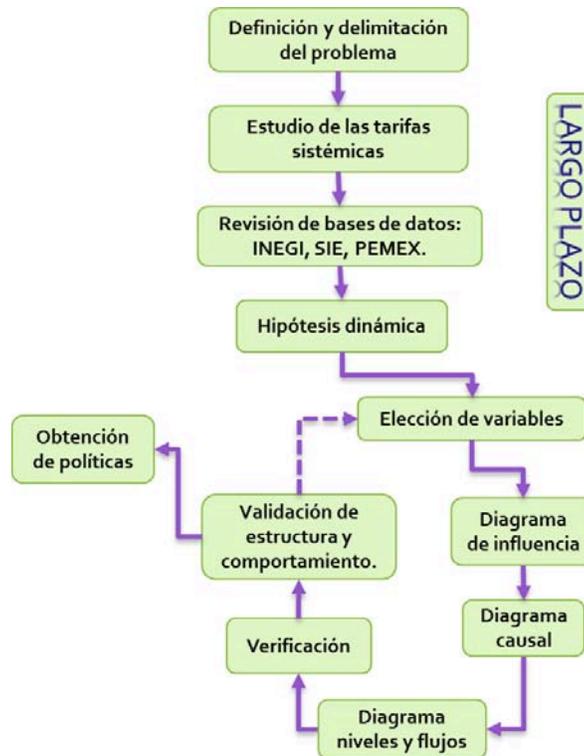


Figura 4.1. Diagrama que describe el desarrollo del modelo de simulación en el largo plazo. Elaboración propia.

4.1 Revisión de Literatura. Modelo de Dinámica de Sistemas

Se han definido una serie de metodologías para crear modelos de Dinámica de Sistemas; para esta investigación se consideró usar dos y unir las. De acuerdo con González-Busto y Mújica (1998) y Sokolowski y Banks (2010), la Dinámica de Sistemas dispone de una metodología propia para el proceso de modelado y análisis que se sintetiza en las siguientes cuatro fases, mostradas en la figura 4.2:

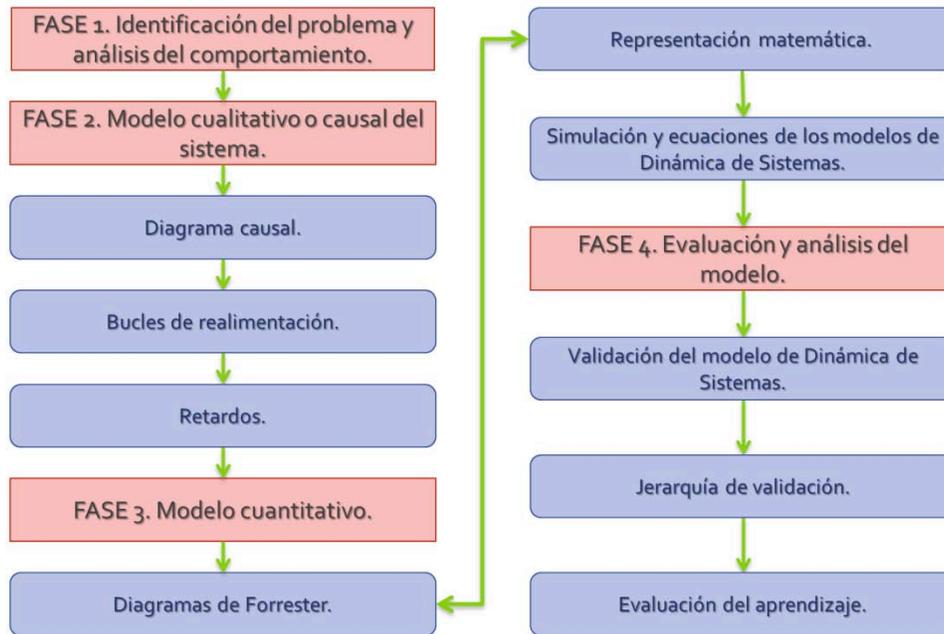


Figura 4.2 Metodología propuesta para la simulación de Dinámica de Sistemas. Fuente: (Sokolowski & Banks, 2010), (González-Busto Mújica, 1998)

En este apartado se describe cómo se utilizó la metodología anteriormente mostrada para plantear el modelo de Dinámica de Sistemas.

La cadena de suministro de gas natural fue mostrada en la Figura 2.2. Para el modelo de largo plazo, se optó por aplicarlo al mercado nacional de gas natural. Éste, involucró la oferta y la demanda, administradas por el sistema de transporte conocido como: Sistema Nacional de Gasoductos, SNG. Como se explicó brevemente, en México el gas natural se transporta por ductos. La creciente demanda no pudo ser abastecida, pues la infraestructura (SNG) no se desarrolló de igual manera. De manera simplificada, la cadena de suministro se planteó como se muestra en la Figura 4.3:

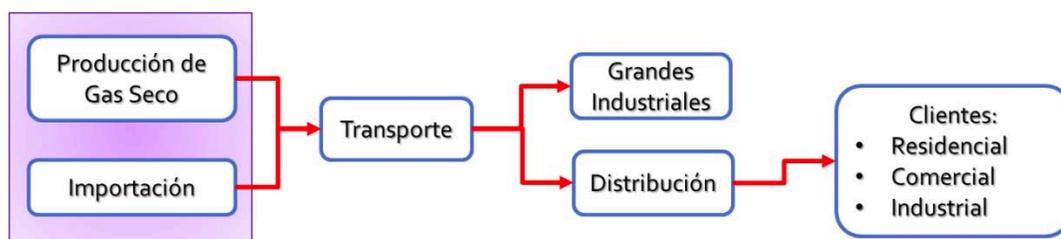


Figura 4.3. Simplificación de la cadena de suministro de gas natural en México. Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, en cada eslabón, se simplificaron los elementos involucrados a fin de sólo considerar aquéllos que tuvieran una relación relevante con respecto al suministro de gas natural. El transporte de gas natural o gas seco a través de ductos desde los CPG, es regulado por la Comisión Reguladora de Energía (CRE). Hasta el 2013, el transporte de gas natural se definía como la actividad de recibir, conducir y entregar gas por medio de ductos a usuarios finales y a aquéllos que no lo fueran, localizados dentro de un área delimitada por la CRE para su distribución.

Al ser un mercado regulado en el cual, las entidades gubernamentales desarrollan legislaciones que evitan actividades monopólicas, a través de: fijación de precios, tarifas, niveles de producción y participantes del mercado. De acuerdo con la Comisión Federal de Mejora Regulatoria, la regulación económica se define como (Secretaría de Economía, 2015):

El conjunto de disposiciones mediante las cuales el gobierno interviene en los mercados para fijar precios o cantidades de la producción, o establecer especificaciones técnicas y en general, restricciones que deben cumplir los ciudadanos y las empresas para participar en un mercado. Generalmente, este tipo de regulaciones se establecen en mercados relativamente concentrados o caracterizados por economías de redes.

En el Estado del Arte se mencionaron algunos modelos que mostraron que la aplicación de Dinámica de Sistemas en este tipo de problemáticas es adecuada. En el apartado de validación se retomará esta revisión de literatura.

4.2 Formulación de la hipótesis dinámica

Una vez que el problema ha sido identificado se desarrolla la hipótesis dinámica, que describe el comportamiento de dicha problemática. De acuerdo con Sterman, la hipótesis debe proveer una explicación de la dinámica que caracteriza al problema, da a entender cómo surgió el problema. Está sujeta a revisión ya que se modifica a medida que se desarrolla el proceso de modelado. El modelo de simulación, su experimentación y modificación ponen a prueba la hipótesis.

La Dinámica de Sistemas busca una explicación endógena del comportamiento de cualquier sistema. Sterman define la palabra "endógeno" significa "que surge desde dentro." Una teoría endógena genera la dinámica de un sistema a través de la interacción de las variables del modelo (Sterman,

2000). Al especificar cómo se estructura el sistema y las reglas de interacción, se pueden estudiar los patrones de su comportamiento y saber cómo modificarlo. Por lo que esta razón es de suma importancia para establecer la hipótesis dinámica.

Así, en la problemática definida, se estableció la hipótesis siguiente:

A medida que se incrementa el desarrollo industrial en el país, se requerirán más combustibles, entre ellos el gas natural. Por lo tanto, si aumenta el crecimiento económico, debe aumentar la infraestructura para cubrir dicha demanda. El crecimiento económico del país podrá cubrir los costos del desarrollo de la infraestructura.

Con la definición de la hipótesis y la delimitación de la problemática se eligieron las variables que se consideraron importantes para la solución de ésta. En la siguiente sección se describirán dichas variables.

4.3 Diagrama de Influencia

Durante el proceso de documentación para esta investigación, se observó una característica del proceso de modelación; éste es iterativo y continuo. Por lo que la elección de variables debe realizarse hasta que el modelo cumpla con el propósito o la meta de estudio que se requiere. En un principio, se deseó modelar las condiciones de oferta y demanda de los distintos componentes de la cadena de suministro de dicho combustible bajo incertidumbre que afectan a los sectores industriales. Sin embargo, en el largo plazo es necesario analizar todo el mercado. La finalidad fue encontrar alguna política que evitara la falta de infraestructura y así proveer el gas necesario para todos los usuarios. Así, la primera tarea fue delimitar el sistema, considerando los elementos más significativos que afectaban el suministro de gas a la industria. El modelo conceptual se puede mostrar con el siguiente diagrama de influencia:

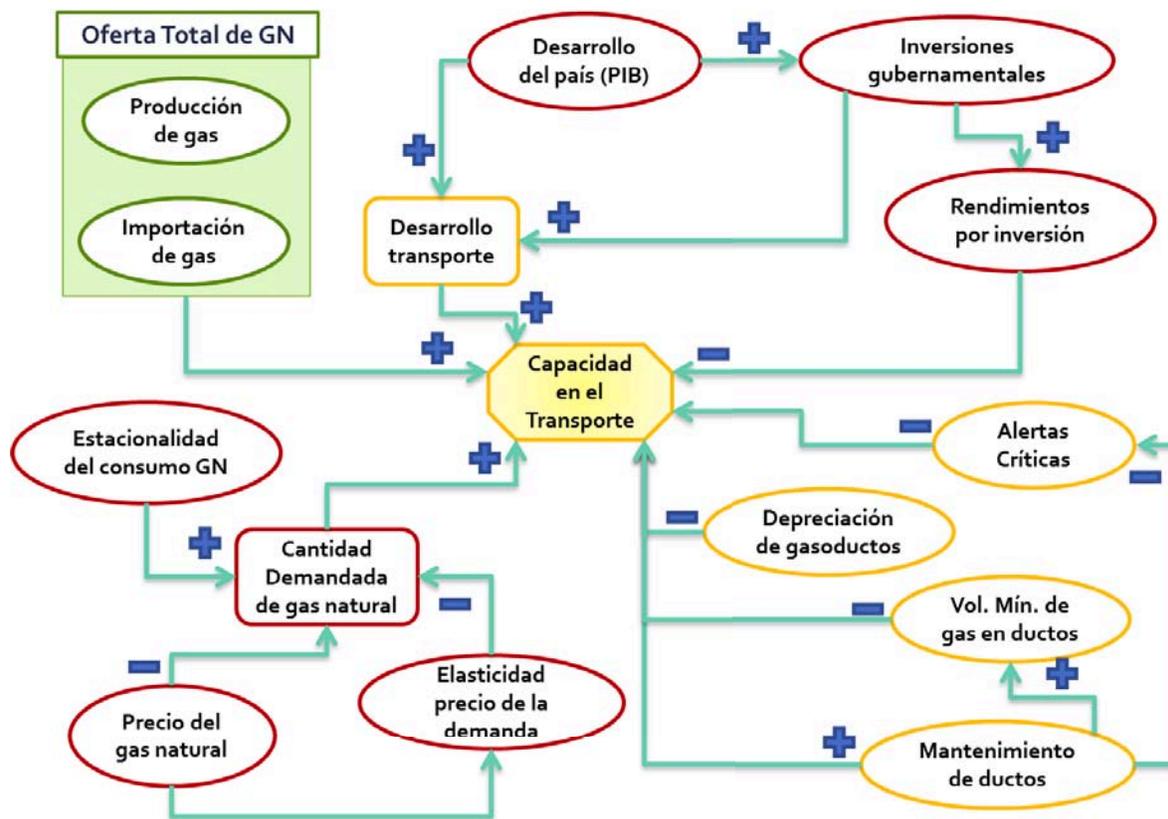


Figura 4.4. Diagrama de influencia de la distribución de GN. Elaboración propia.

