

Escenarios en el suministro de gas licuado de petróleo (GLP) bajo un enfoque de dinámica de sistemas

BEATRIZ JUANA ADANIYA HIGA ¹
RICARDO RODRÍGUEZ ULLOA ²

RECIBIDO: 08/01/2021 ACEPTADO: 27/06/2022 PUBLICADO: 31/12/2022

RESUMEN

Este artículo surge del análisis de la problemática del abastecimiento de GLP en el Perú, a partir de diversos factores con un impacto significativo en su cadena de valor. Por la complejidad del análisis se hace necesario utilizar diferentes técnicas y metodologías, tal como la dinámica de sistemas empleada en este estudio, que, mediante un modelo propuesto, genera diversas hipótesis para explicar los patrones de comportamiento de la variable investigada y entender la lógica causal en el tiempo cuando interactúa con otras variables. Como resultado, se propone un modelo que genera posibles escenarios que ratifican la disminución de la producción de GLP en el tiempo ante la inacción respecto a la producción de gas natural y sugiere la necesidad de incentivar inversiones en exploración para el aumento de las reservas de gas natural. La investigación concluye que es necesario establecer políticas públicas para lograr las condiciones de mercado que aseguren el suministro de GLP.

Palabras clave: producción de GLP; demanda; abastecimiento; escenarios; dinámica de sistemas.

INTRODUCCIÓN

El estudio presenta una propuesta de modelo construido con la metodología dinámica de sistemas que muestra posibles escenarios para el abastecimiento de gas licuado de petróleo (GLP) en el Perú, considerando los diversos factores que intervienen en su cadena de valor y tienen impacto significativo sobre el suministro de dicho combustible a nivel nacional, cuando se presentan situaciones que afectan a cualquiera de estos factores. El uso de este modelo, basado en el análisis del comportamiento de sistemas y desarrollado por primera vez para este combustible, cobra relevancia en la medida que su construcción contribuye al conocimiento de las interrelaciones entre el comportamiento del sistema y su estructura (Campos et al., 2005); así, es posible observar cómo se comportará en el tiempo cada uno de los factores que tienen una carga e impacto significativos en el abastecimiento de GLP. La simulación de diferentes situaciones que se pueden presentar en el futuro permitirá a las autoridades del sector establecer políticas públicas para resolver la problemática del desabastecimiento de este energético cuando se materialicen los riesgos asociados a los factores analizados.

El uso doméstico del GLP en el Perú se inició en la década de 1950 cuando la International Petroleum Company, operada por ESSO (que años después, se convirtió en la Compañía Peruana de Gas), instaló la primera planta envasadora de cilindros de GLP. En 1992, con la privatización de la Compañía Peruana de Gas, se establecieron nuevas disposiciones para la comercialización en cilindros que incluía la responsabilidad de las plantas envasadoras del mantenimiento de sus cilindros. Tres años después, en 1995, inició sus operaciones el primer gasocentro de GLP de uso vehicular (Organismo Supervisor de la Inversión

1 Ingeniera petroquímica y doctora en Gestión de Empresas. Actualmente, es docente de la Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica de la Universidad Nacional de Ingeniería (Lima, Perú).

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7563-7773>

Autor de correspondencia: badaniya@fip.uni.edu.pe

2 Ingeniero de sistemas. Actualmente, es presidente del Instituto Andino de Sistemas (IAS) y docente de la Facultad de Ingeniería Industrial y Sistemas de la Universidad Nacional de Ingeniería (Lima, Perú).

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9336-1782>

E-mail: ias@iasvirtual.net

en Energía y Minería [Osinermin], 2017). El desarrollo del mercado de GLP y el crecimiento económico del país determinaron la expansión del uso del GLP a un ritmo aproximado de 6% anual en el sector comercial e industrial (Aguirre et al., 2015), lo que determinó que, en los seis primeros meses del 2004, se hiciera necesaria su importación debido a la demanda insatisfecha de este energético.

Cabe anotar que, por aquella época, el GLP era producido básicamente por dos refinерías de petróleo: una, operada por Petróleos del Perú S.A., ubicada en el norte del país, específicamente en la ciudad de Talara, departamento de Piura; y la segunda, ubicada en el distrito de Ventanilla, provincia constitucional del Callao, operada por Repsol. Asimismo, en la planta de Yarinacocha ubicada en el departamento de Ucayali y operada por Aguaytía Energy también se producía cierta cantidad de GLP por fraccionamiento de líquidos de gas natural (LGN).

El inicio de operaciones de la Planta de Fraccionamiento de LGN de Pisco, ubicada en el departamento de Ica y operada por la empresa Pluspetrol Perú Corporation, convirtió al Perú en un país

exportador. La planta utiliza como alimentación el LGN, que procede del gas natural condensado producido por la empresa Pluspetrol Perú Corporation en el lote 88, ubicado en Camisea, Cusco, como se aprecia en la Figura 1. El gas natural producido es transportado hacia la planta de separación de Malvinas donde se obtiene gas natural seco (GNS) y LGN. El GNS es inyectado a un gasoducto y el LGN es transportado por poliducto para su fraccionamiento en la planta de Pisco y da origen al GLP, nafta y un destilado medio para mezcla (Adaniya, 2019). El GNS es comprimido primero en la planta compresora de Kepashiato y, luego, en la estación de Chiquintirca (Ayacucho), desde donde sale un ducto hacia la planta de licuefacción de Pampa Melchorita (provincia de Chincha, departamento de Ica), punto de exportación de gas natural licuefactado (GNL). La Figura 2 muestra un esquema básico de producción de GLP a partir de GNL.

Adicionalmente, si se presentara oleaje anómalo en el litoral peruano, específicamente en las costas de Pisco, Chincha, Callao y Ventanilla, los buques se verían impedidos de cargar GLP en Pisco y descargarlo en las plantas de abastecimiento de las em-



Figura 1. Mapa del sistema de transporte de GNS y LGN.

Fuente: Adaniya (2020).

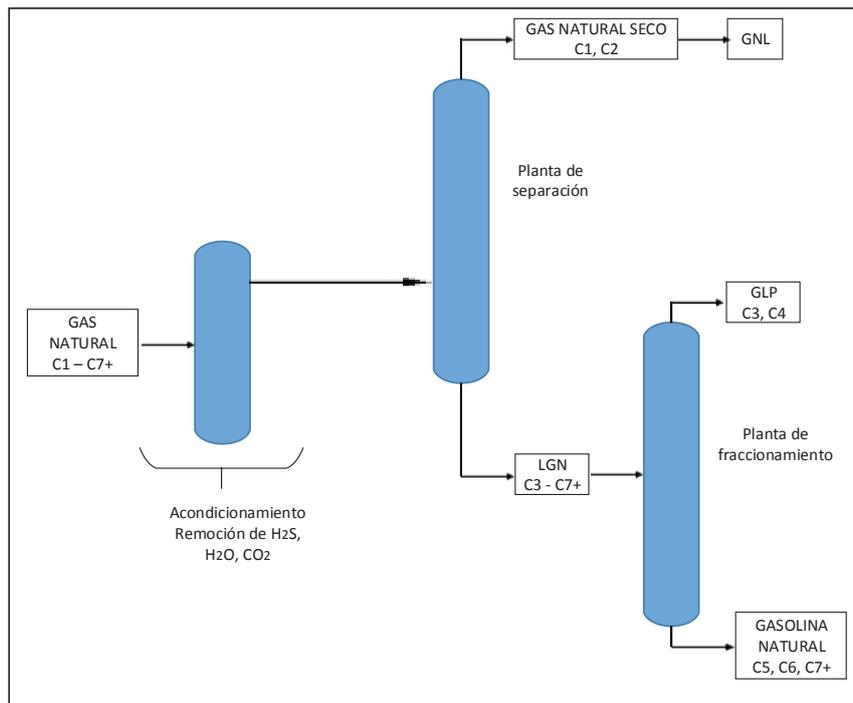


Figura 2. Producción de GLP.

