

El arte de validar modelos de simulación: Lineamientos para el análisis estadístico en el mercado de combustibles

José Antonio Taquíá Gutiérrez

Ingeniería Industrial n.º 26, 2008, ISSN 1025-9929, pp. 45-68

Resumen: La posibilidad de representar la realidad con un modelo de simulación y analizar los resultados que dicho modelo genera, no deja de tener cierto detalle que nos acerca al concepto de 'arte'. Si mencionamos que etimológicamente la palabra tecnología se origina de los términos griegos 'logos' (tratado) y 'tecnos' (arte), no sorprende identificar que todo esfuerzo relacionado con representar la realidad es en esencia un esfuerzo artístico. El presente artículo describe los lineamientos estadísticos que tienen las etapas de control de un modelo de simulación complejo aplicado al mercado de comercialización de gas natural vehicular en Lima metropolitana.

Palabras clave: gas natural vehicular, modelos de simulación, sistemas de estado estable, sistemas terminantes, cadenas de suministro

The art of validating models: Guidelines for statistical analysis in the fuel market

Abstract: The ability to recreate reality with a simulation model and analyze the results generated by that model has been refined to a point that it can almost be called 'art'. The term 'technology' itself originates from the Greek 'tecnos' (art) and 'logos' (studies); therefore, it is not difficult to understand that any effort related to the portrayal of reality is, in essence, an artistic effort. This article explores the validation steps in a complex simulation model applied to the natural gas oil market in Lima (Peru).

Keywords: Gas oil market, simulation models, steady state systems, terminating systems, supply chain models.

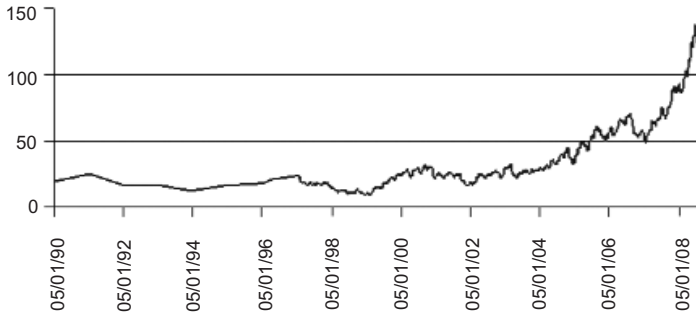
1. DESCRIPCIÓN DEL MERCADO DE COMBUSTIBLES EN LIMA

Desde el año 2001, se está realizando de manera sostenida el cambio de matriz energética en nuestro país, a partir de la producción de GLP (gas licuado de petróleo), un combustible que se obtiene del procesamiento de los líquidos extraídos del gas natural o de la refinación del petróleo crudo en las refinерías, y del incremento en el consumo de gas natural, un hidrocarburo gaseoso compuesto predominantemente por metano (CH_4) con un pequeño porcentaje de etano (C_2H_6). Es interesante observar el comportamiento del mercado local de comercialización de combustibles en un contexto muy particular. La inestabilidad en el precio del barril del petróleo en el mundo tiene entre sus causas el hecho de ser un factor asociado a la volatilidad de la inflación en países cuyas monedas no son tan fuertes y, como consecuencia, susceptibles de devaluarse como resultado de la presión que genera la exorbitante especulación en los mercados financieros mundiales con este *commodity* que en el mes de mayo del 2008 ocasionó que el precio del barril de crudo llegue a superar los 137 dólares/barril, (véase gráfico 1) sumado a la falta de alternativas energéticas que atiendan la gran demanda mundial, entre las que destacan zonas geográficas como Asia y Europa Oriental, ha ocasionado incertidumbre y mucha discusión sobre los impactos negativos en la calidad de gasto que las políticas de gobierno generan en su afán de evitar que estos incrementos se trasladen a los consumidores. Actualmente el gobierno ha decretado eliminar la compensación que venía otorgando a gasolinas de alto octanaje y se estudian mecanismos de reducción de impuestos en otros productos derivados.

Tomando distancia del plano político sobre el debate local, relacionado con la vigencia y la validez de los fondos de compensación, la realidad muestra que el mercado ha percibido las ventajas económicas de utilizar gas en sus medios de transporte. La producción de gas natural vehicular, su almacenamiento y su distribución han generado una cadena de abastecimiento que, en muchos casos, no cubre ni parcialmente la demanda de los potenciales usuarios que se pronostica que tendrá Lima metropolitana en los próximos 20 años.¹

¹ Reyes Pérez Espejo, Raúl y Arturo Vásquez. *La organización económica de la industria de hidrocarburos en el Perú. La comercialización del GLP envasado*. Documento de trabajo 21, 2006.

Gráfico 1
Precio del barril de petróleo (US\$)



Fuente: Agencia de Información sobre Energía de los Estados Unidos.