El diagrama se clasificó por colores de acuerdo con los agentes principales de la cadena de suministro simplificada y con los principales factores:

- Verde: la oferta de gas natural, conformada por producción de gas seco e importaciones.
- Amarillo: transporte y distribución, así como alertas críticas que son un problema de capacidad de transporte.
- Marrón: valores macroeconómicos que afectan el consumo de los combustibles, así como la demanda de gas natural.

Los diagramas de influencia se caracterizan por utilizar 3 tipos de figuras geométricas que clasifican las variables de acuerdo con su definición:

- Cuadrado; indican una decisión;
- Círculo; son variables de azar o no controlables;

- Octágono; indica la decisión final.

En este caso, la variable de decisión final o meta es la capacidad en el transporte de gas natural, afectada por los diversos elementos mostrados en el diagrama.

Además, se añadieron signos de más (+) o de menos (-) para señalar qué tipo de relación existía entre los elementos del sistema. Esto significa que la relación es positiva, (si es un signo de más, +) o negativa (si es un signo de menos, -). Es decir, la relación positiva indica que: si aumenta un elemento, entonces aumentará el otro que está conectado. Si la relación es negativa, entonces: si aumenta un elemento, el otro disminuirá y viceversa. Esto ayuda a la creación de los bucles de realimentación (diagrama causal) y posteriormente el diagrama de niveles y flujos.

Se tomaron en cuenta las siguientes interrelaciones que se formaban con los elementos del modelo conceptual para finalmente crear el bucle que relacionara todos éstos:

- Si aumenta el consumo de gas y se desea cubrirlo, entonces debe aumentar la oferta, ya sea importaciones o producción.
- Si aumentan las importaciones entonces será necesario buscar capacidad no utilizada de transporte que envíe el gas.
- Si la capacidad de transporte llega a su límite, entonces ocurrirá una alerta crítica y por ende, disminuirá el suministro.
- Si aumenta la demanda, entonces aumentará el precio, sin embargo, como la demanda es inelástica, disminuirá poco en comparación al aumento de precio.
- Si aumenta la demanda, debe incrementarse la capacidad de transporte.
- Para que aumente la capacidad de transporte, es necesario que aumenten las inversiones del gobierno.
- Si aumenta el crecimiento económico del país, aumentará el consumo del combustible.

Como se mencionó anteriormente, el objetivo de la Dinámica de Sistemas es comprender las causas estructurales que provocan el comportamiento del sistema. No pretende predecir detalladamente el comportamiento futuro, sino estudiar un sistema a través de la experimentación de diferentes políticas. Una vez conocidas las variables del sistema y las relaciones causales entre ellas, se pueden crear los bucles de realimentación, que se describirá en la siguiente sección.

4.4 Diagrama causal

De acuerdo con Forrester, (Ghaffarzadegan, Lyneis, & Richardson, 2010), para crear un modelo con Dinámica de Sistemas, hay básicamente tres "bases de datos" que proporcionan la base de conocimientos:

- 1) Las que hablan sobre la evolución histórica y las presunciones sobre posibles enfoques de cómo resolver el problema que enfrentan.
- 2) Las escritas que son transcripciones de informes, manuales, trabajos publicados. Se acercan al problema considerado sólo parcialmente y, por tanto, juegan un papel menor en el modelado.
- 3) La tercera base de datos, es el conocimiento experto de los principales participantes en el sistema.

Existen ciertas situaciones que podrían representarse de manera similar, después del análisis de diversos comportamientos, se establecieron ciertos patrones para desarrollar algunas estructuras claves. A éstas, Senge (1990) las llamó arquetipos. Este tipo de diagramas se usan para representar la esencia de situaciones comunes, lo que ayuda a enfocar la problemática en algún diagrama ya existente que ayude a definir su estructura y, en consecuencia, su comportamiento.

El arquetipo que se apegó a la estructura de la problemática es llamado Oscilación (Senge, 1990). En éste, se fija una meta y el estado del sistema puede tomar valores que, con el paso del tiempo, fluctúe alrededor de ésta. Dichas oscilaciones son causadas por el comportamiento del sistema y los bucles de realimentación negativa. La oscilación surge cuando el estado del sistema se compara con su objetivo, si hay una discrepancia entre éstos, se toman medidas correctivas para eliminar la discrepancia. Se dice que el sistema oscila ya que, al tratar de apegarse a su meta, que la variable de decisión final puede tener un valor mayor o menor a ésta. Los retardos de tiempo causan acciones correctivas para continuar, lo que lo ajusta en el tiempo, es por esto que oscila el valor del estado del sistema alrededor del valor de la meta. Al ser un bucle negativo, es un bucle de refuerzo, es decir, constantemente busca el equilibrio. La oscilación es un efecto de la búsqueda del equilibrio, así como del tiempo que el estado actual alcanza su objetivo. El objetivo puede ir cambiando en el tiempo, de acuerdo con el comportamiento del sistema. El arquetipo se muestra en la figura 4.5:

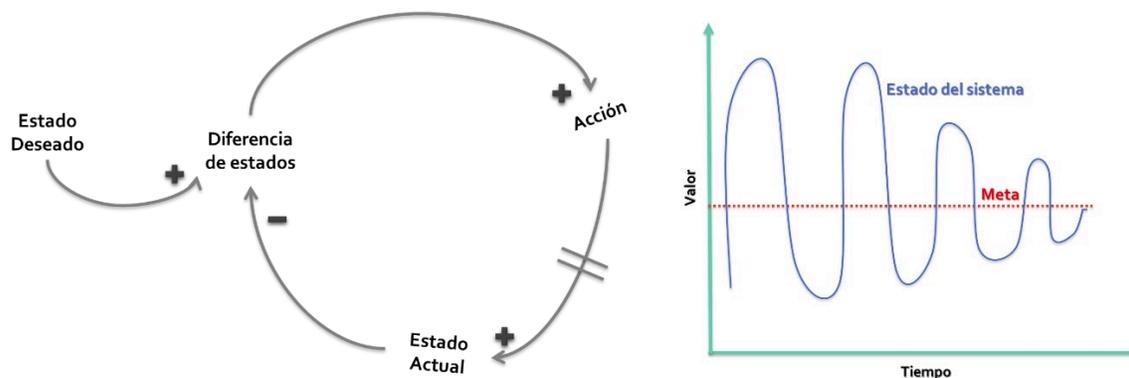


Figura 4.5. Diagrama causal del arquetipo Oscilación. Fuente: (Senge, 1990)

Después de revisar los datos numéricos y los informes que describían y analizaban el mercado de gas natural en el país, se hizo una revisión de los elementos que se deseaban reflejar y los presentados en el diagrama de influencias. La idea central fue formalizar los elementos del sistema, utilizando los elementos definidos en el diagrama de influencias se utilizaron para construir el diagrama causal. Como se describió anteriormente, el diagrama causal está formado por variables que se relacionan de manera endógena, formando un pequeño ciclo, así, en la tabla 4.1 se muestra la relación entre las variables definidas para el diagrama causal y las mostradas en el diagrama de influencias:

Variables del diagrama de influencias	Variables del diagrama causal
Cantidad demandada de gas natural, estacionalidad del consumo de gas natural, desarrollo del país (PIB)	Demanda esperada de gas natural, crecimiento del PIB, crecimiento de la población
Desarrollo del transporte, capacidad en el transporte	Diferencia entre la capacidad deseada y la construida, capacidad efectiva
Precio del gas natural	Precio del gas natural, tarifa de transporte
Rendimientos por inversión	Tasa de rentabilidad
Depreciación de gasoductos, volumen mínimo de gas en ductos	Capacidad deseada, capacidad en construcción, capacidad efectiva
Volumen mínimo en los gasoductos	(Factor de Carga)

Tabla 4.1. Tabla que relaciona las variables del diagrama de influencias y las del diagrama causal. Elaboración propia.

Se consideró que las alertas críticas resultaron consecuencia de la falta de capacidad por lo que se determinó integrarlas en ésta. La capacidad de transporte debe considerar la demanda esperada, por así que se optó por definir la diferencia entre la capacidad deseada y la construida; de esta manera se define la necesidad de desarrollar el sistema de transporte. La tarifa de transporte forma parte del precio del gas natural. Finalmente, los conceptos de la columna derecha se interrelacionaron formando un diagrama causal que se muestra en la figura 4.6 siguiente:

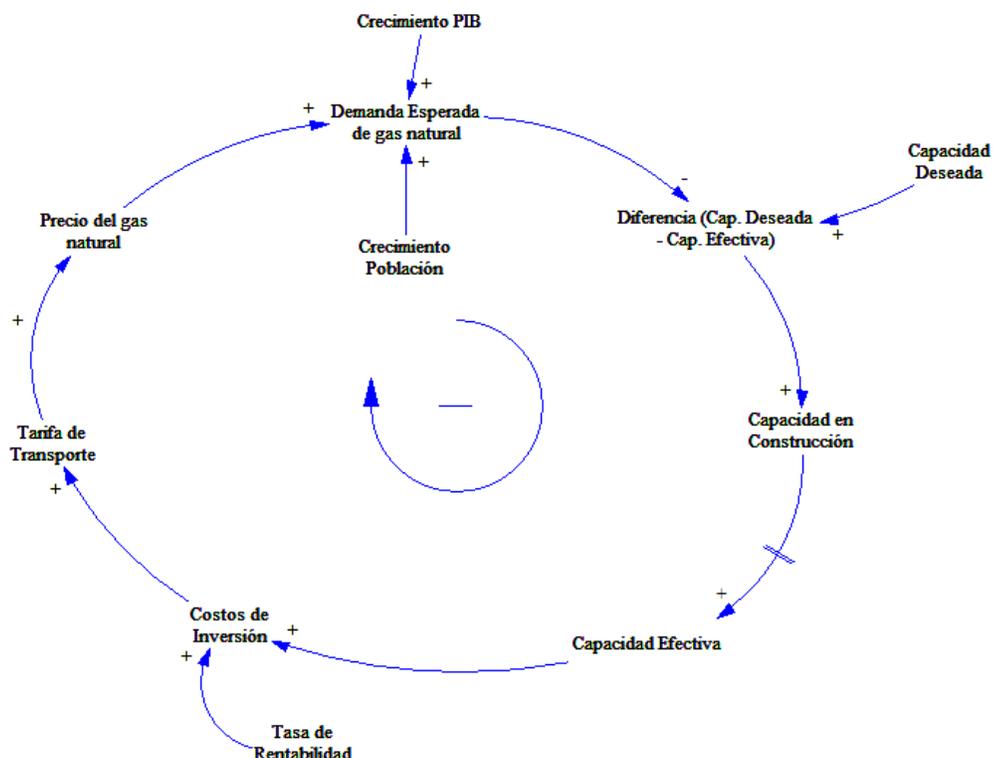


Figura 4.6. Diagrama causal del modelo de capacidad de transporte del gas natural. Elaboración propia.

Este bucle es de balance, esto es, que en el tiempo alcanza el equilibrio. Como se ha descrito, el modelo debe mostrar la estructura y la simulación de éste el comportamiento simplificado de la realidad. La idea central del modelo es buscar políticas que modifiquen el estado actual y se cumpla la meta deseada. En este sentido, lo que se desea es tener la capacidad de transporte necesaria para abastecer de gas natural al país. Los siguientes puntos describen el modelo planteado:

- El aumento o disminución de la capacidad debe encontrarse ligada a un pronóstico de la demanda de gas natural.

- A su vez, la demanda de gas dependerá del crecimiento económico del país, (reflejado en el PIB) y del crecimiento de su población.
- La construcción de ductos depende de una inversión y una rentabilidad que se espera de éstos.
- Sin embargo, dicha inversión se debe ver reflejada en una tarifa de transporte que impactará en el precio del combustible; esta tarifa debe involucrar a todos los usuarios, así, a mayores usuarios habrá mayor inversión para desarrollar más ductos.
- Al aumentar el precio del combustible, podría disminuir la demanda en una proporción.
- Finalmente, de acuerdo con el arquetipo mencionado: 1) la capacidad deseada vendrá con el tiempo, lo que se representa con un retraso; 2) la construcción de la capacidad real o efectiva será la misma a la capacidad deseada con el tiempo; 3) con el tiempo, se llegará a la meta.

De esta manera, se planteó el diagrama causal, lo que dio paso al diagrama de flujos y niveles descrito en la siguiente sección. La validación de éste se detallará más adelante.