Fuente: Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (2010).

presas Zeta Gas y Repsol en Ventanilla, así como en el Terminal Callao de Petroperú. Por otro lado, cabe mencionar que, en el terminal de Perú LNG en Chincha, un buque metanero no podría acercarse para cargar GNL para exportación, por lo que la planta de licuefacción tendría que realizar una parada de planta o reducir su capacidad de procesamiento debido a limitaciones de almacenamiento, lo cual impactaría en la producción y el transporte de GNS y LGN.

En este contexto, la proyección de la demanda, incluyendo las exportaciones, superó la capacidad de producción en distintos periodos de tiempo. Hoy en día, hay que reconocer que el Perú ha perdido condición de país esencialmente exportador debido al rápido crecimiento de la demanda y la inexistencia de nuevos proyectos de inversión que contemplen un aumento de la infraestructura de almacenamiento de GLP, así como de las facilidades de despacho para transporte por cisternas que permitan atender condiciones de emergencias por desabastecimiento debido a causas diversas. Actualmente, la capacidad instalada es insuficiente incluso manteniendo almacenamiento flotante. Por

lo tanto, como resultado de un análisis de tipo causa-efecto de factores que impactan sobre el suministro de GLP y las evidencias identificadas, es posible generar modelos dinámicos de simulación para pronosticar escenarios futuros de seguridad de suministro (Adaniya, 2020).

Objetivo

El estudio buscó proponer un modelo desarrollado mediante la metodología dinámica de sistemas que muestre posibles escenarios para el abastecimiento de GLP en el Perú, considerando diversos factores que intervienen en la cadena de valor del GLP y que tienen un nivel significativo de impacto sobre el suministro de GLP en todo el país.

Marco teórico

Cuando se inicia un análisis de dinámica de sistemas, es necesario precisar lo que se entiende por *sistema*. Es así que, un sistema puede ser todo lo que se representa mediante una lista de variables (Ashby, 1956, como se citó en Salt et al., 2016) caracterizado por sus propiedades o atributos además de tener la capacidad de contener subsistemas bajo el contexto de la definición de

interior y entorno, al considerar lo que puede estar dentro del sistema o fuera de él (Gaines, 1979, como se citó en Salt et al., 2016). Por otro lado, las características de un sistema se fundamentan en tres aspectos: 1) se sabe lo que es y lo que no es del sistema, 2) es posible determinar las interacciones del sistema con el entorno, y 3) el sistema acepta el «principio de ordenación jerárquica» (Campos et al., 2005, p. 3). En el contexto utilizado en este estudio, se habla de «un sistema como de un objeto dotado de alguna complejidad, formado por partes coordinadas, de modo que el

conjunto posea una cierta unidad, que es precisamente el sistema» (Campos et al., 2005, p. 4); en ese sentido, analizamos una unidad con elementos (factores) que interactúan entre sí, afectándose mutuamente, manteniendo una identidad y bajo condiciones que cambian constantemente a través del tiempo siguiendo una dinámica compleja en la que, además, participan diversos actores, tal y como lo muestra el esquema de la Figura 3 y la representación gráfica de un sistema de mayor complejidad, en la Figura 4.

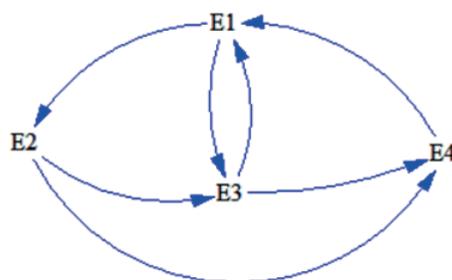


Figura 3. Esquema gráfico de un sistema.

Fuente: Elaboración propia.

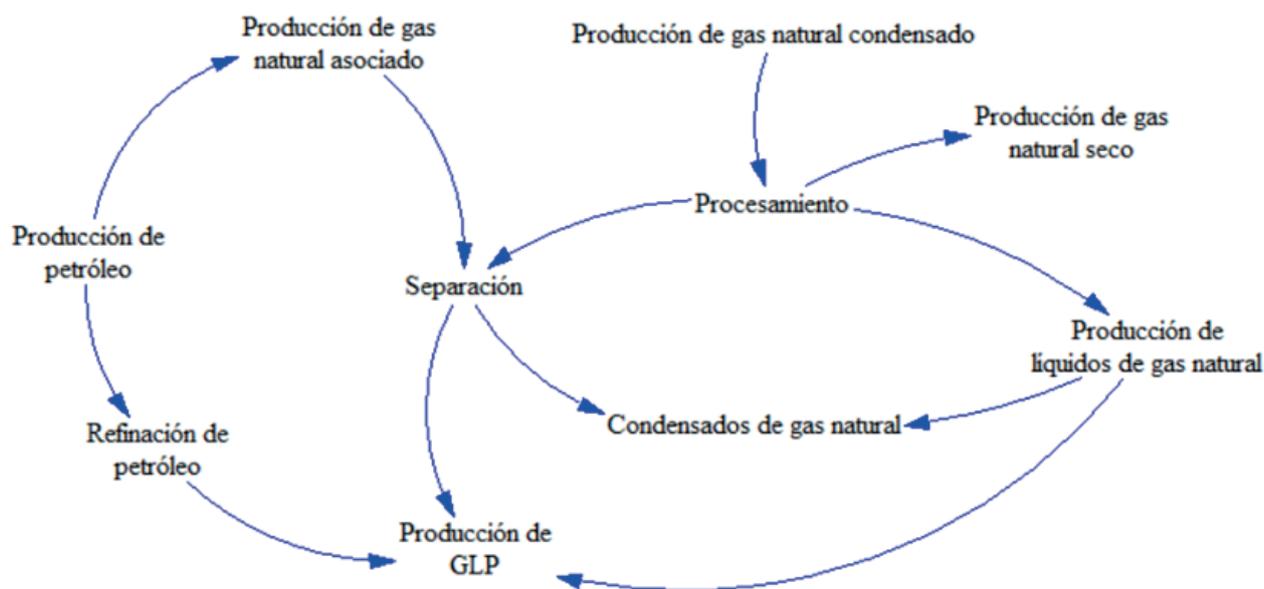


Figura 4. Representación gráfica de un sistema complejo relacionado al GLP.

Fuente: Elaboración propia.

Otro término que cabe precisar es *dinámica*, entendiéndose que se quiere expresar el carácter cambiante de cada factor involucrado en el sistema a través del tiempo (Figura 5). Por tanto, la *dinámica de sistemas* expresa cómo los diferentes factores pueden cambiar en el transcurso del tiempo como resultado de las interacciones que se producen entre ellos.