2. EL MODELO DE SIMULACIÓN DE LA CADENA DE ABASTECIMIENTO

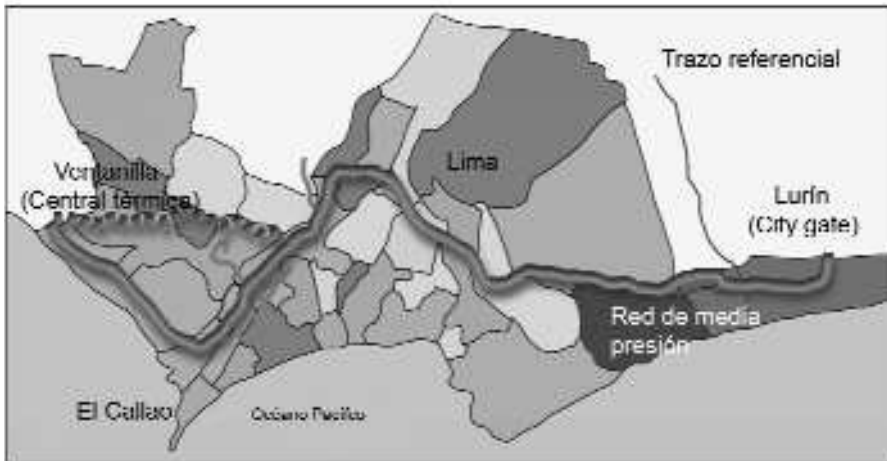
La demanda de combustibles y de gas natural vehicular tiene un comportamiento continuo (24 horas x 7 días/semana), “jalando” la distribución en los eslabones de refinación y abastecimiento de crudo obtenido en la selva peruana o traído por vía marítima de países como Venezuela y Ecuador, por mencionar los abastecedores más importantes;² en el caso de los combustibles de alto octanaje; y en el caso de gas natural se obtiene de los gasoductos que llegan a Lurín alimentados por el gas de Camisea.

Mencionar el gas proveniente de Camisea nos permite sostener que sigue siendo una gran oportunidad de abastecimiento interno, a pesar de que el mayor volumen de las reservas certificadas de gas ha sido comprometido para ser exportado al mercado mexicano. Actualmente se encuentran en exploración a lo largo del territorio peruano nuevas reservas de gas, porque el incremento en el precio de petróleo ha convertido a este recurso en un factor energético asociado directamente

2 Vásquez Cordano, Arturo. *La organización económica de la industria de hidrocarburos en el Perú*. Documento de trabajo 8, 2005.

con la competitividad de cualquier país. Es interesante mencionar que la planta de licuefacción en proceso de construcción en Pisco, que exportará el gas de Camisea a México, entrará en operación a fines del 2010. En este contexto, un reto importante será la implementación de una red física de distribución que haga rentable la operación de distribución de gas natural vehicular considerando el importante crecimiento de la demanda.

Mapa de localización de la red troncal primaria de distribución del gas natural en Lima y Callao



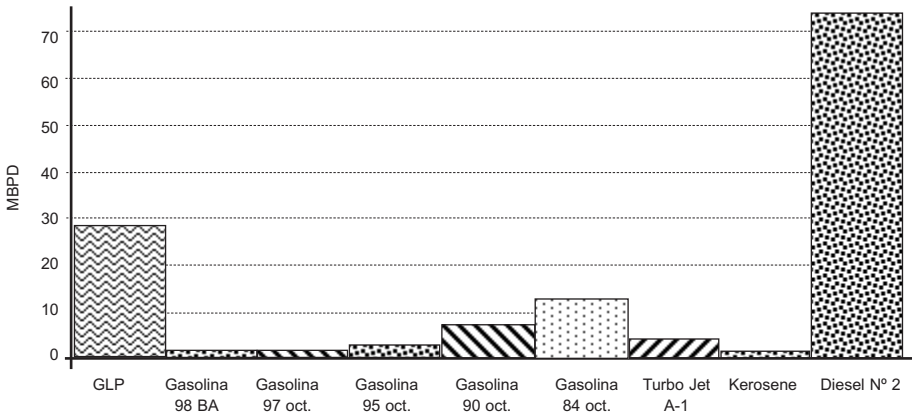
Elaboración: Gas Natural de Lima y Callao (GNLC).

En este escenario de incremento de demanda de consumidores de gas licuado de petróleo y de gas natural vehicular encontramos una estructura actual de distribución de hidrocarburos diseñada para el trabajo con combustibles líquidos derivados de alto octanaje y con una antigüedad promedio de 30 años. Esta estructura será la base de una red de distribución en constante expansión que requerirá una adecua-

da estrategia de suministro debido a que el bajo precio del litro de gas debe mantener los costos de distribución en niveles menores al 5% del precio de venta.³

Durante los tres últimos años, más de 40.000 vehículos convirtieron su sistema de consumo a gas natural vehicular (véase tabla 2). La proyección al año 2010 es de 150.000 autos convertidos, según referencia de la Cámara Peruana de Gas Vehicular. Esto ha ocasionado que la cantidad de gasocentros se incremente de 4 a fines del año 2006, a 38 gasocentros a mediados del año 2008.⁴

Gráfico 2
Venta nacional de combustibles
(MBDP: miles de barriles de productos derivados)
(Julio 2008)



Fuente: Ministerio de Energía y Minas. Dirección de Hidrocarburos.

³ Simchi Levi, David. *Designing and managing the supply chain*, 2008, p. 382.
⁴ Cámara Peruana de Gas Natural Vehicular. [En línea]. <www.cpgnv.org.pe> [Consulta: 8 de setiembre del 2008].