4.5 Diagrama de Flujos y Niveles

Después de analizar los límites del sistema que se deseaba estudiar, se definieron las variables que se consideraron representativas de dicho sistema. El diagrama causal definió la estructura de realimentación, que es pieza fundamental para la Dinámica de Sistemas. Los vínculos causales definen el comportamiento endógeno del sistema, una vez analizado, es posible definir políticas para modificarlo. El comportamiento del sistema se estudia a través del modelo de Flujos y Niveles. Los niveles caracterizan los estados del sistema y generan la información con la cual se tomará una decisión. Los flujos son las tasas que incrementan o disminuyen los niveles.

Al definir las variables y modelar el diagrama se obtuvo conocimiento del sistema. Este proceso fue iterativo y continuo; el modelo que se presenta a continuación fue el que consideró todas las variables y la estructura adecuadas para estudiar el sistema.

4.5.1 Descripción del modelo de Flujos y Niveles para el problema de largo plazo

Como se comentó en este apartado, el mercado de gas natural en México hasta el 2013, fue un mercado regulado. En el cual, de acuerdo con la definición mencionada, existe una entidad gubernamental que emite reglamentos, normas y directivas basadas en las leyes definidas por el

gobierno, con la finalidad de evitar monopolios económicos, dada la naturaleza del mercado. En este caso, colocar un ducto es muy costoso, por lo que, si se opta por invertir en transporte en alguna zona del país, sólo se habilitará un subsistema de cualquiera de las dos actividades. Las tarifas que se establezcan por el uso de dicho subsistema deberán ser dictaminadas por algún órgano regulador de tal manera que den un rendimiento pero que sean accesibles a todos los usuarios. En la resolución RES/550/2013 se describen los gastos, inversiones y tasas aprobadas por la CRE (Comisión Reguladora de Energía) que conformaron las tarifas sistémicas del Sistema Nacional de Gasoductos (SNG). De acuerdo con la regulación, existe una metodología que establece que cada cinco años se deben recalcular las tarifas, basados en dos aspectos: 1) el transportista necesita obtener una ganancia, que será limitada por la CRE; 2) los usuarios actuales y futuros deben tener acceso al sistema a tarifas razonables. Las tarifas deben cubrir costos de mantenimiento, operación, administración, depreciación y nuevas inversiones. Si el monto de las inversiones y la tasa de rendimiento sobrepasan los ingresos permitidos por la CRE, entonces son disminuidos. Bajo esta idea, establecer tarifas con inversiones que permitan sólo cierto nivel de ingresos, no permiten que el sistema crezca conforme a la necesidad de los usuarios. Ante esto, se propone establecer una porción de la tarifa que sólo sea utilizada para las inversiones en el sistema. Esta tarifa debe estar en función de la estimación de la demanda y el periodo en el que se aplique deberá ser en la vida útil del ducto. En este hecho radica la diferencia. Dentro de la metodología establecida por la CRE existe este concepto, sin embargo, no se ha utilizado así.

En las tablas 4.2 y 4.3 se muestra el objetivo, alcance y variables del modelo:

<i>Objetivo</i>	<ul style="list-style-type: none"> Proponer una política que en el largo plazo prevenga la falta de capacidad en los ductos a fin de evitar el desabasto de gas.
<i>Alcance</i>	<ul style="list-style-type: none"> El sistema de transporte afecta en su totalidad al país. A pesar de haber considerado a sólo una zona para el modelo de corto plazo, debe considerarse que los volúmenes de gas que se inyectan y extraen afectan a todo el sistema. Es por esto que en el largo plazo se considera todo el sistema. Los ductos tienen una duración económica de 30 años, sin embargo, físicamente, los ductos tienen una vida útil de 80 años (Chandra, 2006). También, se sabe que estadísticamente, se realizan proyecciones del crecimiento de la población por 50 años o más, dada la evolución de ésta. Finalmente, en la teoría económica se define el largo plazo como un periodo en el cual, los elementos que generan los costos fijos se modifican. En este caso,

los ductos se modificarían dadas sus condiciones económicas y físicas en un plazo entre 30 y 80 años.

- Por dichas razones en el modelo se planteó un horizonte de tiempo de 100 años.

Tabla 4.2. Definición de objetivo y alcance del diagrama de niveles y flujos. Elaboración propia.

<p><i>Variables</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Población; se conforma de 3 variables. Las dos variables auxiliares, Tasa de Crecimiento y Auxiliar Población fueron tasas de crecimiento y desarrollo de la población respectivamente. La población crecerá cada año, pero el crecimiento será menor cada año, esto dada el comportamiento de la tasa de natalidad. Se estimó que la población cada año tendría más acceso al uso de gas natural, así que la variable Auxiliar Población mostró este crecimiento al acceso de servicios. Al final, la variable PoblaciónGN mostró el consumo de gas natural de la población nacional. • PIB; al igual que la variable anterior, se conformó también de 3 variables. Las dos variables auxiliares, Tasa de Crecimiento 2 y Auxiliar PIB fueron tasas también de crecimiento y desarrollo industrial. El PIB es una cuenta nacional que refleja la producción de un país. Si éste crece se espera que la cuenta PIB refleje dicho aumento. La variable Tasa de Crecimiento contiene tasas de crecimiento que fueron obtenidas mediante una regresión. La variable Auxiliar PIB describió una tasa de acceso al gas. Se consideró que al igual que la población, las empresas podrían acceder cada vez más al combustible. La variable PIBGN mostró el consumo de gas natural de los sectores: industrial, comercial, petrolero y eléctrico. • Demanda esperada; la suma PIB y Población, resultaron en la cantidad total de gas natural anual necesaria por el país. Se consideró medirlo en unidades de volumen, en este caso, millones de pies cúbicos diarios. • Diferencia = Capacidad Esperada – Capacidad Efectiva; se definió como la diferencia entre la capacidad esperada dada la proyección de la demanda, menos la capacidad total real (lo que está ya construido y lo que está por construirse). • Capacidad en Construcción; describió el tiempo que tomará un proyecto en realizarse. El tiempo que toma construir un ducto dependerá de la publicación de su licitación hasta que se establezca qué empresa lo realizará. • Capacidad Total; suma la capacidad ya planeada, la que se está construyendo más la que se utiliza en ese momento. Se descuenta la depreciación anual. Esto ya que la vida útil de un ducto se deprecia cada año.
-------------------------	---

<p><i>Variables del cálculo de la tarifa</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Costo Inversión Ducto; cada ducto nuevo tendrá un costo. Se definió el costo como pesos por millón de pies cúbicos. • Base Neta Activos; establece los costos relacionados a los activos que se usarán al finalizar el ducto. La administración del ducto requerirá el uso de ciertos activos mientras dure su vida útil. La unidad de esta variable se definió como pesos por millón de pies cúbicos. • Rendimiento Inversión; se conformó del costo de capital que se desearía obtener de la inversión. Esta tasa debe ser multiplicada por la base neta de activos y dará el rendimiento de la inversión. • Costos Totales; fueron la suma de los costos por operación, mantenimiento y de administración unitarios, los costos de inversión del ducto y rendimiento de la inversión. Es decir, estos costos involucraron los nuevos ductos más los ductos que estaban por construirse. Definida en miles de pesos. Todos los costos unitarios fueron actualizados cada año por un valor propuesto de inflación. • Tarifa; se definió como la tarifa que cubre los costos de inversión de ductos, el mantenimiento, su operación, los costos de los activos relacionados con éstos y el costo de capital. Se definió en miles de pesos por millón de pies cúbicos diarios. • Cambio -QP; se refiere a la elasticidad precio de la demanda del gas natural. La elasticidad mide la sensibilidad que la demanda sufre ante cambios en el precio. Se dice que un bien es totalmente elástico si ante cambios en el precio la demanda varía. En este sentido, si el bien es totalmente inelástico, la demanda no cambiará a pesar del cambio en el precio. Dado que el gas es un bien necesario es inelástico, se esperaba que afectara negativamente a la demanda. En este caso, Banxico publicó la elasticidad precio de de la demanda de gas natural, fijó el valor en 0.1. • Tarifa de Referencia; esta tarifa se obtuvo de la resolución RES/550/2013 como referencia, es decir, si la tarifa resultante de la simulación era mayor a la tarifa de referencia, se desincentivaría la demanda de gas. Cada año se actualizó la tarifa con un valor propuesto de la inflación. Si era menor, entonces no habría efecto sobre la demanda.
--	--

Tabla 4.3. Definición de las variables del diagrama de niveles y flujos. Elaboración propia.

4.5.2 Valores del modelo de Flujos y Niveles para el problema de largo plazo

Una vez descritas las variables del modelo, se mostrarán los valores de los parámetros que se utilizaron para la simulación. En las tablas 4.4 y 4.5 se listan los parámetros:

Parámetro	Valor	Fuente
Tiempo de Planeación	0.4192 años	Prospectiva de gas natural y gas LP 2013 – 2027
Tiempo de Construcción	1.96 años	Prospectiva de gas natural y gas LP 2013 – 2027
Tiempo Útil	100 años	Prospectiva de gas natural y gas LP 2013 – 2027
Costo Inversión gasoducto	\$0.00002 mdp/mmpcd	RES/550/2013
Costo Construcción gasoducto	\$0.000032 mdp/mmpcd	RES/550/2013
Costo de Capital	10.14%	RES/550/2013
Costo Unitario OMA	\$0.000304 mdp/mmpcd	RES/550/2013
Cambio Q/P	-0.1	Prospectiva de gas natural y gas LP 2012 – 2026
Tarifa de Referencia	\$0.000549 mdp/mmpcd	RES/550/2013
Tasa de Inflación	3%	INEGI

Tabla 4.4. Definición de los valores de los parámetros utilizados en la simulación del diagrama de niveles y flujos. Elaboración propia.

Para obtener las tasas de cambio, se obtuvo la regresión y a partir de los datos estimados, calcularon las tasas. Se validó cada función de regresión. La tabla 4.5 muestra los resultados:

Variable	F. Regresión	Validación
Crecimiento de la población	$Población = \sqrt{(-4.159E18 + 5.486E17 * \ln(año))}$	$R^2 = 99.96\%$ $Valor - p = 0.0$
Acceso de la población al gn	$Consumo gn = 4909.12 - 9.637E6/año$	$R^2 = 93.03\%$ $Valor - p = 0.0$
Crecimiento del PIB	$PIB = \sqrt{(14.7901 + 0.8421 * \ln(año))}$	$R^2 = 94.88\%$ $Valor - p = 0.0$
Acceso de la industria al gn	$Consumo gn = 0.1595 * año^3 - 7.8469 * año^2 + 150.63 + año + 470.85$	$R^2 = 97.92\%$ $Valor - p = 0.0$

Tabla 4.5. Definición de las funciones de regresión utilizadas en la simulación del diagrama de niveles y flujos. Elaboración propia.

4.5.3 Modelo de Flujos y Niveles para el problema de largo plazo

Dados todos los elementos anteriores, en la figura 4.7 se presenta el modelo de Flujos y Niveles programado en *Powersim*, un *software* que es ampliamente utilizado en la Simulación de Dinámica de Sistemas:

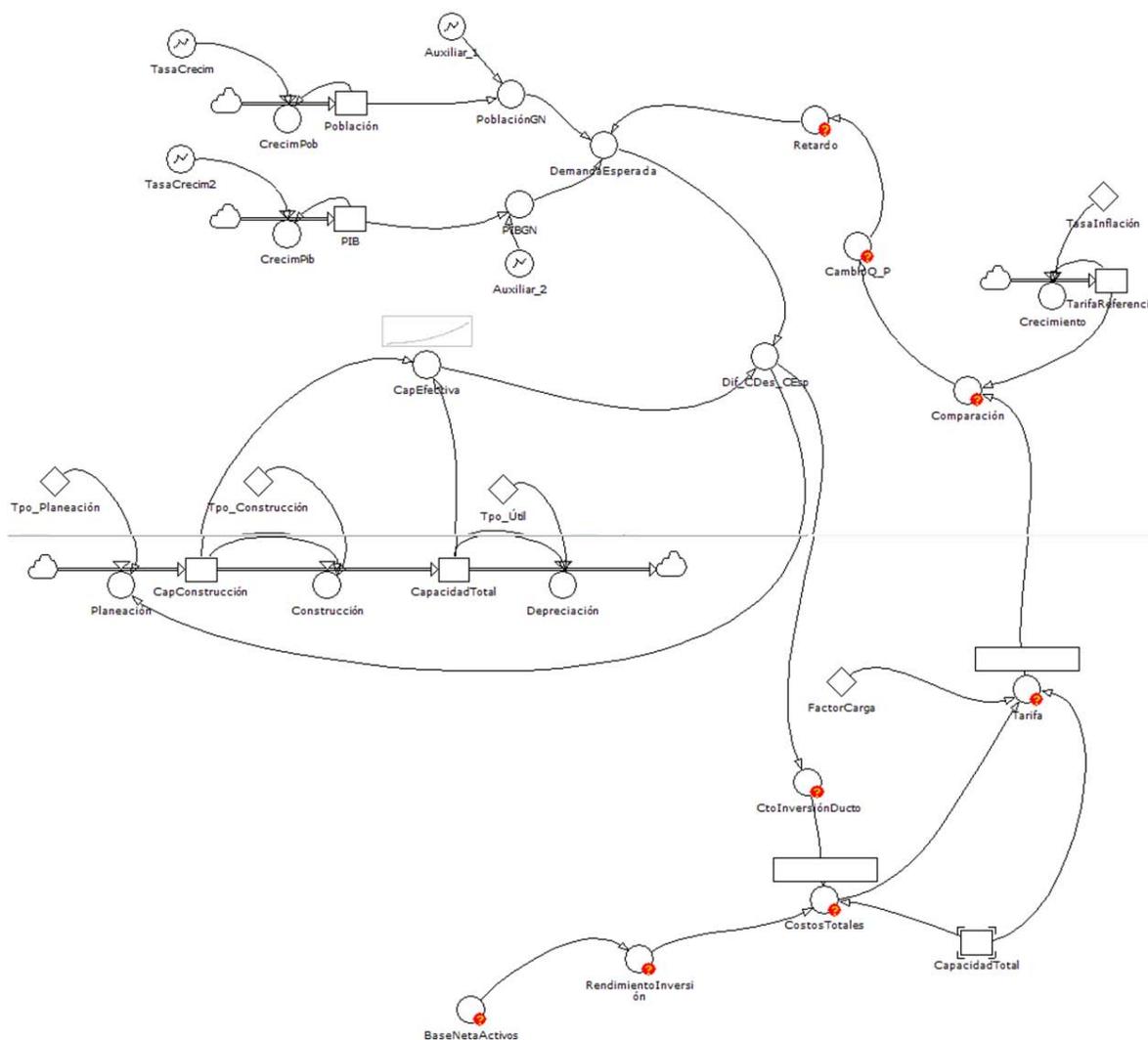


Figura 4.7. Diagrama de niveles y flujos, modelo de simulación. Elaboración propia.

El modelo de simulación se ejecutó para un lapso de 100 años. A partir de la hipótesis dinámica (descrita en la sección 4.2) se eligieron las variables, se plantearon los diagramas y finalmente se corrió la simulación. El modelo que se mostró en la figura 4.7 fue el final. Para llegar a él se tuvo que verificar

y validar la estructura de tal manera que el comportamiento de la simulación se asemejara al comportamiento del sistema real. En el siguiente apartado se muestra la verificación y validación.

4.6 Verificación y validación del modelo

Antes de utilizar los resultados de una simulación, es necesario saber si el modelo es una representación adecuada del sistema real estudiado. El modelo será aceptado si es válido, es decir, si es creíble. Los resultados deben ser muy parecidos a la realidad y de eso, depende su credibilidad. En simulación, de acuerdo con Law y Kelton (1991), el modelo debe ser validado desde su concepción y contrastado con el análisis de resultados, que determinará si el modelo de simulación mide el desempeño del sistema estudiado. En la figura 4.8 se muestra cómo debería ser validado y verificado:



Figura 4.8. Diagrama del proceso de validación y verificación. Fuente: (Law & Kelton, 1991)

De acuerdo con Barlas (1996), la verificación del modelo se define a menudo como "asegurar que el programa de ordenador del modelo computarizado y su aplicación son correctas". Para verificar el modelo, se optó por dividir en secciones el modelo y simular parte por parte. A partir de esto, se probaron las diversas regresiones hasta obtener una que se adecuara a los datos y el comportamiento de éstos. Esto se realizó para las regresiones del PIB y de la población. En el caso de la sección del modelo referente al desarrollo de la capacidad, se procuró que los tiempos de planeación y construcción fueran la mediana de los tiempos de diversos proyectos. Se consideró la mediana ya que los datos eran muy distintos entre sí.

4.6.1 Validación de los datos del modelo de Flujos y Niveles

En las figuras 4.5 y 4.6 se muestran las secciones del modelo que se realizaron y probaron antes de ejecutar el modelo completo. Se simularon los crecimientos del PIB y de la población, los resultados se graficaron y se muestran en sus respectivas figuras:

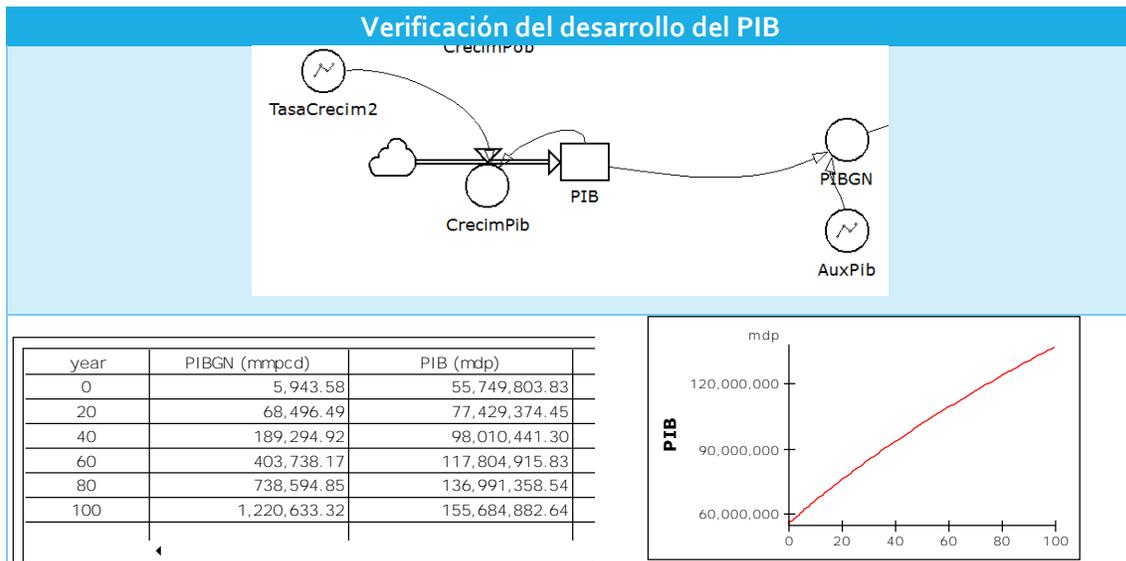


Figura 4.5. Verificación del desarrollo del PIB y el consumo de gas natural. Elaboración propia.

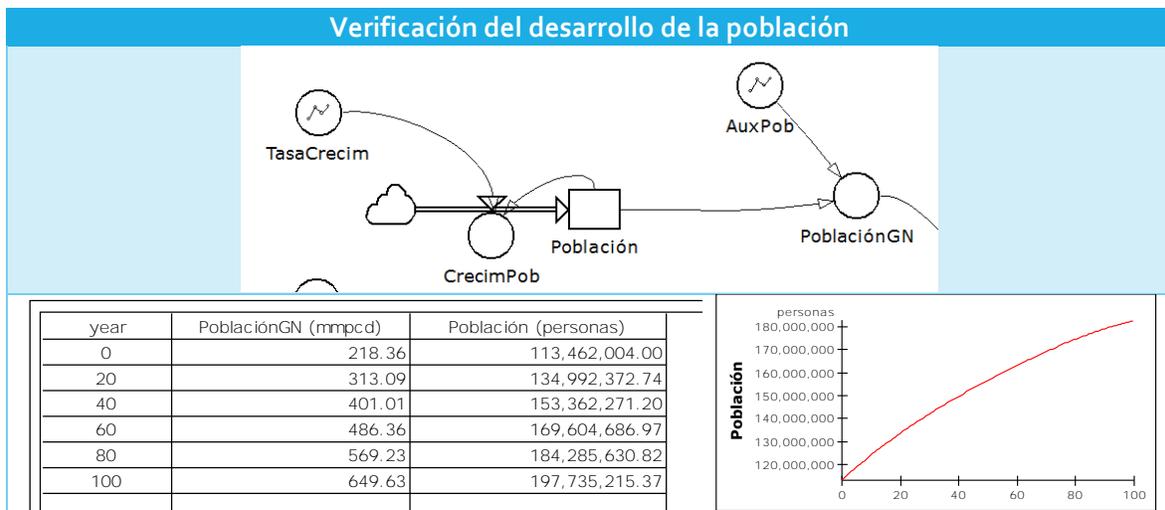


Figura 4.6. Verificación del crecimiento de la población y su consumo de gas natural. Elaboración propia.

En el caso del desarrollo de la capacidad, se procuró tener un comportamiento lógico, es decir se esperaba que mientras más gas fuera demandado por el país, mayor fuera el desarrollo de la capacidad. El modo de realizar la verificación fue sabiendo que existían plazos que debían cumplirse y que el tiempo en que se realizaba la construcción de los ductos era mayor al periodo en el que se

planificaban. Asimismo, verificar que no hubiera resultados negativos o números fuera del rango especificado. En la tabla 4.7 se muestran los resultados:

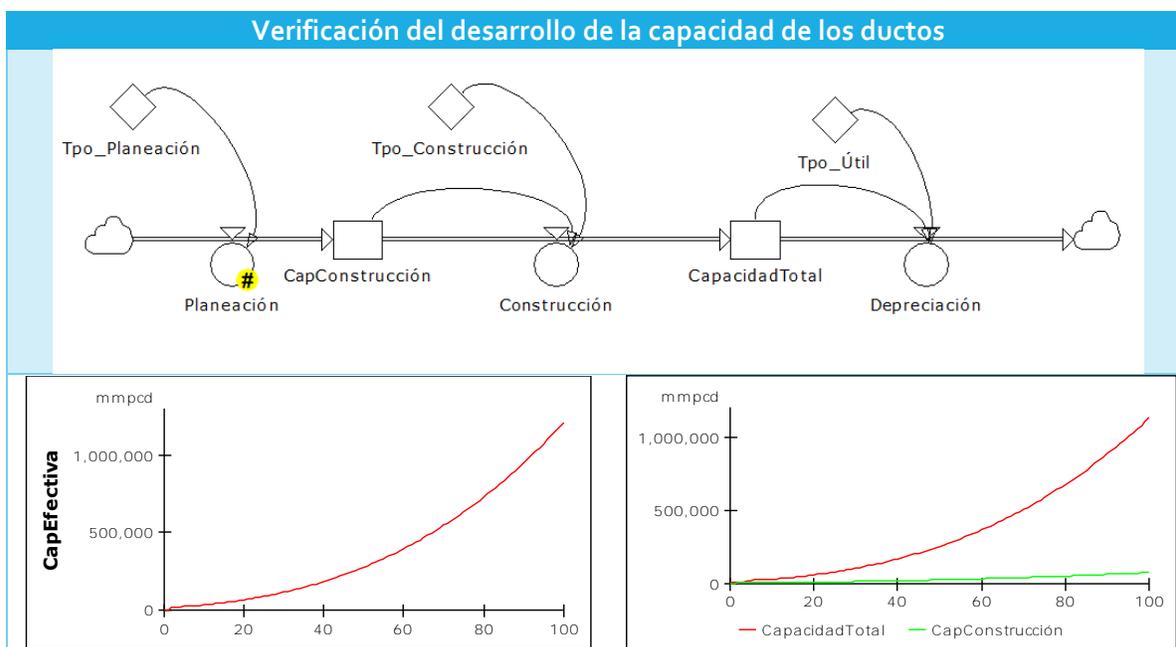


Figura 4.7. Verificación del desarrollo de los ductos, desde su planeación hasta su depreciación. Elaboración propia.

Una vez verificados cada uno de los pequeños modelos, se decidió unirlos todos para formar el modelo final y posteriormente validarlo.

4.6.2 Validación del modelo de Flujos y Niveles para el problema de largo plazo

La validación del modelo se define generalmente en el sentido: "comprobación que un modelo computarizado dentro de su ámbito de aplicabilidad, posee un rango satisfactorio de precisión coherente con la aplicación prevista del modelo" (Sterman, 2000). Por lo tanto, la validación de un modelo dependerá del propósito para el cual fue diseñado. Es por esto que, al juzgar la validez de un modelo en última instancia implica juzgar la validez de su propósito también, que es esencialmente un proceso no técnico, informal, cualitativo (Barlas, 1996).