En esta etapa, tras realizar un proceso experimental, se recolecta la información que, una vez estructurada, permite comprender las relaciones causales que existen entre los factores, así como las de tiempo y espacio, con lo que se consigue organizar el conocimiento y una representación que servirá de modelo si cumple con reflejar de manera adecuada las características de interés del sistema y si es lo suficientemente sencillo para su manejo.

El término *simulación* utilizado por Campos et al. (2005), basado en la definición de Granino Korn (se expresado como «un experimento realizado sobre un modelo» (p. 7). De ahí que la dinámica de sistemas sea un método en el que se realiza simulaciones sobre un modelo que representa a los factores, sus interrelaciones y los cambios producidos en el espacio y el tiempo; esto permite analizar cómo las relaciones de los factores dentro de un sistema permiten explicar su comportamiento y estructura.

La dinámica de sistemas es una metodología desarrollada por Jay Forrester y explicada en sus publicaciones; fue concebida en principio para la solución de problemas específicos (Forrester, 2016; Lane y Sterman, 2011). Así, Campos et al. (2005) la utilizaron para estudiar la susceptibilidad, incidencia y prevalencia de una población ante una determinada enfermedad bajo tres casos diferentes y

desarrollaron además un símil hidráulico para cada caso.

Ibarra y Redondo (2015) la mostraron como una herramienta útil en la educación ambiental en ingeniería. Asimismo, Cuervo et al. (2013) desarrollaron simulaciones que permiten evaluar la calidad del servicio de transporte dentro de la complejidad de un sistema social. Es decir, en la dinámica de sistemas, se conciben diferentes situaciones como resultado de una serie de interacciones causales entre los atributos que las describen, con lo que se construye una serie de expresiones sistémicas con flechas y con puntos, que constituyen diagramas de tipo causa-efecto, que muestran diferentes hipótesis propuestas por cada investigador, a partir de las cuales se puede analizar el sistema y evaluar diferentes formas de intervención en una situación de toma de decisiones (Aracil, 1995; Aracil y Gordillo, 1997).

Asimismo, Ibarra y Redondo (2015) destacan que la dinámica de sistemas se utilizó a fines de la década del sesenta en el estudio titulado *Limits to Growth*, cuyos resultados sustentaron el primer reporte que mostró pronósticos de población, disponibilidad de recursos y contaminación ambiental en el planeta. El modelo obtenido ha aportado al conocimiento de la metodología (Aracil y Gordillo, 1997). En relación a ello, Boloña (1973) explica, además de comentarios específicos y de manera resumida, en qué consistieron las cinco (5) corridas realizadas por el Instituto Tecnológico de Massachusetts a solicitud del Club de Roma para, basado en sistemas dinámicos, modelar las tendencias mundiales en cinco áreas: producción de alimentos, industrialización, agotamiento de recursos naturales y contaminación ambiental,

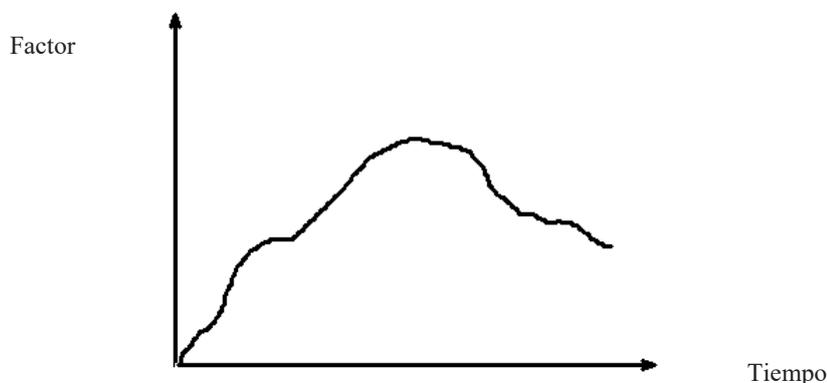


Figura 5. Representación gráfica del comportamiento de un factor.

Fuente: Elaboración propia.

en virtud de las tendencias fijas o crecientes a diferentes tasas establecidas bajo criterios diversos de algunos factores naturales.

Una de las conclusiones del análisis realizado establece que, en el presente siglo, la Tierra alcanzará los límites de su crecimiento si se mantiene la tendencia actual de incremento poblacional mundial, de industrialización, de contaminación ambiental y de producción de alimentos, lo cual conducirá inexorablemente al agotamiento de los recursos. Así, es probable que se tuviese una repentina e incontrolable disminución de la población, así como su capacidad industrial (Meadows et al., 1972). De igual forma, se observará un decrecimiento de la tasa de extracción de recursos no renovables ante la declinación de su explotación, produciendo a su vez un decrecimiento de la producción mundial industrial y de alimentos, con la subsecuente reducción de los niveles de vida para la población y los animales. El análisis de esta situación es semejante al de la problemática de suministro de GLP en cada etapa de su cadena de valor.

Chyong et al. (2009) desarrollaron un modelo sistémico y dinámico para el análisis de políticas energéticas de largo plazo. Ellos encontraron que sólo con la gestión de políticas del lado de la oferta no se puede postergar el descubrimiento, la producción y el pico del consumo. Además, que la dinámica de cambio de las principales variables como la exploración, la producción y el consumo son sensibles a las condiciones iniciales de la demanda. El análisis permitió observar el comportamiento del precio del gas natural respecto del crecimiento de la demanda; asimismo, la influencia de la política impositiva respecto de una mayor exploración y producción de gas natural y que, con bajos impuestos, se impulsaría estas actividades, por lo que aumentarían las tasas de consumo. Sin embargo, encontraron que no había un impacto neto global sobre la producción y el consumo a largo plazo. El efecto de la reducción en los costos de exploración actúa para balancear la política de bajos impuestos; asimismo, provoca que los costos y los precios se eleven más de lo que se reduce la tasa de consumo. Concluyen que los adelantos tecnológicos en exploración y producción de gas natural podrían retrasar la exploración, producción y consumo pico, lo que implica que menores costos reprimen la dinámica del patrón de los precios en el largo plazo.

Aslani et al. (2014), para efectos de analizar el rol de las políticas en energías renovables sobre la dependencia energética en Finlandia, estudiaron el papel de la diversificación sobre la dependencia y seguridad del suministro de energía; para ello,

trabajaron bajo un modelo dinámico de sistemas con especial atención en el papel de los recursos de energía renovable. Su propósito también fue cubrir, en parte, la brecha de investigación que existe en el modelamiento utilizando la dinámica de sistemas de las investigaciones de seguridad energética. El método se basó en el uso de diagrama de bucles causales y un modelo dinámico de sistemas para evaluar tres escenarios finlandeses diferentes de las políticas de energía renovable para 2020. El análisis muestra que, a pesar del crecimiento del 7% en el consumo de electricidad/calor para 2020 en Finlandia, la dependencia de las fuentes importadas disminuiría entre un 1% y un 7% dependiendo de los escenarios definidos. Con información del 2021, podría corroborarse la bondad de este modelo. Las implicaciones de esta investigación, de acuerdo a los autores, es que el modelo propuesto no solo ayudaría a los responsables de la toma de decisiones a poner a prueba sus escenarios relacionados a las políticas de energía renovable, sino que además podría ser implementada por otros países (Aslani et al., 2014).