Tomando como referencia la información oficial del Ministerio de Energía y Minas,⁵ en Lima Metropolitana en lo que va del año 2008 la distribución promedio mensual de gas natural vehicular automotor en gasocentros alcanzó un volumen de 309.601 miles de pies cúbicos (mpc) al mes.⁶ El promedio mensual de gas natural distribuido se incrementó de 25.573 a 153.366 mpc entre los años 2006 y 2007 (véase tabla 1). Este sector se encuentra regulado, contando a la fecha en Lima metropolitana con 38 gasocentros, de los cuales solo el 10% pertenece a una cadena de distribución. En este mismo sector como referencia se tienen fiscalizados solo en Lima metropolitana 908 grifos, de los cuales el 43% se considera como parte de una cadena. El total de grifos que comercializan GLP en Lima son 105.⁷

Tabla 1
Volumen distribuido en gasocentros

Mes	Volumen de gas natural distribuido (mpc)	
	2006	2007
Enero	3.074	60.317
Febrero	3.231	75.886
Marzo	5.422	109.444
Abril	7.753	98.206
Mayo	11.868	125.561
Junio	15.270	115.823
Julio	21.051	129.864
Agosto	28.124	163.311
Setiembre	31.834	207.496
Octubre	41.745	234.767
Noviembre	50.213	251.828
Diciembre	63.295	291.887
Promedio mensual	23.573	155.366

Fuente: Gas Natural de Lima y Callao SRL (Cálidda).

5 Ministerio de Energía y Minas, Dirección de Hidrocarburos [en línea]. <www.minem.gob.pe> [Consulta: 30 de agosto del 2008].

6 *Ibidem.*

7 *Ibidem.*

Tabla 2
Cantidad de vehículos convertidos

Mes	Financiados	Convertidos	Financiados	Convertidos	Convertidos
	2006		2007		2008
Diciembre 2005	0	159			
Enero	1	269	4.730	6.180	25.277
Febrero	56	429	5.909	6.909	27.436
Marzo	166	595	5.952	7.823	29.630
Abril	263	688	6.763	9.031	32.419
Mayo	446	996	8.046	10.421	35.502
Junio	756	1.376	9.765	11.924	38.279
Julio	1.152	1.831	10.685	13.923	41.411
Agosto	1.595	2.437	12.202	15.976	44.724
Setiembre	2.196	3.194	13.002	17.906	
Octubre	2.703	3.778	15.012	19.823	
Noviembre	3.530	4.656	16.346	22.018	
Diciembre	4.146	5.489	17.846	23.958	

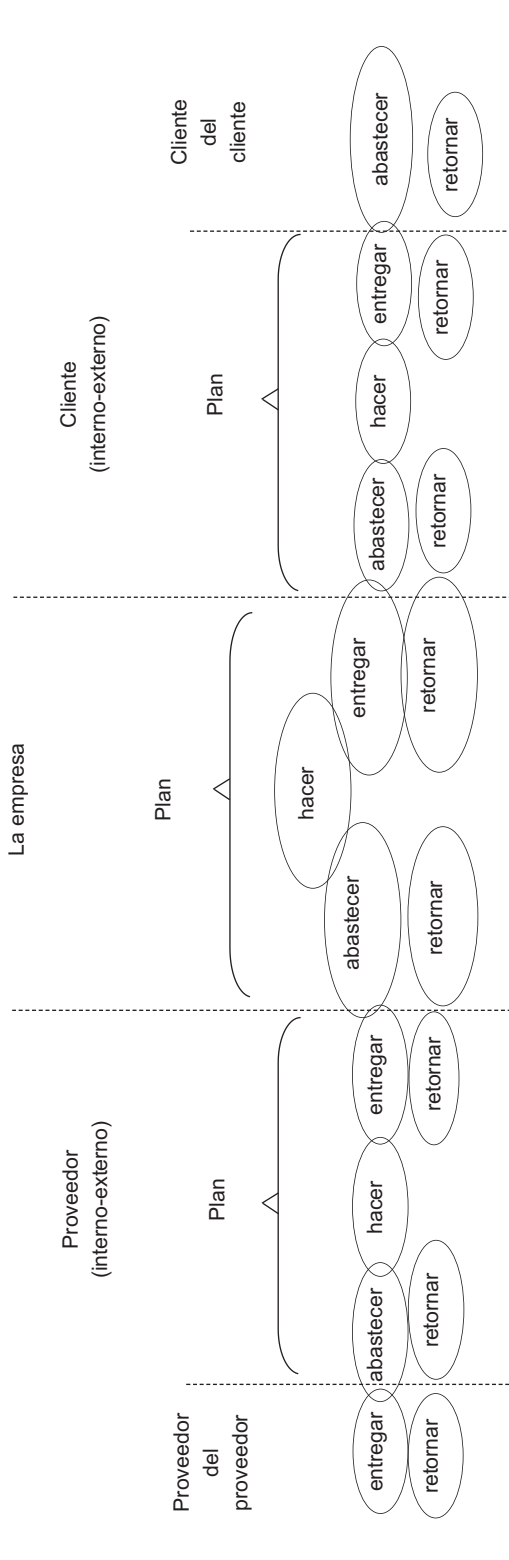
Fuente: Cámara Peruana de Gas Natural Vehicular.

La distribución de gas natural vehicular (GNV) puede ser vista bajo el enfoque del modelo SCOR (Supply Chain Council Reference model)⁸ para identificar los procesos de esta cadena de abastecimiento y establecer jerarquías de detalle, con el fin de analizar el intercambio de los tres elementos más relevantes que se distribuyen a lo largo de la cadena, como son los productos, el valor de intercambio y la información.⁹

8 Knolmayer, Gerhard. *Supply Chain Management based on SAP systems. Order management in manufacturing companies*, 2002, pp. 20-21.