Para los modelos de Dinámica de Sistemas se ha planteado una validación que involucra no sólo el modelo simulado en la computadora, sino también el modelo conceptual. Así, retomando la definición de Law y Kelton (1991), la validación de modelos tiene lugar en todas las fases de modelado. Para cada una de las etapas, existen diferentes pruebas antes de la etapa de diseño de políticas. De esta forma, se construye una certeza y confianza en el uso de un modelo a fin de tomar los resultados para contribuir en el diseño de políticas.

En un modelo conceptual, se considera que la teoría del sistema funge como su creadora, sin embargo, también ayuda a validarlo. Se debe recordar que para la creación de modelos de Dinámica de Sistemas se utilizan tres fuentes de información: datos numéricos, manuales, trabajos publicados, normativas y el conocimiento experto de los participantes del sistema. Dichas fuentes identifican inconsistencias sobre cómo se concibe la estructuración del sistema y su comportamiento a lo largo del tiempo. A este tipo de modelos también se les conoce como "modelos de caja blanca", en los que la teoría del sistema ayuda a reproducir y predecir su comportamiento, así como sugerir cómo podría modificarse el comportamiento existente.

Los modelos de simulación también son llamados "modelos de caja negra", puesto que la causalidad resulta en el comportamiento agregado del modelo. Su validez depende de si los resultados del modelo coinciden con los resultados del sistema real, dentro de un rango de especificación. La diferencia fundamental con los modelos de caja blanca, es que no se cuestiona la validez de las relaciones individuales de los elementos del modelo, sino que se estudia en su conjunto. Para este tipo de modelos, las pruebas estadísticas son las más adecuadas.

Los modelos deben ser analizados mediante técnicas que involucren la relación de esa simplificada concepción del sistema y la totalidad de éste. Así, la validación debe ser en dos aspectos, de manera agregada (modelo de caja negra) y a nivel conceptual y relacional (modelo de caja blanca). Para sustentar esta idea, se retoman las ideas de Barlas (1996). La validez de un modelo radica en:

- 1) La validez de un modelo de Dinámica de Sistemas significa principalmente la validez de su estructura interna.
- 2) La filosofía relativista / holística sostiene que la validación de la estructura interna no se puede hacer enteramente objetiva, formal y cuantitativa, en el sentido que incluso la confirmación de la teoría científica tiene aspectos informales y subjetivos.

Consecuentemente, el orden lógico general de la validación es, primero para probar la validez de la estructura y, a continuación, empezar a probar la exactitud comportamiento, sólo después de que la estructura del modelo se percibe adecuada.

Las pruebas de estructura se dividen en dos:

1. Pruebas de estructura directa y;
2. Pruebas del comportamiento orientado a la estructura.

La validación de la simulación se realiza con:

3. Pruebas de comportamiento.

1) Pruebas de estructura directa

Estas pruebas evalúan la validez de la estructura del modelo mediante una comparación con el conocimiento real del sistema. Cada relación del modelo se evalúa individualmente y se compara con la información disponible del sistema. Se dividen en:

- I. Pruebas de *estructura directa teórica*, comparan la estructura del modelo con el conocimiento generalizado que existe en la literatura del sistema.
- II. Pruebas de *estructura directa empírica*, comprueban el modelo con la información obtenida directamente del sistema real a ser modelado. Esta última prueba compara las ecuaciones del modelo, flujo de datos, gráficas de la información (ya sea con la realidad o con la literatura), etc.

2) Pruebas de comportamiento orientado a la estructura

Estas pruebas evalúan validez del modelo de manera indirecta. Estas pruebas involucran simulación y pueden ser aplicadas al modelo. El modelo pasa esta prueba si puede generar un comportamiento similar al real si el modelo es simulado. Existen varias aplicaciones: pruebas de condiciones extremas, pruebas de sensibilidad de algunos parámetros, relación de las variables (su interacción) y pruebas de Turing. La ventaja de estas pruebas es que pueden ser cuantificadas y en consecuencia pueden ser formalizadas.

3) Pruebas del Comportamiento

Como resultado de las pruebas anteriores, uno puede tener la certeza que la estructura del modelo puede representar los comportamientos del sistema estudiado. Para estas pruebas, pueden ser utilizadas las pruebas de estadística.

Todas las pruebas, deben ser aplicadas de manera repetitiva y pueden no seguir la secuencia mostrada. El autor sustenta esto con la siguiente figura:

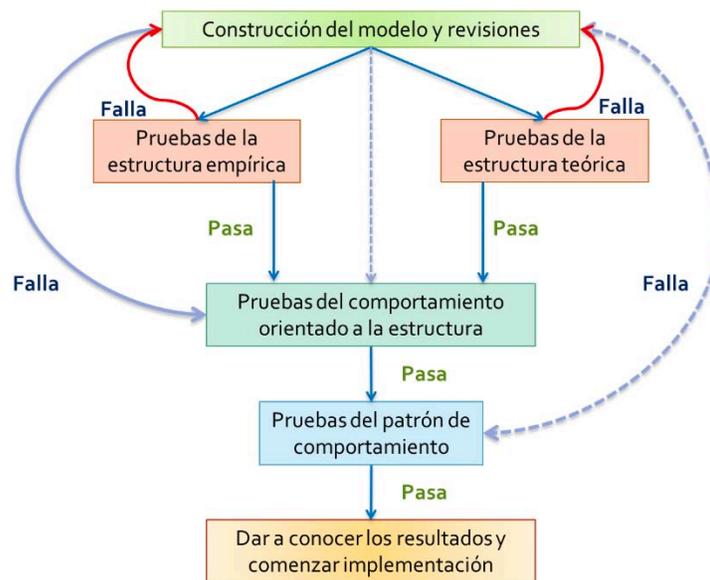


Figura 4.2. Proceso de validación de un modelo de dinámica de sistemas. Fuente: (Barlas, 1996)

De acuerdo con (Barlas, 1996) se puede utilizar la siguiente metodología mostrada en la figura 4.9 para validar un modelo de Dinámica de Sistemas:

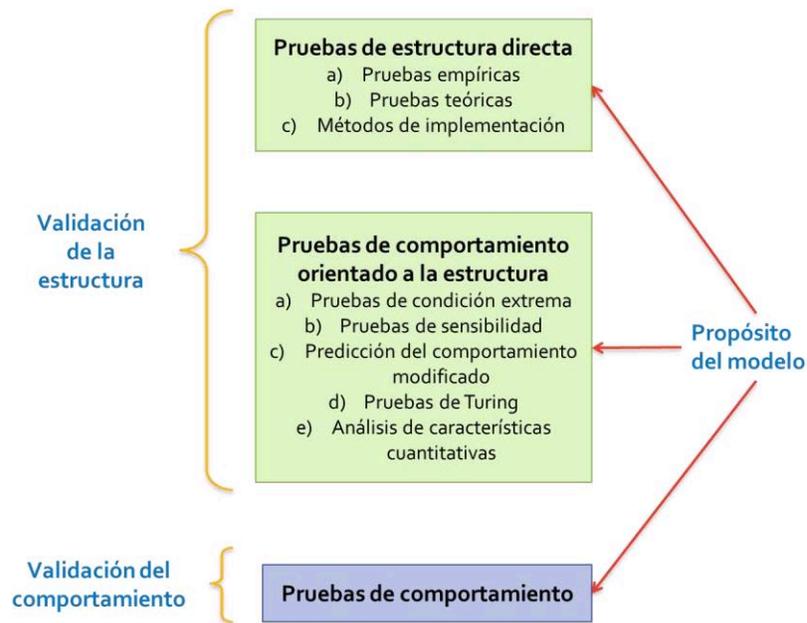


Figura 4.9. Validación de un modelo de dinámica de sistemas. Fuente: (Barlas, 1996)

Para esta investigación, se realizaron las pruebas de validación de estructura con la literatura revisada, desde artículos hasta documentación oficial del gobierno. Para la realización del diseño del modelo conceptual, se estudió primero la estructura del sector energético, en específico la cadena de valor de la industria del gas natural. Después, se estudió la problemática.

1) Pruebas de estructura directa

1.1) **Prueba teórica;** para esta prueba, se revisaron diversos artículos que trataban el tema de estudio del mercado de gas natural y la Dinámica de Sistemas. La tabla siguiente muestra los documentos que se utilizaron:

No.	Título	Descripción	Autor
1	Prospectiva de gas natural y gas LP 2013 - 2027	Documento emitido anualmente. Describe el mercado de gas natural: marco regulatorio, análisis de los mercados nacional e internacional, producción, planes de infraestructura y planes, estado actual.	Secretaría de Energía
2	Página Web de INEGI	En esta página se encontraron los datos referentes al valor de la producción, PIB, tasas de inflación.	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
3	Resolución RES/550/2013	Detalla la conformación y aprobación de las tarifas sistémicas. Éstas, detallan los costos que fueron aceptados por la CRE para cubrir los egresos por el uso del Sistema Nacional de Gasoductos.	Comisión Reguladora de Energía
4	Reglamento de Gas Natural	En este documento se establece el marco regulatorio del mercado de gas natural. En éste, se pueden observar los actores de la cadena de valor y las actividades que pueden realizar	Comisión Reguladora de Energía
5	Página Web de Pemex Gas Petroquímica Básica	Esta sección de Pemex se encarga de la venta de gas natural y gas LP, por lo que contiene información sobre el transporte, la distribución y las ventas de este combustible.	Pemex
6	Página Web de la Comisión Reguladora de Energía	La página de la comisión básicamente contiene los documentos de regulación y normas, así como estadísticas y niveles de precios. Contiene información del Gas LP y Electricidad.	Comisión Reguladora de Energía
7	Consejo Nacional de la Población (CONAPO)	En esta página se encuentra la información referente a la población del país. Se presentan proyecciones y pronósticos de natalidad, mortandad, etc.	CONAPO

Tabla 4.5. Validación de la prueba teórica. Elaboración propia.

En casi todas las fuentes, se mostraba un diagrama del mercado de gas natural y en algunos casos se describía brevemente cómo funciona el mercado. La problemática de esta investigación fue descrita en la Estrategia Nacional de Energía y en la Prospectiva de Gas Natural. En la Prospectiva y las páginas electrónicas de las instituciones gubernamentales se definió la situación del mercado: qué industrias consumen gas, qué Estados utilizan el combustible, cómo se espera que cambie el mercado se encuentran en la Prospectiva y en las páginas electrónicas de las instituciones gubernamentales.

Así que después de leer la información contenida en estos documentos se pudo conocer ampliamente:

- El sistema (el mercado de gas natural) y;
- La problemática (el desabastecimiento del combustible debido a fallas en la infraestructura)

1.2) **Prueba empírica**; para obtener los datos del sistema real se utilizaron las bases de datos sobre el mercado de gas natural. Como se muestra en la tabla 4.5, se usaron los datos del Sistema de Información Energética (SIE), del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y del Consejo Nacional de la Población (CONAPO). Considerando las proyecciones publicadas por estas fuentes, se desarrollaron las regresiones de la población y el PIB. Las funciones se validaron con los datos proyectados. Se propusieron distintas funciones de regresión, finalmente, se eligió la que resultó en una desviación mínima con respecto a los datos.

Se usó la información descrita en la resolución RES/550/2013 para validar las operaciones contables como la depreciación y la actualización de costos (usando la inflación).

En cuanto al modelo planteado, se estudiaron los modelos presentados en diversos artículos que fueron mencionados en el Estado del Arte. La problemática planteada ha sido estudiada en otros países, por lo que se comparó el modelo de esta investigación con los de los artículos. Dado que el sector energético se diferencia en cada país, de acuerdo con las características de la cadena de valor, es notable observar que no es posible emular las mismas ecuaciones o relaciones entre variables. Así, se crearon analogías y se observaron qué variables u objetivos podían aplicarse a la problemática propia de esta investigación.