Estas investigaciones apoyan la aplicación del modelamiento usando la dinámica de sistemas para el estudio del desabastecimiento de GLP, lo que puede conducir al establecimiento de políticas públicas para asegurar el suministro de este combustible. Cabe precisar que, en el desarrollo del análisis del problema, se sigue la metodología *soft system dynamics methodology* (SSDM), según los lineamientos de la metodología para sistemas suaves (SSM) de Peter Checkland combinado con la dinámica de sistemas (Rodríguez y Paucar, 2005); ello permite identificar las variables involucradas, tomando en consideración que cada individuo tiene su propia percepción e interpretación del mundo por lo que tendrá también su propia percepción e interpretación de una situación problemática en particular.

Esta metodología, combinada con el lenguaje unificado de modelado (UML), también ha sido aplicada por Martínez y Ríos (2007) para proponer el diseño de un sistema de información ejecutiva para gerentes que les permita disponer de información básica, entregar estadísticas sobre variables de interés y facilitar la toma de decisiones. Asimismo, ha sido una herramienta útil para el establecimiento de sistemas de comunicación bajo la perspectiva cibernética. Al respecto, en la investigación de Murillo et al. (2019) se integró y organizó el conocimiento existente profundizando en los principios y procesos de un sistema de comunicación con base en la transdisciplinariedad del conocimiento. Ello fue logrado utilizando «metodologías cibernéticas de

segundo orden y sistémicas como la metodología de sistemas blandos», la cual permite diferenciar «los procesos epistémicos y ontológicos del proceso de investigación-acción a través de la resolución de situaciones-problema» (Murillo et al., 2019, p. 1). Su propuesta ha contribuido a desarrollar «nuevas etapas para el estudio de la comunicación como un sistema cada vez más integrado, de mayor alcance y con más aplicaciones en el mundo real» (Murillo et al., 2019, p. 1).

METODOLOGÍA

La dinámica de sistemas es una metodología que ayuda a la formulación de diversas hipótesis para explicar, a través de bucles de relaciones causales (Figura 7), los patrones de comportamiento que podría tener una variable (factor) por investigar al interactuar con otras variables (factores), a fin de entender la lógica causal de su comportamiento a lo largo del tiempo. Por lo tanto, es importante resaltar que en la dinámica de sistemas se están simulando diferentes situaciones cuando se cambian los escenarios, **cambiando las fórmulas empleadas y el horizonte de tiempo.**

Cabe precisar que esta metodología se basa en cuatro definiciones fundamentales. En primer lugar, las variables de estado (tipo *stock*) que pueden reflejar el estado del sistema en un momento en particular a causa de una acumulación de recursos a lo largo del tiempo o como resultado de

variaciones entre flujos de entrada y salida. Una segunda definición corresponde a las variables de flujo (tipo *flow*) con las que se observa flujos de fluidos o energía entre dos variables *stock*. Las dos definiciones restantes relacionan ecuaciones, la primera corresponde a las ecuaciones de nivel que representan el nivel acumulado de una variable y su tasa de cambio en un determinado intervalo de tiempo; por otro lado, las ecuaciones de flujo representan las tasas de cambio de las variables de nivel y definen el comportamiento del sistema dentro del modelo (Ramoni y Orlandoni, 2022).

Durante la ejecución del análisis del problema del abastecimiento de GLP en el Perú, se ha seguido la metodología SSDM, la cual ha ayudado a definir apropiadamente el problema y las situaciones de conflicto o aspectos críticos que se presentan en el suministro de GLP, así como a identificar las restricciones y soluciones alternativas, tomando como base la utilización de la SSDM en el estudio del problema del gas natural (Rodríguez et al., 2015). Todo ello ha contribuido a la identificación de los diversos factores y variables, tanto cualitativas como cuantitativas, que deben tomarse en cuenta en la compleja problemática de estos hidrocarburos.

Vista la problemática general, con base en la dinámica de sistemas, en esta sección se explica inicialmente la metodología MDS y su forma de aplicación para estudiar diversos escenarios del abastecimiento del GLP. La Figura 6 muestra las

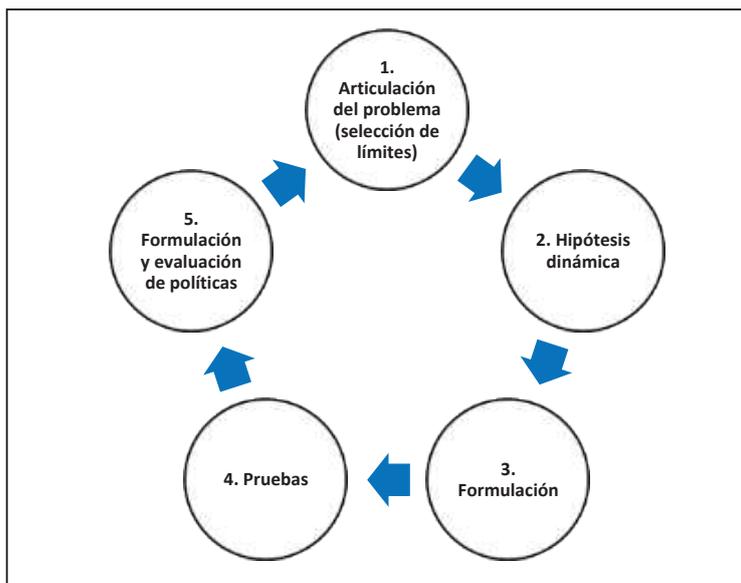


Figura 6. Metodología de dinámica de sistemas (MDS).

Fuente: Elaboración propia.

cinco (5) grandes etapas para construir un modelo dinámico de sistemas, las cuales configuran un proceso iterativo.

Etapas 1: Articulación del problema. Aquí se define el problema dinámico, es decir, se define la variable de interés, cuyo comportamiento dinámico se analiza a lo largo del tiempo. Una mirada dinámica ayuda a reconocer por qué es necesario investigar la variable de interés y permite responder por qué dicha variable es un problema desde la perspectiva de al menos un cliente. El comportamiento de la variable problema se deduce de la información estadística, considerando un período de tiempo significativo, que permita entender los posibles patrones de comportamiento de la variable investigada. En esta investigación, la variable de interés es el «procesamiento de LGN» dado que, a partir de este, se obtendrá la producción de GLP y, por lo tanto, se asegurará su suministro.

Etapas 2: Hipótesis dinámica. En esta etapa se formulan las diversas hipótesis que permiten explicar, en términos de bucles de relaciones causales, los patrones de comportamiento que podría tener la variable por investigar al interactuar con otras variables, a fin de entender la lógica causal de su comportamiento a lo largo del tiempo. Cabe resaltar que la formulación de las diversas hipótesis se da durante el proceso de simulación cada vez que se corre el modelo dinámico propuesto, seleccionando distintos escenarios que dan lugar a las respectivas hipótesis dinámicas.

Los resultados de cualquier etapa pueden generar información que conduzca a revisiones en cualquier etapa anterior.

Cada hipótesis dinámica generada en cada simulación o corrida del modelo tiene una causalidad distinta y se elegirá aquella que mejor explique el comportamiento dinámico del problema definido en la Etapa 1.