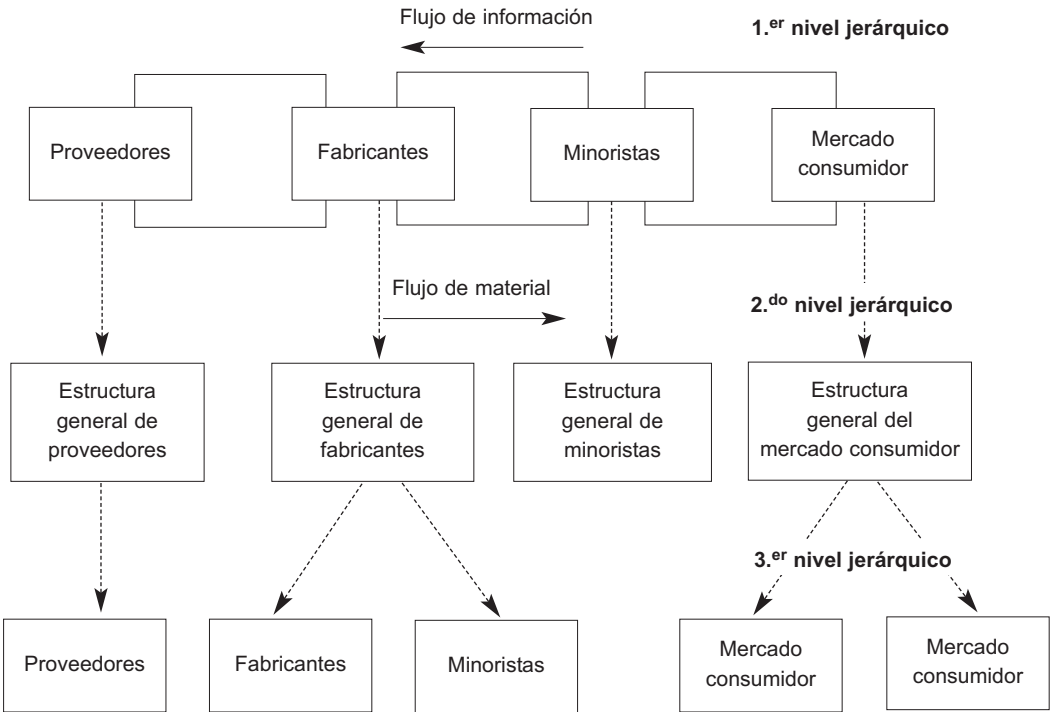
9 Vieira, Guilherme y Osmar César Júnior. "A conceptual model for the creation of supply chain simulation models". *Proceedings of Winter Simulation Conference*. Informes, 2005.

Gráfico 3
Interrelación entre los procesos de la cadena de abastecimiento



Fuente: Supply Chain Council. Modelo SCOR.
 Elaboración propia.

Figura 1
Niveles jerárquicos de modelamiento



Fuente: Vieira, 2005 (véase la nota 9).

En el caso del diseño de un modelo de distribución de gas natural vehicular, los consumidores finales son los conductores de vehículos que utilizan este combustible, el cual lo adquieren en los gasocentros (38 estaciones), los que a su vez se abastecen de la empresa Gas Natural de Lima y Callao SRL. Este proveedor se abastece de la extracción de gas operada por la empresa Transportadora de Gas del Perú, que traslada el combustible a través de un ducto de 731 kilómetros desde la planta Las Malvinas ubicada en el distrito de Camisea, en el departamento de Cusco.

Entre algunas características que se deben tomar en cuenta dentro de un diseño genérico de modelo de abastecimiento podemos mencionar las siguientes:

- La política de inventarios considera un sistema de revisión periódico donde la demanda del próximo periodo es consecuencia del pronóstico estimado. En un diseño inicial, para cada elemento o eslabón de la cadena se tratará de mantener el inventario final igual a la demanda actual. Asumiendo que la demanda acumulada del periodo es de tamaño “ q ” el eslabón de la cadena lanzará una orden de tamaño “ $2q$ ”, esto le permitirá al eslabón de la cadena cumplir con la demanda actual y mantener un nivel “ q ” como inventario para responder al próximo periodo de demanda que se espera sea del mismo tamaño. Lo interesante del modelo es que la política de inventario puede ser más sofisticada si consideramos que el nivel de inventario alcanza un mínimo especificado (un nivel de seguridad) al cambiar los niveles de servicio, lanzando una orden para adquirir insumos o componentes. El tamaño óptimo y los niveles de seguridad son definidos por el analista de la demanda.
- Dependiendo del mercado, cada distribuidor tiene patrones de demanda. La demanda puede seguir una distribución conocida o con mayor precisión puede seguir un calendario de arribos predefinidos por el analista de la demanda, estableciendo demandas agregadas o consolidadas del tipo *make to order*.
- Un proveedor recibe las órdenes de insumos o componentes de un fabricante, si puede atender inmediatamente el pedido lo entrega en un *lead time* respectivo. En un modelo detallado, debe respetarse una cantidad mínima (no siempre es rentable realizar una entrega de un tamaño muy pequeño). Si el proveedor no puede cumplir con el pedido el nivel de servicio se reduce.

La relación fabricante-distribuidores sigue la misma lógica. El fabricante puede consolidar órdenes para mejorar sus indicadores de operación. El diseño propuesto modela un sistema de abastecimiento del tipo *pull* considerando niveles de inventario mínimos.