En la tabla 4.7 se mencionan los artículos utilizados en la validación del modelo:

Título (Año)	Descripción	Autores
1 Dynamics of the UK natural gas industry: System dynamics modelling and long-term energy policy analysis (2009)	Se deseaban crear políticas de producción, importación y exploración en el Reino Unido. Para lograrlo, debían saber los costos de esto, el cambio en la tecnología y el comportamiento de la demanda.	Kong Chyong Chi, William J. Nuttall, David M. Reiner
2 The simulated system dynamics analysis of the natural gas supply and demand (2010)	Se modela el suministro y demanda de gas natural en China para anticiparse a los cambios en el mercado y saber si deben producir o importar.	Sun Jingchun, Ly Ding, Wu Fan
3 On simulation and optimization of one natural gas industry under the rough environment (2010)	En este artículo se deseaba saber la cantidad de gas natural que se podría utilizar en la producción de productos derivados del gas. Por lo que se creó un modelo de programación entera mixta para fijar costos y posibles estrategias de compra del combustible.	Jiuping Xu, Rentao Dong, Desheng Dash Wu
4 Forecasting the growth of China's natural gas consumption (2011)	En años recientes, la industria del gas natural ha tomado fuerza en China. Para saber si sufrirán de desabastecimiento en 20 años, establecen un modelo de pronósticos de gas de los principales usuarios para saber cómo será el comportamiento del mercado vs las reservas de gas.	Junchen Li, Xiucheng Dong, Jianxin Shangguan, Michael Hook
5 A system dynamics analysis of energy consumption and corrective policies in Iranian iron and steel industry (2012)	Bajo diferentes escenarios de producción de acero, se desea conocer la cantidad mínima de gas natural que debe ser consumida. El objetivo es buscar la eficiencia en el consumo de gas.	Nastaran Ansari, Abbas Seifi
6 Utilizing system dynamics modeling to examine impact of Deregulation on generation capacity (2005)	Se creó un modelo para conocer el impacto de la disponibilidad de capacidad. Dado que habría competencia en el mercado, se debían analizar los costos e ingresos deseados, sujetos a la necesidad de capacidad en Estados Unidos.	Kadoya, Sasaki, Ihara, y Larose
7 Lessons from the regulated power industry in the 1970s (2011)	La demanda creciente de electricidad solicitó mayor capacidad, el mercado dejaba de ser regulado para ser de libre competencia. Se necesitaban cubrir las	Ford, Andrew

necesidades financieras sin dejar de abastecer la demanda.		
8	A distribution planning model for natural gas supply chain: a case study (2009)	Se desean minimizar costos de distribución de la cadena de suministro de gas natural. Esto sujeto a la satisfacción de la demanda, continuidad del flujo y balance de flujos de la cadena.
		Maryam Hamedi, Reza Zanjirani Farahani, Mohammad Moattar Husseini
9	System Dynamics evaluation of renewable energy policies (2011)	Se optó por realizar un estudio costo beneficio para revisar la eficacia de políticas de energía renovable. Era necesario conocer por región, la población, las actividades que desarrollaban, la emisión de contaminantes y el uso de la energía.
		Trappey Ch., Trappey, A., Lin, Chang

Tabla 4.7. Validación de la prueba empírica. Elaboración propia.

1.3) **Prueba del comportamiento;** la Dinámica de Sistemas se utiliza para:

1. Modelar o analizar un sistema real con la finalidad de mejorar algunos de los patrones del comportamiento.
2. Se modela una teoría existente con el propósito de evaluarla o probarla.

El primer enfoque de modelado es una aplicación típica, mientras que el segundo es una investigación teórica. La segunda diferencia principal es que, en un modelo de aplicación, el objetivo final es diseñar políticas que mejoren el comportamiento del sistema. Por lo tanto, los experimentos de análisis de políticas, la derivación de la mejora de las políticas y las cuestiones de aplicación son cruciales en este tipo de estudios. (Ghaffarzadegan, Lyneis, & Richardson, 2010).

Para la validación del comportamiento se consideró el crecimiento de la población, el desarrollo del PIB y el aumento de capacidad de los ductos para el periodo 1995 – 2012. Se tomaron estos años ya que a partir de 1995 en México hubo más participación de privados en el mercado de gas natural y en el 2012 comenzaron los problemas debido a la falta de gas. En la figura 4.3 se muestra la parte del modelo que se ocupó para validarlo en su totalidad.

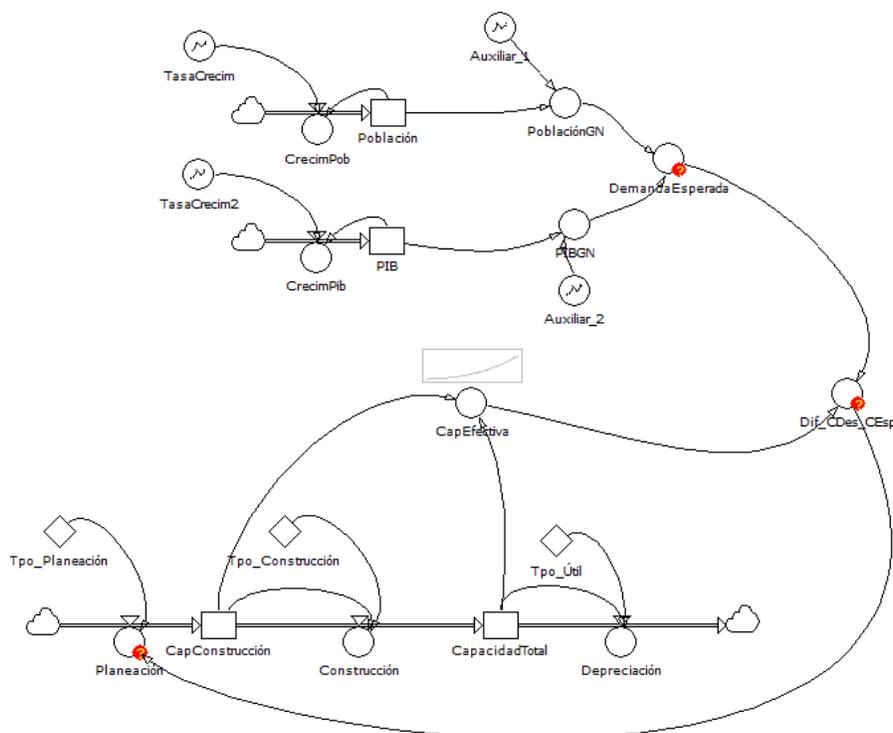


Figura 4.3. Modelo utilizado para la validación del comportamiento del modelo de dinámica de sistemas. Elaboración propia.

De acuerdo con la Prospectiva de gas natural publicada por la SENER, los ductos crecieron en promedio 1.1% y la demanda 6% durante el periodo señalado.

La simulación del modelo de validación dio resultados distintos que la realidad, pues el modelo mostró que la capacidad debía comenzar a desarrollarse si no se generarían problemas en el suministro de la demanda. Esto indicó que, a pesar de obtener un resultado distinto respecto a la realidad, la falta de crecimiento de capacidad afectaba el suministro a los diversos usuarios del gas. Este comportamiento fue el esperado por el modelo. Por lo tanto, se concluyó que el modelo estaba validado, ya que se comportó como el sistema real.

Una vez obtenido el modelo verificado y validado fue posible tener confianza en los resultados y crear una política tarifaria. Esto se describe en el siguiente apartado.

4.7 Resultados del modelo para el problema de largo plazo

Antes de presentar los resultados, es conveniente definir lo que significa una política pública. De acuerdo con Andersen, Rich, y MacDonald (2009), una política pública significa: Cualquier y todas las acciones o no acciones, decisiones o no decisiones tomadas por el gobierno, a todos los niveles, para hacer frente a los problemas. Estas acciones, no acciones, decisiones o no decisiones se implementan a través de leyes, reglamentos y la asignación de recursos.

Existen cinco características de los problemas de políticas públicas que hacen difícil su resolución utilizando los enfoques tradicionales. Estas características son: 1) la resistencia a la política, 2) la necesidad y el costo de la experimentación, 3) la necesidad de lograr un consenso entre las diversas partes interesadas, 4) el exceso de confianza, y 5) la necesidad de tener una perspectiva endógena. Para todas estas dificultades, la Dinámica de Sistemas mejora la aceptación, experimentación y ahorro de costos debido a la simulación. Por otro lado, el poder validar cualquier modelo de Dinámica de Sistemas permite eliminar el exceso de confianza que se tiene sobre algún sistema que se cree se conoce (Teufel, Miller, Massimo, & Wolf, 2013).

En este caso, el modelo fue validado por lo que se analizaron sus resultados. Se buscó obtener una tarifa que reflejara los costos de inversión en los gasoductos. Se consideró que debía ser adicional a la tarifa de transporte que ya se calcula. En este modelo, se consideraron los costos de la inversión más los costos de mantenimiento de los ductos. Es decir, no sólo se reflejó el costo de los ductos ya existentes, sino también de lo que está por añadirse al sistema. Se asumió que la inflación crecía 5% anual así, la única actualización de los costos unitarios fue dada por este índice.

Se determinó que la tarifa, no podía crecer indefinidamente sin afectar a los usuarios finales. Se consideró que a pesar de saber que el combustible es un bien necesario, el aumento indebido de su costo podría afectar su consumo. Se optó por fijar una tarifa de referencia (basada en la resolución RES/550/2013) que sirviera como cota máxima de la tarifa propuesta. Si sobrepasaba la tarifa de referencia entonces disminuiría la demanda de gas en proporción a la elasticidad.

Por otro lado, el retraso tuvo la intención de reflejar el efecto del aumento indebido de la tarifa después de un lapso de tiempo. Si la tarifa crecía moderadamente, entonces los usuarios no

modificaban su demanda. La simulación se ejecutó en un plazo de 100 años para ilustrar el comportamiento en el largo plazo, del desarrollo de los gasoductos. La tarifa obtenida en el modelo de simulación se muestra en la figura 4.4:

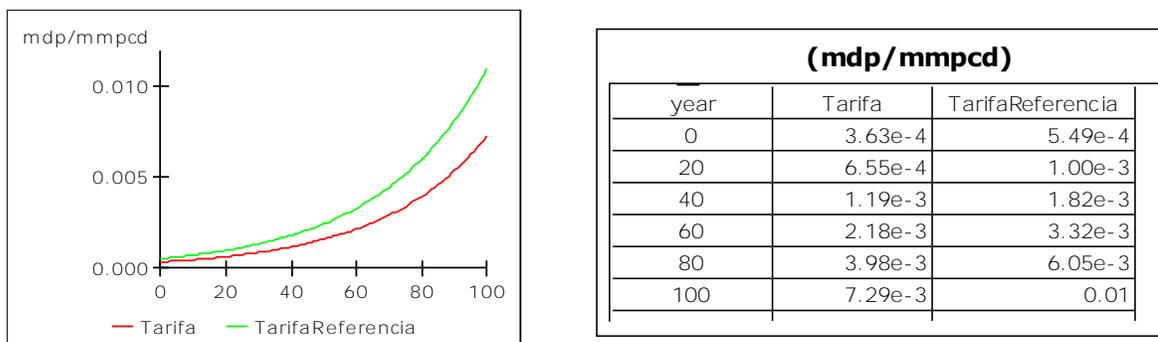


Figura 4.4 Tarifa de transporte exclusiva para la inversión en gasoductos.
Elaboración propia.

Se observa que durante los 100 años en que se ejecutó el modelo, la tarifa creció; este aumento también se reflejó en la capacidad de transporte, que se muestra en la figura 4.5:

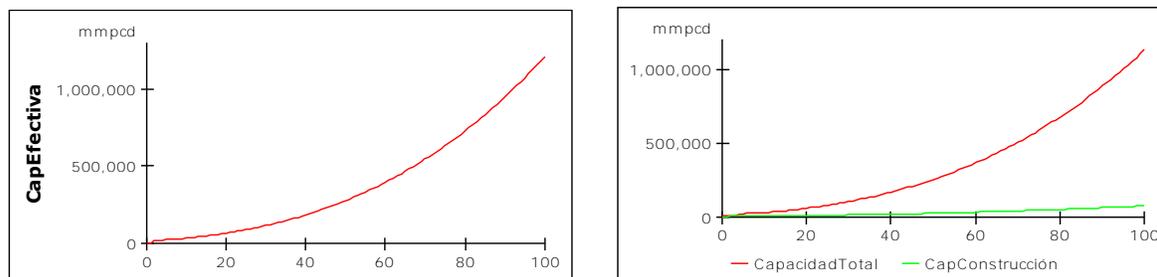


Figura 4.5 Desarrollo de la capacidad de transporte durante los 100 años de la simulación. Elaboración propia.

Los resultados indicaron que la tarifa crecía cada 20 años, lo que indicó que los costos crecieron en la misma proporción, en función de la capacidad efectiva (la capacidad ya construida más la que estaba en construcción). En cambio, la capacidad creció fuertemente durante los primeros 20 años, a partir de ese tiempo, la tasa de desarrollo fue disminuyendo. En la tabla 4.8 se describen la tarifa y la capacidad, así como sus respectivas tasas de crecimiento:

Años	Tarifa (\$/mmpcd)	Crecimiento Tarifa	Capacidad (mmpcd)	Crecimiento Capacidad
0	0.363		5,055	
20	0.655	80.4%	67,084.0395	1227.1%
40	1.194	82.3%	185,696.35	176.8%
60	2.179	82.5%	397,194.914	113.9%
80	3.981	82.7%	728,065.396	83.3%
100	7.292	83.2%	120,4973.12	65.5%

Tabla 4.8 Comparativo del crecimiento de la tarifa vs el crecimiento de la capacidad del transporte en los 20 años. Elaboración propia.