Etapas 3: Formulación. Elegido el diagrama causal que explica la dinámica del problema, se realiza la formulación y se elabora el diagrama de Forrester, lo que significa convertir el diagrama causal en diagramas de flujos y *stocks*. Los diagramas son entendidos por la computadora para modelar, a lo largo del tiempo, las variables y sus relaciones causales. Asimismo, se introducirán los datos respectivos de cada variable a fin de correr el modelo.

Etapas 4: Pruebas. Con los diagramas de Forrester, es posible modelar, por medio de un *software ad-hoc* y los datos necesarios, el comportamiento

problemático de la variable analizada. Sobre esa base, es posible realizar diversos análisis de sensibilidad del modelo para entender el alcance de su comportamiento.

Etapas 5: Formulación y evaluación de políticas. Conocido el espectro de comportamientos que puede tener la variable problema analizada, en esta etapa se ensayan diversos cambios en la estructura del modelo, que sean viables de implantar en el mundo real y que permitan cambiar el curso de acción de la variable en estudio, a fin de lograr un comportamiento compatible con las expectativas de al menos un cliente.

Estos cambios estructurales constituyen, en realidad, la formulación de posibles políticas que pueden ser implantadas para mejorar la situación encontrada. Estas políticas son posteriormente evaluadas para determinar cuál de ellas es la más viable de ser implantada en la situación, a fin de lograr mejoras en el desempeño futuro de la variable. Una vez evaluado el abanico de posibles políticas a implantar, se selecciona la más viable y se implementa, de este modo culmina el empleo de la MDS.

RESULTADOS

El complejo problema de asegurar el abastecimiento de GLP a nivel nacional requiere recurrir a diferentes técnicas y metodologías de análisis que permitan o ayuden a solucionarlo. La aplicación de la dinámica de sistemas a este problema permite realizar el análisis al generar cambios en las variables a partir de condiciones iniciales, desarrollando un análisis de sensibilidad a estos cambios.

La aplicación de la MDS para el análisis de la problemática de abastecimiento de GLP se apoya en la elaboración del diagrama de causa-efecto, mostrado en la Figura 7, que toma en cuenta los elementos o factores clave del sistema, así como las relaciones entre estos; es decir, se han identificado y generado hipótesis respecto a las posibles relaciones causales entre ellos, que representan la clase de influencia que un elemento ejerce sobre otro. Así, un signo positivo significa que un cambio en un elemento producirá un cambio en el mismo sentido y un signo negativo indica que el efecto será inverso. Como se observa en la Figura 7, por ejemplo, una relación positiva se observa cuando se incrementa la separación de gas natural húmedo (GNH), pues produce un aumento en el transporte de GNS, o cuando disminuye la separación de GNH, pues produce un descenso en el transporte de GNS. Por otro lado, existe una relación negativa cuando aumenta el oleaje anómalo, pues conlleva a un menor transporte marítimo de GLP, o

un menor oleaje anómalo, pues permite un mayor abastecimiento de GLP por transporte marítimo.

Así, a partir del diagrama causal, se generó el modelo dinámico mostrado en la Figura 8, que consideró el hecho de que existe una mayor relación entre la producción de GLP y la cadena de valor del gas natural, dado el bajo porcentaje de GLP que se produce a partir de la refinación del petróleo (Adaniya, 2019).

De lo anterior, se desprende que la aplicación de la MDS para el estudio del abastecimiento de GLP en el Perú plantea una interrogante importante con la que se intenta dar respuesta o solución al problema científico, esta se relaciona con la pregunta sobre cuál es la estructura dinámica que explica el comportamiento anómalo real del abastecimiento de GLP. Por tanto, este artículo pretende demostrar que un modelo diseñado aplicando los conceptos de la dinámica de sistemas permite predecir un comportamiento de largo plazo a fin de asegurar la sostenibilidad del suministro de GLP a nivel nacional. El modelo dinámico genera escenarios y pronósticos que apoyan la toma de decisiones sobre alternativas que garanticen el abastecimiento de este combustible. Cabe resaltar que este análisis difiere de la perspectiva científica de demostración de hechos ya que, en este caso, se están simulando situaciones, lo que lo hace diferente.

Con la dinámica de sistemas se toma en cuenta, dentro de un periodo de tiempo de simulación

determinado, las tasas que conectan una etapa de la cadena de valor con la siguiente, además de factores aleatorios que las afectan, como los riesgos que pueden materializarse durante el transporte del gas natural (rotura del gasoducto) o el cierre de puertos que impide la carga o descarga de las embarcaciones, que afecta el almacenamiento, transporte y distribución del GLP. La dinámica de cambios en las diversas fases de la cadena de valor del GLP posibilita un análisis de sensibilidad, mediante cambios en el valor de una variable en particular, para evaluar los escenarios que se generarían como consecuencia de dichos cambios. En la investigación, se eligió el mes como unidad de tiempo y se proyectó la simulación para un horizonte de 10 años (120 meses).

Para realizar este modelamiento, se utilizó data histórica del periodo 2000-2016, con cifras uniformes tanto en reservas y producción de gas natural como en GNH almacenado, GNS transportado, mercado nacional, GNL producido, GNL almacenado, GNL exportado, LGN transportado, GLP producido en Pisco, GLP transportado por tierra al sur, abastecimiento de GLP al sur, GLP transportado por mar y abastecimiento de GLP hacia el centro (Adaniya, 2020). Se eligió como unidad el barril, por su uso común en la industria de los hidrocarburos. Asimismo, se utiliza tasas con unidades de barriles/mes y parámetros adimensionales, según sea el caso. No se considera las inversiones en exploración. Los aspectos financieros de la cadena de valor se dejan para investigaciones posteriores.

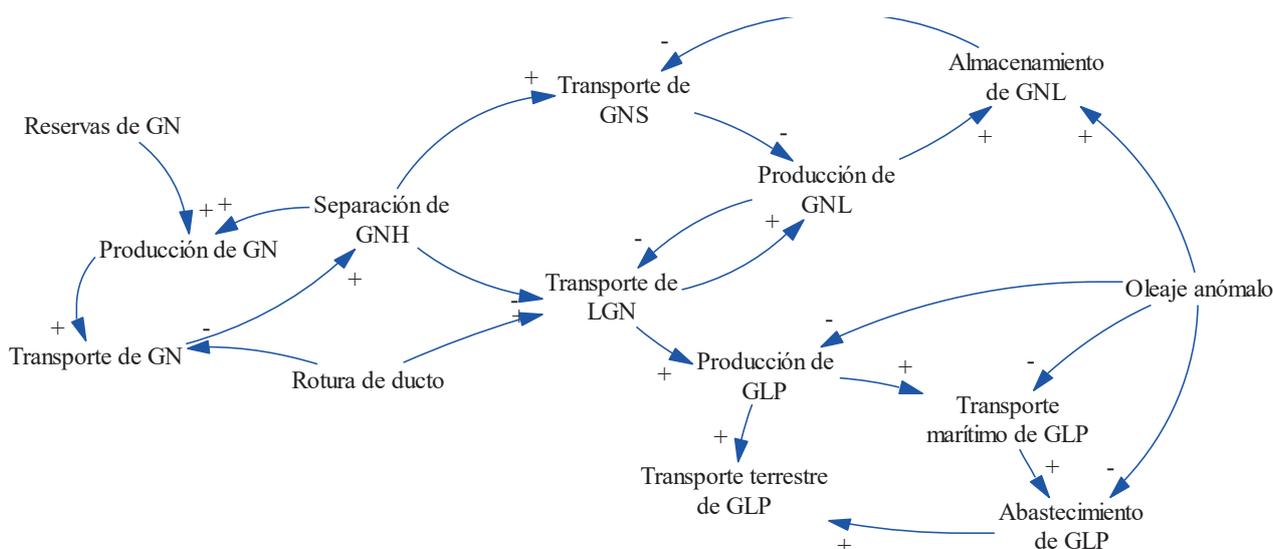


Figura 7. Relaciones de tipo causa-efecto entre los factores que pueden producir desabastecimiento de GLP.