Los indicadores más relevantes se asocian con atender la demanda considerando “niveles de servicio” y lograr un adecuado nivel de servicio con los tiempos de entrega y los respectivos niveles de inventario en cada eslabón de la cadena de abastecimiento.

El efecto del tipo *bullwhip*¹⁰ se puede identificar con esta estructura. Básicamente considera la variación de producción e inventarios en los diferentes eslabones de la cadena como consecuencia de la descoordinación entre sus eslabones por la falta de información (pequeñas variaciones en la demanda generan grandes incrementos de inventario y variaciones en los niveles de producción, en la medida en que la información se distorsiona a lo largo de la cadena).

3. MEDIDAS DE DESEMPEÑO DEL MODELO

Un modelo de abastecimiento considera una gran cantidad de indicadores en los niveles estratégicos, tácticos y operativos. Entre los niveles operativos podemos mencionar los siguientes:

- *El tiempo de ciclo (lead time) entre el grifo (gasocentro) y la planta de abastecimiento.*- Este indicador mide el tiempo en horas o días entre la orden compra del distribuidor y el envío del pedido del fabricante. Este indicador es interesante porque muestra la reducción de tiempos como consecuencia de la colaboración entre eslabones.
- *Variación de los niveles de inventario en grifos (gasocentros) y planta de abastecimiento.*- Este indicador muestra el efecto del nivel de servicio establecido y los errores de los pronósticos, porque estos factores influirán en el nivel de inventarios. Para el presente diseño se ha considerado la revisión continua de los inventarios y la variación en el tamaño de las órdenes de producción como consecuencia del efecto *bullwhip*.
- *Rendimiento de la cadena.*- El rendimiento se puede expresar en diversas dimensiones asociando el concepto a la restricción del recurso más escaso. Tomando en cuenta los costos por actividades se puede determinar la variación por unidad de tiempo del margen de contribución entre la transferencia de unidades que se realiza entre cada eslabón de la cadena.
- *El análisis estadístico de los resultados.*- En muchos estudios de simulación se invierte una gran cantidad de tiempo y recursos en el desarrollo del modelo pero poco en analizar la información resultante. Por decirlo de algún modo, una manera muy común de ope-

¹⁰ Sterman, John D. *Business dynamics. Systems thinking and modeling for a complex world*, 2000, pp. 150-60.

ración es realizar una única corrida de simulación de gran longitud o duración y tratar los resultados del modelo como si representaran las características reales de comportamiento. Hay que tomar en consideración que las distribuciones de probabilidad que conducen el modelo a lo largo del tiempo se generan como consecuencia de muestras numéricas generadas por números aleatorios que, dependiendo del método de generación puede ser más o menos confiable debido a la correlación que estas secuencias generan.¹¹

Como resultado de esta aleatoriedad, estos estimados pueden, en una corrida de simulación, diferir grandemente de las características de comportamiento del sistema real con la consecuente posibilidad de generar inferencias erróneas sobre el sistema en estudio.¹²

Al considerar un modelo de cadena de abastecimiento, un elemento muy importante es el pronóstico de la demanda. La validez de un modelo de generación de pronóstico hay que juzgarla por la capacidad de predecir los resultados de los cambios en las variables consideradas en el modelo. Según Sterman,¹³ la efectividad de un modelo dependerá primero de los límites del sistema que abarca; segundo, de la pertinencia de las variables seleccionadas y, por último, de los valores numéricos de los parámetros que se utilizan en el modelo.

El primer paso para realizar un adecuado análisis estadístico de los datos es identificar si el modelo que se está representando es de estado estable o de estado transitorio. Usualmente, mucha gente que modela considera que se debe realizar una corrida de gran longitud cuando se tiene enfrente un modelo del tipo estado estable. Esto puede ser cierto, pero si las condiciones iniciales y las de finalización de la simulación son parte esencial del modelo, es muy posible que estemos frente a un modelo de simulación terminante. La razón por la que normalmente se busca evitar los sistemas de tipo estado estable es que tienen características propias que requieren técnicas muy particulares para obtener resultados con validez estadística, a diferencia de aquellos modelos con características de estado terminante.¹⁴

11 Averill Law y David Kelton. *Simulation modeling and analysis*, 2000, pp. 420-428.

12 Law, Averill. "Statistical analysis of simulation output data: The practical state of the art". *Proceedings of Winter Simulation Conference*. Informes 2007.

13 Sterman, J. D. *Op. cit.*, p. 150.

14 Harrel, Charles y Biman Ghosh. *Simulation using promodel*, 2000, pp. 206-217.

Como se puede intuir de estos comentarios, la longitud de las corridas para simulaciones del tipo de estado estable deben ser bastante largas. Debido a esto existen más oportunidades de realizar seguimiento a las operaciones internas del modelo, lo que genera que las diferentes series de números aleatorios pueden ser utilizadas en distintas operaciones.

Esto no significa que un modelo de estado estable vaya a generar conclusiones equivocadas, sino que la longitud de la simulación puede influir en los resultados obtenidos por el modelo, en especial en aquellos modelos que tienen bastante variabilidad debido a su propio comportamiento. Lo que indica que puede amplificarse la necesidad de mayor análisis estadístico sobre los resultados del modelo, ya que la variabilidad no proviene solamente de las propias características del modelo sino también de causas propias del software utilizado y sus librerías de generadores de números aleatorios incorporados.¹⁵

Entre los métodos más utilizados, uno que es simple y efectivo es la estrategia de truncar las replicaciones para realizar el análisis estadístico. Otro método es el denominado *batching* o establecer lotes para una única corrida.