El modelo mostró que la tarifa debía respetar el concepto de economías de escala y no debía crecer indefinidamente. Esto es importante, ya que en un mercado regulado se deben administrar los bienes de tal manera que la gran mayoría de los usuarios tenga la capacidad económica para adquirirlos. Por otro lado, se observa que el modelo reflejó la gran necesidad de aumentar la capacidad. Esto ya que los primeros 20 años, la red de gasoductos crece a una gran tasa en comparación con los años siguientes. Los resultados implican que al principio se requerirá de una gran inversión para poder cumplir con la demanda esperada, sin embargo, en años posteriores será menor la necesidad de nuevos ductos. Podría pensarse que, en los siguientes años, la tarifa involucraría en su mayoría los costos por mantenimiento, administración, operación y depreciación. Esta suposición surge ya que el tiempo de duración de un ducto es de 80 años.

De esta manera, se propuso una tarifa con la intención de hacer crecer la capacidad en función de su necesidad. Dado que al inicio fue necesaria una capacidad que evitara las alertas críticas (suspensiones al suministro), la tasa de desarrollo de los ductos resultó alta, mas no por eso la tarifa creció en la misma medida. Hacia el final de la simulación, el transporte se siguió desarrollando, pero a una tasa mucho menor, esto ocurrió ya que el mercado había madurado y sólo fue requiriendo capacidad conforme se depreciaban los ductos ya existentes. Por lo que se regularizó el nivel de capacidad con el de necesidad de los usuarios. Así, se pudo concluir que la aplicación de esta tarifa sería efectiva en el desarrollo del sistema de transporte de gas natural.

Debido a fluctuaciones de precios, aumento de costos, cambios en la demanda de los diversos usuarios, limitaciones de los recursos, desarrollo de la tecnología y de nuevas energías, el sector energético tiene la propiedad de ser un sistema complejo y puede ser estudiado mediante la Dinámica de Sistemas.

Es importante mencionar que el modelo de simulación fue una versión simplificada de la realidad. De acuerdo con Ghaffarzadegan, Lyneis y Richardson (2010), los modelos pequeños de Dinámica de Sistemas son únicos en su capacidad de capturar ideas importantes y a menudo contra-intuitivas, relativas al comportamiento de la estructura de realimentación del sistema; sin sacrificar la capacidad de los creadores de políticas para entender con facilidad y comunicar esas ideas.

Se consideran modelos pequeños aquellos que tienen menos de siete bucles, pero también permiten modelar sólo aquella parte del sistema que se desea conocer. A partir de la representación de la interacción de sus elementos, puede surgir conocimiento sobre su desempeño y finalmente formular políticas. Así, se concluye que el modelo cumplió el propósito para el cual fue diseñado, además, dio resultados que dejaron una enseñanza: dio el valor de una tarifa que aún a pesar de la falta de infraestructura, señaló que los costos iniciales serían menores. Esto difiere ligeramente con lo que se sabe: el costo inicial de cualquier proyecto de inversión genera pérdidas. En este caso no se ve así, pues el incremento de esa tarifa es menor a la tarifa de referencia, lo que indica que no sobrepasaría los costos esperados. De esta manera, se puede asegurar que añadir dicho incremento a la tarifa de transporte no afectaría la demanda de gas natural y proveería de un monto de inversión en gasoductos.

Conclusiones

Durante esta investigación, se describió una problemática, la falta de capacidad en el transporte de gas natural. A partir de ésta, se plantearon dos problemas a solucionar, en el corto y largo plazos. Se utilizó la simulación para solucionar a ambos.

El motivo de esta tesis fue proponer elementos que contribuyeran al diseño de políticas, ya que durante el tiempo en que se presentó la problemática no se dio solución. Cada vez que ocurría una falla en el sistema de transporte, se decidía arbitrariamente qué usuarios dejaban de consumir gas. Durante los años 2012 y 2013, las suspensiones en el suministro de gas fueron críticas, resultando en pérdidas económicas. La propuesta de esta investigación no sólo fue solucionar este problema en el corto plazo, sino que también se presentó una alternativa que solucionara el problema raíz.

Para el problema de corto plazo, se propuso una solución basada en una simulación de eventos discretos. Los resultados de ésta, se utilizaron como parámetros de cuatro criterios (costos, ingresos, volumen de gas y energía) con los cuales se asignó una oferta limitada de gas a los usuarios industriales. En cuanto al problema de largo plazo, se propuso el diseño de una tarifa de transporte que añadiera la inversión en gasoductos, basada en una simulación de Dinámica de Sistemas. Debido a que el desarrollo de la red de gasoductos toma tiempo, fue necesario plantear medidas correctivas que subsanaran las pérdidas económicas generadas por la falta de infraestructura.

La simulación, ofrece la posibilidad de estudiar el comportamiento y las consecuencias de las múltiples interacciones de los elementos de un sistema a través del tiempo. La simulación es una herramienta que permite comprender el comportamiento del sistema y poder predecir qué sucedería ante cambios en sus elementos. La simulación permitió abstraer los elementos que se consideraron relevantes para plantear modelos que se analizaron bajo distintos escenarios. De esta manera, se pudieron experimentar distintos criterios que en el sistema real no se hubieran podido analizar. De manera concisa pudieron estudiarse distintos aspectos que lograron proponer diversas políticas.

La simulación de eventos discretos tiene como finalidad estudiar sistemas complejos donde exista incertidumbre ante un suceso que se repita iterativamente. En este caso, existió cierta estocasticidad en los datos, por lo que hubo que ajustarlos a funciones de distribución. De esta manera, se reprodujo

de manera simplificada el sistema, logrando su comprensión y posibles predicciones de éste. Los cuatro modelos de programación lineal y entera utilizados, ayudaron a encontrar la mejor asignación del gas ante reducciones de su volumen. Este tipo de modelos ayudan a tomar decisiones cuando existen muchos elementos que interaccionan entre ellos y se deben asignar bienes limitados. Su uso fue conveniente pues había muchos usuarios que debían asignarse un recurso limitado.

Otro tipo de simulación que se utilizó fue la Dinámica de Sistemas, es un enfoque de la comprensión del problema y su solución. Captura la complejidad de los problemas del mundo real a través de la explicación de la realimentación entre las variables endógenas. Esta realimentación, y los retrasos que la acompañan, a menudo conducen programas del sector público hacia los resultados imprevistos o no satisfactorios. A través de la modelización, el análisis basado en la Dinámica de Sistemas, explica y abre estas estructuras de retroalimentación para su análisis y la formulación de políticas del sector público (Andersen, Rich, & MacDonald, 2009).

La finalidad de ambas simulaciones fue formular políticas preventivas y correctivas para consumo de gas natural. Por un lado, asignar el gas reducido a manera de evitar pérdidas económicas y por otro, diseñar tarifas que, en el largo plazo promuevan el desarrollo de la capacidad de los gasoductos. Dadas las condiciones del mercado de gas natural, las instalaciones de transporte requieren de una gran inversión. Esto implica que sólo existirá un permisionario o transportista por cada sistema de ductos. Por lo que las políticas aplicadas como condiciones de uso y tarifas que cobre dicho permisionario deberán estar reguladas.

Ambos modelos se crearon por un propósito, tratando de analizar un sistema. El diseño de cada uno dependió del planteamiento de ciertos objetivos y en función de éstos se pudieron obtener resultados útiles, ya que se estudió el sistema y se propusieron soluciones a una problemática.

El establecimiento de políticas trata de dar un beneficio común mayor, por lo que siempre habrá algunos afectados que no reciban dicho beneficio. Sin embargo, tomando una decisión más objetiva, basada en resultados cuantitativos, podrá dar una solución más razonable. La simulación fue la

herramienta utilizada. Faltaría observar la aplicación de las soluciones propuestas para saber qué tan bien se comporta el sistema.

Una característica importante de este sistema es que se trata de un bien al que deben tener derecho todos los usuarios, por lo que la empresa encargada de suministrarlo debe tener las condiciones suficientes para lograrlo. Dado que es un bien necesario, no puede tomarse una decisión a la ligera y debe ser de las decisiones más relevantes para un país. En esta investigación se presentó la consecuencia final de la falta de gas, las pérdidas económicas. Desde este punto de vista, el criterio 1, Diversificación del uso de gas, debería ser el criterio elegido para crear una política de asignación de gas cuando éste sea reducido. Este criterio promueve el suministro de gas a diversos usuarios, permitiendo que sean varios los que consuman este bien. Lo cual promueve que socialmente, no todos sean afectados. De igual manera, la propuesta de una tarifa que sea pagada por todos genera un costo social. Dado que todos los usuarios lo pagarían, el impacto del costo es menor a que si sólo unos cuantos lo pagan. Con una tarifa pequeña, designada a todos los usuarios genera un gran monto de inversión que puede utilizarse de tal manera que ninguno sufra por falta de infraestructura en el transporte.

Se considera relevante mencionar que los bienes públicos y en especial la necesidad de combustibles en un país deben ser considerados prioridad. Sin embargo, al momento de asignarlos es necesario hacerlo de manera que no se afecte a la mayoría de la población, este trabajo de investigación desea mostrar esa importancia. Cualquier propuesta de solución para este tipo de problemas debe buscar el beneficio de la mayoría. Es por esto, que se presentaron diversos criterios para asignar el gas natural. Sin embargo, la falta de capacidad de transporte continuaba así que la propuesta del modelo de largo plazo fue presentada. Nuevamente, la tarifa propuesta busca ser un costo social que todos los usuarios paguen, pero que éste sea pagado en función del volumen consumido. De esta manera, ambas propuestas toman en cuenta el impacto social que generan los elementos propuestos para crear políticas de asignación de gas y de incremento de capacidad.

Como trabajo futuro quedaría analizar qué sucedería en diversos puntos del país, dado que el problema se agravó en las zonas Centro y Occidente, lo conveniente sería analizar dichas zonas y estudiar la necesidad de incrementar la infraestructura de transporte en dicho lugar.

Bibliografía

1. Aguirre Jaime, A. (1994). *Introducción al tratamiento de series de tiempo*. Madrid: Díaz de Santos.
2. Allen, T. (2011). *Introduction to Discrete Event Simulation and Agent-based Modeling*. Columbus, Ohio, EEUU: Springer.
3. Allen, T. T. (2011). *Introduction to discrete event simulation and agent based modeling*. Londres: Springer London Dordrecht Heidelberg.
4. Andersen, D., Rich, E., & MacDonald, R. (2009). System Dynamics Applications to Public Policy. *Encyclopedia of Complexity and Systems Dynamics*, 7051-7067.
5. Ansari, N., & Seifi, A. (2012, Mayo). A system dynamics analysis of energy consumption and corrective policies in Iranian iron and steel industry. *Energy*, 43, 334-343.
6. Aouam, T., Rardin, R., & Abrache, J. (2010). Robust Strategies for natural gas procurement. *European Journal of Operational Research*, 205, 151-158.
7. Aracil, J. (1995). *Dinámica de Sistemas*. España: Ingeniería de Sistemas.
8. Avery, W., Brown, G. G., John, R. A., & Wood, K. (1992, May - Jun). Optimization of purchase, storage and transmission contracts for natural gas utilities. *Operations Research*, 40(3), 446 - 442.
9. Barceló, J. (1996). *Simulación de sistemas discretos* (Vol. 12). Madrid, España: Iadefe.
10. Barlas, Y. (1996, Mayo). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System Dynamics Review*, 12(3), 183-210.
11. Chandra, V. (2006). *Fundamentals of Natural Gas: An international perspective*. Tulsa: PennWell.
12. Charnes, A., Cooper, W. W., Gorr, W. L., & Hsu, C. (1986, October). Emergency Government Interventions: Case Study of Natural Gas Shortages. *Management Science*, 32(10), 1242-1258.
13. Chermack, T. J. (2005, November). Studying scenario planning: Theory, research, suggestions and hypothesis. *Technological Forecasting and Social Change*, 75, 59 - 73.
14. Chyong Chi, K., Nuttall, W. J., & Reiner, D. M. (2009, Junio 8). Dynamics of the UK natural gas industry: System dynamics modelling and long-term energy policy analysis. *Technological Forecasting & Social Change*, 76, 339-357.