Fuente: Elaboración propia.

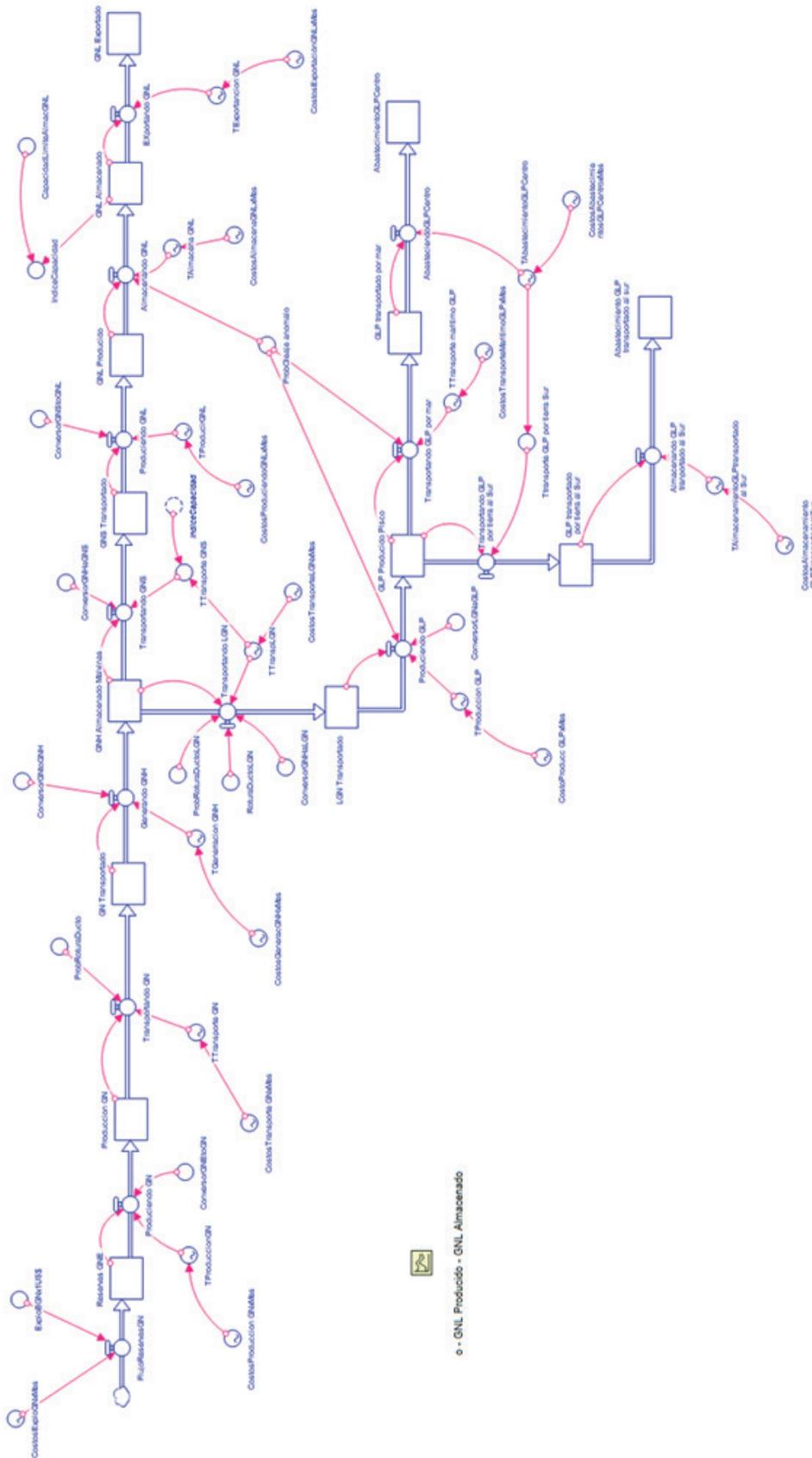


Figura 8. Modelo de simulación de la producción de GLP.

Fuente: Gráfico tomado de Adaniya (2020, p. 183).

DISCUSIÓN

La Figura 8 muestra la aplicación de un modelo sistémico para la producción de GLP. Con cada corrida de simulación, se puede obtener la descripción del comportamiento de cada variable analizada en el tiempo. Es decir, cada variable del modelo, expresada en términos de un valor, una tasa o de un parámetro adimensional, forma parte de un algoritmo que, sometido a variaciones a discreción, genera nuevos escenarios que, al ser objeto análisis, deben ser interpretados. Por lo tanto, cada corrida de simulación constituye un experimento realizado con base en un modelo dinámico que representa a los factores, sus interrelaciones y los cambios producidos en el espacio y el tiempo que permiten evaluar cómo las relaciones de los factores dentro de un sistema pueden explicar tanto su comportamiento como su estructura.

En esa medida, la Figura 9 muestra el comportamiento de tres de las variables de estado simuladas en la investigación de Adaniya (2020). La variable GNH almacenado Malvinas corresponde al gas natural extraído de los pozos para luego ser procesado y separado en la planta Malvinas, de la que

salen tres corrientes: una de GNS para distribución en Lima, la corriente de GNS no demandado que se reinyecta al pozo y la corriente de LGN que se transporta hacia la planta de fraccionamiento de Pisco para la producción de GLP. La Figura 9 muestra que el procesamiento de GNH almacenado Malvinas (curva 1) produce LGN transportado (curva 2) y, en consecuencia, se genera GLP producido Pisco (curva 3).

Tomando el año 2019 como punto de partida de la simulación, la variable GNH almacenado Malvinas muestra una curva de trayectoria descendente que indica que, de no actuar sobre la producción de gas natural, la de LGN y, por lo tanto, la de GLP disminuirán en un periodo de aproximadamente 20 meses, dentro de un intervalo de análisis de 30 meses. Un cambio de escenario hará variar el modelo con lo que se pueden obtener nuevas consideraciones para la toma de decisiones; asimismo, es posible cambiar las fórmulas empleadas para obtener mayor precisión o detalles.