4. TIEMPO DE CALENTAMIENTO Y LONGITUD DE LA SIMULACIÓN

A diferencia de los modelos terminantes que empiezan con condiciones iniciales definidas y recursos desocupados, en los modelos de estado estable las condiciones iniciales no se consideran importantes y al correr el modelo se establece que este durará por un buen tiempo.

Ciertamente, en un modelo de estado estable también se tienen que inicializar y terminar, y considerando que la idea de la simulación es proponer diferentes situaciones, puede ser útil no conocer mucho con relación al comportamiento del modelo cuando se encuentra en estado estable o considerar qué tan extensa debe ser la longitud de la simulación para el buen resultado de las variables que miden el proceso. Es probable que se empiece estableciendo en una forma arbitraria, que

15 Kelton, David; Sadowski, Randall y David Sturrock. *Simulation with Arena*, 2004, pp. 312-320.

congestione de menos a más, lo que puede generar que los reportes iniciales de los cálculos de las variables pueden estar sesgados por debajo de los valores reales del sistema.¹⁶

Para remediar esto, se debe tratar de inicializar el sistema con condiciones que sean mejores que establecer que todos los recursos estén disponibles y el sistema se encuentre vacío. Esto equivale a colocar en el instante cero algún número de entidades en el modelo y empezar de esta manera. Si bien es factible hacer esto en cualquier modelo, en muchas ocasiones no es posible saber cuántas entidades se deben colocar próximas al instante cero; después de todo, esta es una de las preguntas que la simulación debe contestar.

Otra manera de tratar cualquier sesgo generado por las condiciones iniciales del problema es realizar longitudes de corrida muy grandes con la intención de que, sin importar ese error inicial, la cantidad de información obtenida reducirá la influencia de la información inicial en los resultados del modelo.

Si embargo, muchos modeladores establecen condiciones iniciales de sistema vacío y recursos disponibles con la intención de utilizar un tiempo de calentamiento del modelo (*warm up time*) hasta que se perciba que los efectos de las condiciones iniciales se hayan diluido con la gran cantidad de data obtenida, lo que significa que se pueden limpiar los acumuladores estadísticos (pero no el estado del sistema) y empezar a reunir información para realizar el análisis estadístico desde ese instante en adelante.¹⁷

La parte más complicada siempre es determinar la longitud de la simulación más adecuada. Una manera práctica puede ser realizar un ploteo de las variables más importantes y observar gráficamente en qué momento se estabilizan los valores.

5. REPLICACIONES TRUNCADAS

Si el modelador puede determinar cuál es el tiempo de calentamiento más adecuado y este periodo es relativamente corto para la longitud

¹⁶ Law, Averill. Op. cit., p. 9.

¹⁷ Sanchez, Susan. "Guidelines for designing simulation experiments". Proceedings of Winter Simulation Conference. Informes 2007.

de la simulación, lo más adecuado es realizar replicaciones independientes y distribuidas de manera idéntica. Esta idea aplica tanto en la comparación de escenarios como en sistemas únicos. Sin embargo, puede haber diferentes tiempos de calentamiento y longitud de corridas para diferentes alternativas; por ello, es más aconsejable tomar los valores más grandes.

Si se desea mayor precisión y obtener intervalos de confianza más pequeños, esto se puede lograr haciendo que el modelo genere más información. Sin embargo, hay que escoger entre hacer más replicaciones con la misma longitud de simulación o mantener el número de replicaciones y aumentar el tiempo de simulación de cada una. Probablemente, la idea inicial sea aumentar el número de replicaciones que equivale a aumentar el tamaño de la muestra estadística. En este caso, la precisión del intervalo de confianza no viene por incrementar el tamaño de la data sino por disminuir la variación en cada una de las replicaciones debido a que los promedios obtenidos se consiguen de una corrida de mayor longitud. Esto equivale a trabajar con mayor data resultante del estado estable del sistema.

Si el modelo permite identificar la longitud adecuada para la simulación y el tiempo de calentamiento para el modelo no es muy amplio, entonces la estrategia más adecuada es truncar las replicaciones.

6. EL MÉTODO DE *BATCHING* O LOTES EN UNA SOLA CORRIDA

Algunos modelos tienden a presentar un tiempo de calentamiento muy extenso hasta alcanzar un estado estable, y si tenemos varias replicaciones el método de truncar replicaciones puede ser ineficiente.¹⁸

En estas situaciones puede ser más adecuado realizar una sola corrida muy extensa e incluir una única vez la data del tiempo de calentamiento. La dificultad que aparece es que solo hay una replicación del desempeño de cada variable donde realizar el análisis, y no es claro cómo genera la estimación de la varianza entre los valores obtenidos. Esto es importante para realizar cualquier análisis relacionado con la inferencia estadística.

18 Kelton, David. Op. cit., p. 316.

Evaluar el comportamiento del sistema con un valor persistente en el tiempo puede ser peligroso, porque sería capaz de generar que las comparaciones se realicen entre valores correlacionados, lo que empeora el resultado estadístico.

Ante esta situación hay que generar algún tipo de “observación independiente” con la información de esta única corrida para presentar intervalos estadísticos más rigurosos.