15. Comisión Reguladora de Energía y Gas Natural. (2009). *Resolución 18-1654 Se declara otro racionamiento de Gas Natural*. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía.
16. Comisión Reguladora de Energía y Gas Natural. (2012). *Resolución 18 0056 Se declara el racionamiento programado de gas natural y se adoptan otras medidas*. República de Colombia. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía.
17. CONCAMIN. (2012). Frena desabastecimiento del gas al PIB. *Acta de prensa* (p. 2). México: CONCAMIN.
18. Contesse, L., Ferrer, J. C., & Maturana, S. (2005). A Mixed-Integer Programming Model for Gas Purchase and Transportation. *Annals of Operations Research*, 139, 39 - 63.
19. Cruz Serrano, N. (2013, Agosto 28). Alertas críticas para reducir el consumo de gas, hasta septiembre. *El Universal Cartera*, p. 1.
20. Duffuaa, S. O., Al-Zayer, J. A., Al-Marhoun, M. A., & Al-Saleh, M. (1992, Noviembre). A Linear Programming Model to Evaluate Gas Availability for Vital Industries in Saudi Arabia. *Operational Research Society*, 43(11), 1035 - 1045.
21. FERC. (2011). *18 CFR Part 284*. Washington: Federal Energy Regulatory Commission.
22. Ford, A. (2011). Lessons from the Regulated Power Industry in the 1970s. In A. Ford, *System Dynamics Models of Environment, Energy and Climate Change* (pp. 782-801). Nueva York, Estados Unidos: Springer.
23. Forrester, J. W. (1971, October 7). Counterintuitive behavior of social systems. *Technology Review*(D-4468-2), 1-29.
24. Ghaffarzadegan, D., Lyneis, J., & Richardson, G. (2010, Octubre). How small system dynamics models can help the public policy process. *System Dynamics Review*, 27(1), 22-44.
25. González-Busto Mújica, B. (1998). *La dinámica de sistemas como metodología para la elaboración de modelos de simulación*. Universidad de Oviedo, Departamento de Administración de Empresas y Contabilidad. Oviedo: Universidad de Oviedo.
26. Gordon, G. (1980). *Simulación de Sistemas*. (S. Fernández, Trans.) México, México: Diana.
27. Guldmann, J.-M., & Wang, F. (1999). Optimizing the natural gas supply mix of local distribution utilities. *European Journal of Operational Research*, 112, 598 - 612.
28. Hamedi, M., Zanjirani, R., & Moattar, M. (2009). A distribution planning model for natural gas supply chain: A case study. *Energy Policy*, 37, 799 - 812.

29. Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2002). *Investigación de Operaciones*. México: McGraw-Hill.
30. Jingchun, S., Ding, L., & Fan, W. (2010). The simulated system dynamics analysis of the natural gas supply and demand. *Kybernetes*, 39(8), 1262-1269.
31. Junchen, L., Xiucheng, D., Jianxin, S., & Hook, M. (2011, Febrero). Forecasting the growth of China's natural gas consumption. *Energy*(36), 1380-1385.
32. Kadoya, T., Sasaki, T., Ihara, S., & Larose, E. (2005, Noviembre). Utilizing System Dynamics modeling to examine impact of deregulation on generation capacity growth. *Proceedings of the IEEE*, 93(11), 2060-2069.
33. Kannan, V., Palocsay, S., & Stevens, S. (1996). An optimization model for planning natural gas purchases, transportation, storage and deliverability. *Omega*, 24(5), 511 - 522.
34. Kiani, B., Mirzamohammadi, S., & Hossein Hosseini, S. (2010, Julio). A Survey on the Role of System Dynamics Methodology on Fossil Fuel Resources Analysis. *International Business Research*, 3(3), 84-93.
35. Lajous Vargas, A. (2013). Dilema del suministro de gas natural en México. *Estudios y Perspectivas*, 142, 50.
36. Law, A. M., & Kelton, D. W. (1991). *Simulation modeling and analysis*. Toronto, Canadá: McGraw Hill.
37. López, A. (2013, Agosto 14). Detallan estrategia de gas natural. *Reforma Negocios*, p. 8.
38. MacKay, B., & Tambaueu, P. (2013). A structuration approach to scenario praxis. *Technological Forecasting & Social Change*, 80, 673-686.
39. Modeling and Simulation Center. (2010). *Modeling and Simulation Fundamentals*. (J. A. Sokolowski, & C. M. Banks, Eds.) New Jersey: John Wiley & Sons.
40. Naill, R., & Belanger, S. (1992). A Systems Dynamic model for national energy policy planning. *System Dynamics Review*, 8(1), 1-19.
41. Olaya Morales, Y. (1999). *Integración de modelos de dinámica de sistemas y optimización en el análisis del mercado de gas natural en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Medellín: Departamento de Biblioteca.
42. Olaya, Y., & Dyner, I. (2005, Octubre). Modelling for policy assessment in the natural gas industry. *Operational Research Society*, 56(10), 1122 - 1131.

43. O'Neill, R. P., Williard, M., Wilkins, B., & Pike, R. (1979, Sep - Oct). A Mathematical Programming Model for Allocation of Natural Gas. *Operations Research*, 27(5), 857 - 873.
44. Qudrat-Ullah, H., & Seo Seong, B. (2009, Diciembre 29). How to do structural validity of a system dynamics type simulation model: The case of an energy policy model. *Energy Policy*, 38, 2216-2224.
45. Railsback, S., Lytjen, S., & Jackson, S. (2006, Septiembre). Agent - based simulation platforms: Review and Development Recommendations. *Simulation*, 82(9), 609 - 623.
46. Rodríguez, I. (2013, Abril 1). CFE proveerá gas natural para garantizar abasto a la industria. *La Jornada Economía*, p. 1.
47. Sanchez, S. M., & Lucas, T. W. (2002). Exploring the world of agent-based simulations: simple models, complex analysis. *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, 116 - 126.
48. Secretaría de Economía. (2015, Diciembre). *COFEMER*. Retrieved from Comisión Federal de Mejora Regulatoria: <http://www.cofemer.gob.mx/>
49. SENER. (2012). *Prospectiva del mercado de gas natural 2012 - 2026*. México: SENER.
50. SENER. (2014). *Estrategia Nacional de Energía 2013 - 2027*. México: Secretaría de Energía.
51. Senge, P. (1990). *The fifth discipline: the art and practice of the learning organization*. London: Double Day Currency.
52. Sharp, J. (1977). Systems Dynamics Applications to industrial and other systems. *Operational Research Quarterly*, 28(3 1), 489-504.
53. Sokolowski, J. A., & Banks, C. M. (Eds.). (2010). *Modeling and Simulation Fundamentals*. Canadá: John Wiley & Sons.
54. Sokolowski, J. A., & Banks, C. M. (2010). *Modeling and Simulation Fundamentals*. Nueva Jersey: John Wiley & Sons.
55. Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Boston, Estados Unidos: Irwin Mc Graw Hill.
56. Teufel, F., Miller, M., Massimo, G., & Wolf, F. (2013, Abril). Review of System Dynamics models for electricity market simulations. (U. S. Baden, Ed.) *Working paper series in production and energy*(2), 1 - 40.

57. Trappey, C. V., Trappey, A. J., & Lin, G. Y. (2011). System Dynamics evaluation of renewable energy policies. *Improving Complex Systems Today*, 133-140.
58. Vargas, A. L. (2013). *Dilema del suministro de gas natural en México*. México: CEPAL en México.
59. Villada, J., & Olaya, Y. (2013). A simulation approach for analysis of short-term security of natural gas supply in Colombia. *Energy Policy*, 53, 11 - 26.
60. Xu, J., Dong, R., & Dash Wu, D. (2010). On simulation and optimization of one natural gas industry system under the rough environment. *Expert Systems with Applications*, 1854-1862.

No.	Autores	Año	Título	Contenido	Modelos aplicados
1	Richard P. O'Neill, Mark Williard, Bert Wilkins	1979	A Mathematical Programming Model for Allocation of Natural Gas (OR)	Metodología para asignar el gas, con varias FO . Los usuarios representados con nodos que conservaban el flujo de gas (D = O).	Muestra 4 pasos para asignar gas por prioridades. Se optimizan secuencialmente 9 objetivos (LP), maximizando la cantidad asignada.
2	Reuven R. Levary, Burton V. Dean	1980	A Natural Gas Flow Model under Uncertainty in Demand	Asignar durante varios periodos el GN, utilizando pronósticos de la demanda para el horizonte de planeación.	Programación lineal multi-periodo
3	Abraham Charnes, William W. Cooper, Wilpen L. Gorr	1986	A Mathematical Programming Model for Allocation of Natural Gas (OR)	Modelo para mejorar la decisión del gobierno ante reducciones de GN. Mediante el regímenes de decisión.	Estimando el consumo y utilizando Programación de oportunidades restringidas.
4	Duffuaa, S. O., Al-Zayer, J. A., Al Marhoun, M. A., & Al-Saleh, M.	1992	A Linear Programming Model to Evaluate Gas Availability for Vital Industries in Saudi Arabia	Estudia el impacto de la producción del petróleo en el suministro de gas a las industrias que lo necesitan. Planifica la producción necesaria al mínimo costo.	Programación Lineal
5	W. Avery, G. Brown, R.A. John, & K. Wood	1992	Optimization of purchase, storage and transmission contracts for natural gas utilities	De acuerdo con los contratos de gas, se trató de asegurar el suministro tomando en cuenta, la cantidad a comprar y los balances del gas en el almacenamiento.	Programación Lineal Entera Mixta y Ecuaciones diferenciales para el balance de gas
6	12. Kannan, V., Palocsay, S., & Stevens, S.	1996	An optimization model for planning natural gas purchases, transportation, storage and deliverability.	De acuerdo con los contratos de gas, se trató de asegurar el suministro y adquirir el gas a precios bajos. Evitando el riesgo a quedarse sin el combustible.	Programación Lineal Entera Mixta
7	Olaya, Morales Y.	1999	Integración de modelos de dinámica de sistemas y optimización en el análisis del mercado de gas natural en Colombia.	Debido a la situación regulatoria y económica de Colombia, se plantea un modelo que analice el suministro de gas natural, a través del uso correcto del transporte (AG) y su afectación en la cadena.	Algoritmos genéticos y dinámica de sistemas
8	Contesse, L., Ferrer, J. C., & Maturana, S.	2005	A Mixed-Integer Programming Model for Gas Purchase and Transportation	Estudia el mercado de gas natural con un modelo de equilibrio del mercado multiperiodo. Desde la perspectiva de la cadena de suministro.	Programación Entera Mixta Multiperiodo
9	Olaya, Y., & Dyner, I.	2005	Modelling for policy assessment in the natural gas industry	Mediante la simulación discreta y basada en agentes estudia la seguridad del suministro en la cadena de gas natural en Colombia. Crea escenarios mediante distintos niveles de gas propuestos y con condiciones de transporte.	Modelo de Simulación de eventos discretos y basada en agentes.
10	Selot, A., Kuok, L., Robinson, M., Mason, T., Barton, P.	2007	Maximizing Federal Natural Gas Royalties	Presenta un modelo de asignación de producción de la cadena de suministro, considera presión del flujo y calidad del gas.	Programación Lineal Entera Mixta
11	Hamed, M., Zanjirani, R., & Moattar, M.	2009	A distribution planning model for Natural Gas Supply Chain: A case study	Estudia la planificación de la distribución de la cadena de suministro de GN, mediante la minimización de costos.	Programación Lineal Entera Mixta
12	6. Chyong Chi, K., Nuttall, W. J., & Reiner, D. M.	2009	Dynamics of the UK natural gas industry: System dynamics modelling and long-term energy policy analysis	Mediante la simulación de dinámica de sistemas, se planeó el suministro de gas natural en el Reino Unido. Tomando en cuenta la regulación, las leyes y comportamiento del mercado.	Modelo de Simulación de Dinámica de Sistemas
13	11. Jingchun, S., Ding, L., & Fan, W.	2010	he simulated system dynamics analysis of the natural gas supply and demand	El estudio se realizó en China y se analizó el mercado y su crecimiento. De esta forma se determinaría qué política de suministro se utilizaría.	Modelo de Simulación de Dinámica de Sistemas
14	Egging Ruud	2012	Benders Decomposition for multi-stage stochastic mixed complementarity problems	Presenta un algoritmo para resolver problemas de programación mixta multiperiodo de complementariedad, a gran escala. Se enfoca en el mercado global de GN.	Programación Complementaria Mixta multi-periodo
15	Juan Villada, Yris Olaya	2013	A simulation approach for analysis of short-term security of natural gas supply in Colombia	Simulación de varios escenarios (periodos) de los distintos eslabones de la cadena de suministro. Estudia qué cambios pueden hacerse para asegurar suministro de GN.	Modelo de simulación discreta y simulación basada en agentes.