Otro ejercicio, tomando nuevamente el año 2019 como punto de partida de la simulación, muestra el comportamiento de cuatro variables según se

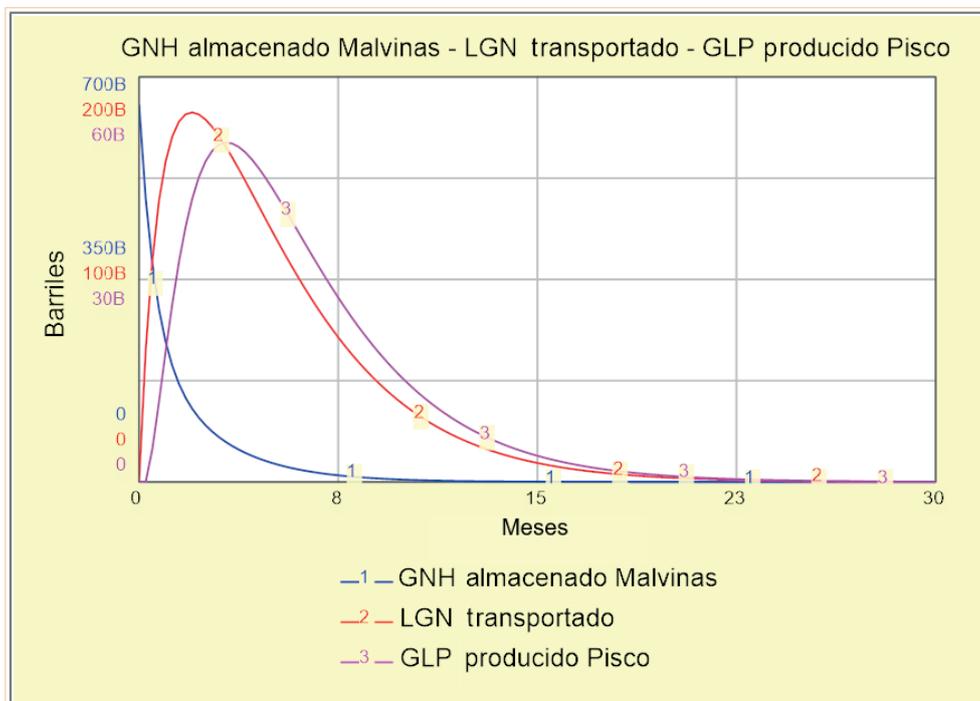


Figura 9. Gráfico que muestra la variación temporal de las variables GNH almacenado Malvinas - LGN transportado - GLP producido Pisco. Simulación usando el software Stella Architec, versión 1.4.

Fuente: Tomado de Adaniya (2019, p. 163).

observa en la Figura 10; en esta ocasión, se muestra la variación de los volúmenes transportados de gas natural seco (GNS), gas natural licuefactado (GNL) producido, almacenado y exportado en un intervalo de 120 meses. De acuerdo a este escenario, aun cuando en el mes 105 disminuye el volumen de gas natural seco transportado, en virtud de la capacidad que tiene la planta de licuefacción de Perú LNG de producir y almacenar gas natural licuefactado, la exportación de este producto siguió incrementándose hasta el mes 120. El lector interesado puede variar los datos y fórmulas de la Tabla 37 de Adaniya (véase Adaniya, 2020, p. 184) para generar nuevas hipótesis y, utilizando el modelo, puede analizar nuevos escenarios diferentes colocando, incluso, un horizonte temporal distinto al analizado en este estudio.

Entonces, como sostienen Ramoni y Orlandoni (2022)

Los modelos son estructuras teóricas simplificadas de la realidad que permiten entender el funcionamiento de los sistemas que representan, así como manipular, simular y optimizar las variables de interés con el fin de explicar su estructura interna y su comportamiento dinámico. (p. 129)

En ese sentido, este modelado permite comprender y explicar de alguna manera el comportamiento de una variable relacionada con el GLP, en cualquier etapa de su cadena de valor, dentro de un proceso de simulación, lo cual puede ayudar a comprobar hipótesis relevantes a través de diferentes corridas que respondan a escenarios específicos.

CONCLUSIONES

La aplicación de la dinámica de sistemas que, inicialmente se originó para aplicaciones industriales, se ha extendido hoy en día a sistemas urbanos y sus campos de aplicación son muy variados como los sistemas sociológicos, ecológicos, medioambientales, energéticos, de defensa, logísticos, entre otros; de tal forma que, debido a su gran difusión, «constituye una de las herramientas sistémicas más sólidamente desarrolladas y que mayor grado de aceptación e implantación han alcanzado» (Campos et al., 2005, p.10).

La ejecución de simulaciones y el análisis de diversos escenarios generados utilizando sistemas dinámicos permite identificar acciones para una adecuada toma de decisiones que asegure el suministro de GLP. Estas acciones deben coadyuvar al

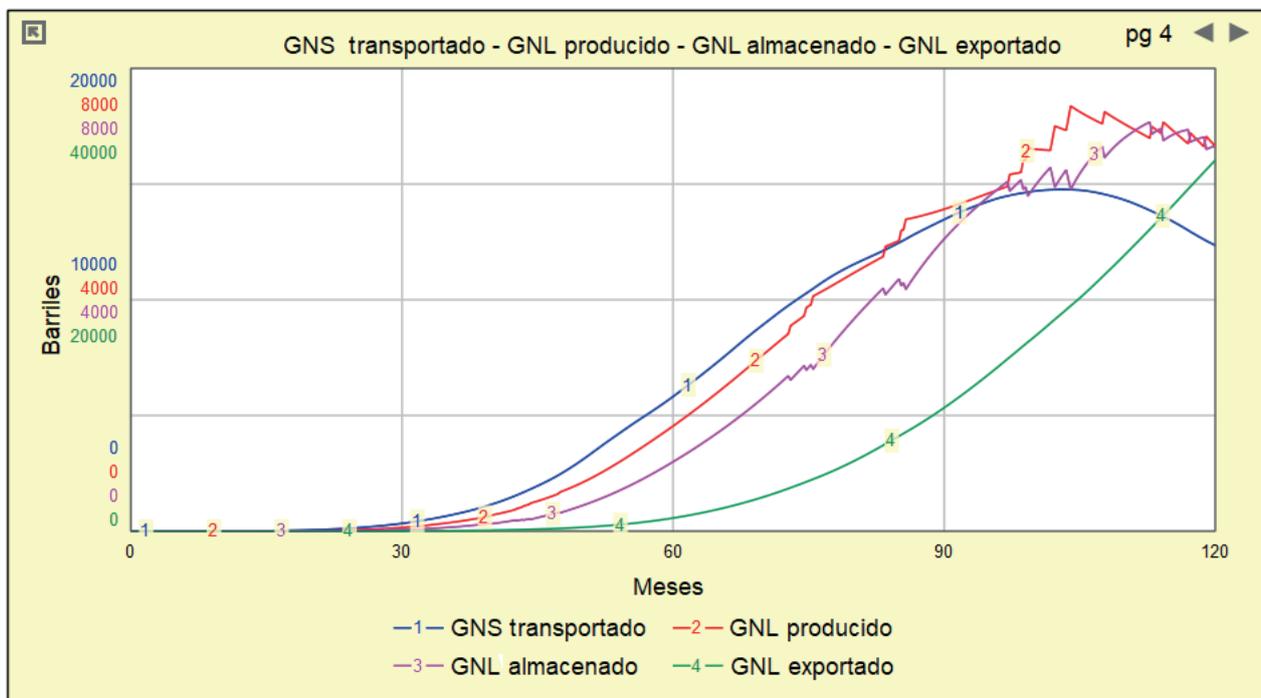


Figura 10. Gráfico que muestra la variación temporal de las variables GNH almacenado Malvinas - LGN transportado - GLP producido Pisco. Simulación usando el software Stella Architec, versión 1.4.

Fuente: Tomado de Adaniya (2020, p. 185).

establecimiento de lineamientos de política energética sobre la seguridad de abastecimiento de este combustible, promoviendo la inversión en exploración para el descubrimiento de nuevos yacimientos que incrementen las reservas probadas de gas natural; esto producirá un efecto dominó que propiciará un aumento en la producción de gas natural, así como de LGN y, por ende, de GLP.