Existen diversos métodos estadísticos para obtener análisis estadístico de una sola corrida. Uno inicial puede ser preparar observaciones no correlacionadas, dividiendo la única corrida en varios lotes que contengan diversos puntos, obtener el promedio de todos los puntos contenidos en cada lote y tratar cada promedio como una observación individual independiente con la cual realizar el análisis estadístico respectivo (empezando por determinar la varianza). Estas medias de los lotes aparecen como si fueran las medias de las diferentes replicaciones que se hacen para modelos terminantes truncados. La diferencia está en que hemos reemplazado las replicaciones por los lotes. Hay que tomar en cuenta que no existe ventaja en aumentar la cantidad de lotes e ir calculando las estadísticas para reducir el *half width* del intervalo de confianza, debido a que a mayor tamaño del lote habrá menor varianza, compensando el hecho de que sean pocos lotes.

Por otro lado, tener lotes que sean muy pequeños sin importar que haya muchos de este tipo es más riesgoso debido a que generan lotes con medias correlacionadas, lo que invalida el intervalo de confianza. El software Arena realiza una prueba final de independencia entre lotes grandes.¹⁹

Para la proyección de los resultados se debe tomar en consideración que los conceptos de valor ajustado y pronosticado son diferentes. El primero es el valor obtenido del modelo utilizando la información pasada; en contraste, los valores pronosticados son estimados futuros basándose en data pasada. Estos valores pronosticados se obtienen con coeficientes de data histórica.

Dicho de otro modo, los valores pasados de “y” fueron utilizados para obtener los valores ajustados de “y”, mientras que los valores pro-

19 Kelton, David. Op. cit., p. 425.

nosticados son estimaciones de los valores futuros de “y”, utilizando los coeficientes calculados con los valores ajustados.²⁰

Debido a que los valores pasados se utilizaron para obtener los coeficientes de los modelos, frecuentemente existen menos errores entre los valores actuales que entre los valores estimados.

Los grandes errores en los pronósticos ocurren porque se asume que el modelo es válido en el pasado y que por esa razón el modelo también puede ser válido en el futuro.

Cumplidos los pasos de análisis estadístico del modelo se procede a evaluar estadísticamente la comparación de escenarios con resultados aleatorios controlados. Cuando se modifica un modelo inicial con el fin de evaluar el comportamiento de las variables de desempeño estamos realizando una inferencia estadística y el tratamiento que se puede dar al experimento se puede mantener bajo las pruebas de medias y desviaciones estándar.

Entre las pruebas estadísticas más utilizadas al comparar dos escenarios están los intervalos de confianza, los intervalos de pruebas de “t pareadas” y, para el caso, con más de dos escenarios de comparación siempre se puede recurrir al análisis de varianza (Anova).²¹ El software Arena incorpora un módulo de análisis estadístico denominado Output Analyzer, que incorpora las pruebas estadísticas más utilizadas.

Mención aparte en un estudio de simulación merece la evaluación de reducir la cantidad de replicaciones como consecuencia de implementar métodos para reducir la variabilidad de la muestra, conocidos como VRT (Variance Reduction Techniques). La principal ventaja de estos métodos radica en que nos permite determinar la media de una función aleatoria con el nivel deseado de precisión del intervalo de confianza con menor cantidad de replicaciones independientes.

Uno de los métodos más difundido es el que considera secuencias de números aleatorios comunes. Este método contribuye a asegurar que las diferencias en el desempeño de dos modelos se deben al diseño

20 Delurgio, Stephen. *Forecasting principles and applications*, 1998, pp. 99-100.

21 Sanchez, Susan. Op. cit., p. 10.

de ambos escenarios (por ejemplo, diferencias en la política de colas) y no a diferencias cuyo origen son los diversos números aleatorios que utilizan ambos escenarios. El objetivo es evaluar cada escenario bajo las mismas características, para asegurar una comparación más justa de sus diferencias.

7. CARACTERÍSTICAS DEL CONTROL DEL DISEÑO ESTADÍSTICO DE UN MODELO QUE REPRESENTA UN SISTEMA REAL

El objetivo de la validación estadística es controlar el nivel de confianza al hacer inferencias acerca de una población sobre la base de la información contenida en la muestra. Existen dos dimensiones del diseño estadístico, la primera orientada al usuario y orientada al diseño estadístico del modelo. En la primera dimensión encontramos tres etapas consecutivas que nos ayudarán a controlar que el diseño tendrá una aplicación práctica. Estas etapas son: la revisión, la verificación y la validación. Estos tres “controles” se deben realizar con los usuarios directos del sistema por modelar. La revisión se refiere a evitar que no se estén excluyendo parámetros que determinen el comportamiento de las actividades más importantes del proceso. La verificación se relaciona con identificar que los resultados obtenidos del modelo son congruentes con los parámetros considerados en el diseño del modelo y la validación se realiza con el usuario del sistema, quien confirma o expresa sus comentarios sobre los resultados del modelo.

En la otra dimensión, orientada al diseño estadístico del modelo, dos factores son relevantes y están asociados con la cantidad de información en un análisis estadístico del modelo de simulación. El primero es el tamaño de la muestra: mientras más grande sea, mayor será la información que esperamos obtener acerca de la población. El segundo factor que afecta la cantidad de información es la magnitud de variación en los datos. Esta puede ser controlada mediante el diseño de la encuesta por muestreo, es decir el método por medio del cual se obtienen las observaciones.