La cantidad de relaciones existentes entre los sucesos y los riesgos que podrían presentarse e interactúan sobre la situación problemática abordada genera una dinámica compleja que requiere de mayor análisis, que incluya, además, las inversiones en cada una de las etapas o en las etapas críticas. Asimismo, debe considerarse una evaluación prospectiva y de posibles sustitutos para este combustible, principalmente en la masificación del gas natural para uso doméstico, comercial e industrial y la promoción del uso de fuentes de energías renovables, por cuestiones medioambientales.

El modelo obtenido constituye una línea base para estudios posteriores que deberían considerar ampliar la investigación mediante cambios en las fórmulas utilizadas en el algoritmo para describir el comportamiento de las variables de estado. Esto permitirá realizar un análisis de sensibilidad y contar con una serie de modelos que puedan ser comparados con el comportamiento real del mercado de GLP para, finalmente, elegir aquel modelo que mejor coadyuve a la generación de lineamientos de políticas dentro del marco de un planeamiento estratégico energético de largo plazo con enfoque en la eficiencia y la transición energética.

La aplicación del modelo de simulación por parte de los diferentes grupos de interés requiere una actualización constante de los parámetros y valores fijados en el modelo de acuerdo a la coyuntura y parámetros operativos, los cuales varían en el tiempo según las decisiones de los operadores de las plantas e instalaciones involucradas en el sistema, así como las decisiones políticas y cambios en la geopolítica internacional. Esto implica un monitoreo periódico de las variables operativas por parte de las personas interesadas.

Es de interés considerar la continuación de las simulaciones, calibrando el modelo mediante la identificación de nuevas relaciones entre sus variables estructurales o su variación frente a nuevos escenarios como resultado de cambios en la formulación de las hipótesis dinámicas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al ingeniero Ricardo Rodríguez, cuya tutoría me encaminó al aprendizaje de la metodología de la dinámica de los sistemas blandos aplicada al suministro de gas natural y GLP.

REFERENCIAS

- [1] Adaniya, B. J. (2019). *Abastecimiento de gas licuado de petróleo (GLP). Análisis causal de los factores que lo impactan mediante análisis multivariable*. (Tesis doctoral). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.
- [2] Adaniya, B. J. (2020). *Estudio causal de los factores que afectan el abastecimiento de Gas Licuado de Petróleo (GLP) en el mercado peruano mediante ecuaciones estructurales*. (Tesis doctoral). Universidad Internacional Iberoamericana, Campeche.
- [3] Aguirre, L. A., Galdo, M. F., Medina, K. S., y Ychikawa, C. K. S. (2015) *Seguridad en el Abastecimiento de Gas Licuado de Petróleo en el Perú*. (Tesis de Maestría). Universidad Esan, Lima.
- [4] Aracil, J. (1995). *Publicaciones de Ingeniería de Sistemas: Dinámica de sistemas*. Madrid, España: Isdefe.
- [5] Aracil, J. y Gordillo, F. (1997). *Dinámica de Sistemas*. Madrid, España: Alianza Editorial.
- [6] Aslani, A., Helo, P., y Naaranoja, M. (2014). Role of renewable energy policies in energy dependency in Finland: System dynamics approach. *Applied Energy*, 113, 758-765. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.015>
- [7] Boloña, C. A. (1973). Donella H. Meadows, Denis L. Meadows, Jorgen Randers y William W. Behrens III, 1972, *The Limits to Growth*. New York, Potomac Associates Book - Universe Books. *Apuntes*, 1, 106-107. <https://doi.org/https://doi.org/10.21678/apuntes.1.8>
- [8] Campos, J. de M., Dormido, S., y Morilla, F. (2005). *Fundamentos de la dinámica de sistemas y Modelos de dinámica de sistemas en epidemiología*. http://www.proyectosame.com/ds_documentos/manual_dinamica_sistemas.pdf
- [9] Chyong, K., Nuttall, W. J., y Reiner, D. M. (2009). Dynamics of the UK natural gas industry: System dynamics modelling and long-term energy policy analysis. *Technological*

- Forecasting and Social Change*, 76(3), 339-357. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2008.06.002>
- [10] Cuervo, M. C., Bustos, H. A. V., y Aldana, A. C. A. (2013). *Simulation based on system dynamics for evaluating the quality of transport service in a complex social system*. *DYNA*, 80(180), 33-40.
- [11] Forrester, J. W. (2016). Learning through System Dynamics as Preparation for the 21st Century. *System Dynamics Review*, 32, 187-203. <https://doi.org/10.1002/sdr.1571>
- [12] Ibarra, D. W., y Redondo, J. (2015). Dinámica de Sistemas, una herramienta para la Educación Ambiental en Ingeniería. *Luna Azul*, 41, 152-164.
- [13] Lane, D. C., y Sterman, J. D. (2011). Jay Wright Forrester. En A. A. Assad y S. I. Gass (Eds.), *Profiles in Operations Research: Pioneers and Innovator* (pp. 363-386). <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6281-2>
- [14] Martínez, A. Y., y Ríos, F. R. (2007). Estudio de sistemas blandos para el desarrollo de un sistema de información gerencial, mediante una adaptación de la metodología para sistemas blandos de Peter Checkland. *Ciencia Ergo Sum*, 15(1), 45-53. <https://www.redalyc.org/pdf/104/10415105.pdf>
- [15] Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J y Berens III, W. W. (1972). *Limits to growth*. New York, NY, EE. UU.: Universe Books
- [16] Murillo, S. L., Badillo, I., y Peón, I. E. (2019). Metodología de Sistemas Suaves para el estudio transdisciplinario de Sistemas de Comunicación. *Acta Universitaria*, 29, 1-21. <https://doi.org/10.15174/au.2019.1903>
- [17] Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería. (2010). *Producción del GLP*. <http://www.osinerg.gob.pe/newweb/pages/GFH/1432.htm>
- [18] Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (2017). *La Industria de los Hidrocarburos Líquidos en el Perú*. Lima, Perú: Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería.
- [19] Ramoni, J. y Orlandoni, G. (2022). Dinámica de sistemas y crecimiento económico. *Revista de Economía Institucional*, 24(46), 115-132. <https://doi.org/10.18601/01245996.v24n46.07>
- [20] Rodríguez, R., Martínez, S., Dyner, I., Pardo, J., Huaytán, V., Cárdenas, W., Navarro, J., y Gonzáles, A. (2015). *Gestión Estratégica Dinámica de Gas Natural a Largo Plazo mediante la Soft System Dynamics Methodology (SSDM): El Caso Peruano*. XIII Congreso Latinoamericano y Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas, Cartagena de Indias, Colombia
- [21] Rodriguez, R. y Paucar, A. (2005). Soft System Dynamics Methodology (SSDM): Combining Soft Systems Methodology (SSM) and System Dynamics (SD). *Systemic Practice and Action Research*, 18(3), 303-334. <https://doi.org/10.1007/s11213-005-4816-7>
- [22] Salt, J., Cuenca, A., Casanova, V., y Correcher, A. (2016). *Control Automático. Tiempo Continuo y Tiempo Discreto*. Barcelona, España: Editorial Reverté.