El tipo más simple de diseño de encuesta por muestreo, el muestreo irrestricto aleatorio, no intenta reducir el efecto de la variación sobre el error de estimación. Una muestra irrestricta aleatoria de tamaño “n” ocurre si cada muestra de “n” elementos de la población tiene la

misma probabilidad de ser seleccionada.²² Las tablas de números aleatorios son útiles para determinar los elementos que serán incluidos en una muestra aleatoria simple.

Como no hay ningún estimador perfecto que dé siempre la respuesta correcta, debería hacerlo por lo menos en promedio. El valor esperado del estimador debería ser igual al parámetro que trata de estimar. En caso de que lo sea, se dice que el estimador es “insesgado”; en caso contrario, se diría que es sesgado. En la estimación de una media μ y un total τ , poblacionales, usamos la media muestral \bar{y} y el total $N\bar{y}$, respectivamente. Ambos estimadores son insesgados; esto es, $E(\bar{y}) = \mu$ y $E(N\bar{y}) = \tau$. La varianza estimada y el límite para el error de estimación están dados para ambos estimadores.²³

En el diseño de un modelo que represente la distribución del gas natural vehicular se desea estimar la cantidad promedio que se consume en un gasocentro. Las estaciones de servicio que comercializan gas natural vehicular tienen una atención permanente las 24 horas del día. Hemos considerado que este consumo debe estar positivamente correlacionado con el comportamiento de las variables en estudio. Por lo tanto, se utilizará un muestreo probabilístico proporcional al tamaño de consumo en gasocentros, siendo la probabilidad de seleccionar cualquier gasocentro para la muestra, proporcional al consumo promedio que comercializa. En Lima existen 38 estaciones que comercializan gas natural vehicular.

Hemos considerado que para la estimación de parámetros de la población de gasocentros que comercializan gas natural vehicular, son necesarios los conceptos de intervalo de confianza, variabilidad del parámetro, error y nivel de confianza. También se pueden tener en cuenta “variables críticas” del modelo que aparecen en forma particular al proceso en estudio, como puede ser cantidad de gasocentros que comercializan gas natural vehicular en ese mismo distrito.

22 Scheaffer, Richard; Mendenhall, William y Ott Lyman. *Elementos de muestreo*, 1987, p. 225.

23 *Ibidem*, p. 215.

- Un intervalo de confianza al 95% establece que si se toma una gran cantidad de muestras de tamaño “N”, y en cada una se construye un intervalo

$$P[\bar{X}_i - w \leq \mu_x \leq \bar{X}_i + w] \geq 1 - \alpha$$

se debe esperar que el 95% de los intervalos contenga a la media de la población. El intervalo de confianza se obtiene a partir de una estimación puntual de un parámetro y de una medida de dispersión de este multiplicada por un cierto factor, que en muchos casos es 1.96. (Z al 95%).

- Para estimar el número de replicaciones, recurrimos al procedimiento para calcular el tamaño de la muestra de un experimento.
- Para el parámetro en el modelo de cantidad en soles que un conductor promedio consume en el gasocentro (i), luego de un levantamiento inicial de datos (30 observaciones) se conoce:
 - Desviación estándar (sigma): 5 soles.
 - Error muestral (w), diferencia entre la media de la muestra y la media real de la población (3 soles).
 - Nivel de confianza: 95%.
- Error muestral de estimación o estándar ($X - \mu$). Es la diferencia entre un estadístico y su parámetro correspondiente. Es una medida de la variabilidad de las estimaciones de muestras repetidas en torno al valor de la población, nos da una noción clara de hasta dónde y con qué probabilidad una estimación basada en una muestra se aleja del valor que se hubiera obtenido por medio de un censo completo. Siempre se comete un error, pero la naturaleza de la investigación nos indicará hasta qué medida podemos cometerlo (los resultados se someten a error muestral e intervalos de confianza que varían muestra a muestra). Varía según se calcule al principio o al final. Un estadístico será más preciso en cuanto su error es más pequeño.

Para este caso, como se va a seleccionar un número determinado de conglomerados, siendo estos en total solamente 38 gasocentros, se debería utilizar la siguiente fórmula:

$$n = \frac{N z^2 \sigma^2}{(N-1) e^2 + z^2 \sigma^2}$$

Aplicando esta fórmula obtenemos un valor para $n = 8.5$.

La unidad muestral será el gasocentro donde se comercializa gas natural vehicular. Para el diseño de los datos de entrada se debe conocer el número de compras diarias en cada uno de los 38 gasocentros y obtener 9 números aleatorios comprendidos entre los intervalos acumulados.

Luego se calcula el consumo promedio por cada conglomerado “cantidad en soles de consumo de gas natural vehicular” para encontrar con un nivel de confianza del 95% que la media poblacional se encontrará dentro de un intervalo con desviación de 5 soles y un error estimado de 3 soles.

8. CONCLUSIONES

- El tipo de simulación del modelo de gas natural vehicular es del tipo continuo y en estado estable. La longitud de la simulación se estableció para el período de un año.
- El diseño del modelo de simulación describe la cadena de abastecimiento del gas natural vehicular generando indicadores que dentro de un modelo de referencia puede servir para diseñar la estrategia de operación de un competidor del mercado.
- Es importante considerar en el comportamiento de estado estable del modelo de simulación el tiempo de calentamiento, con el fin de disminuir la dispersión generada por los valores obtenidos como consecuencia de las condiciones iniciales en los valores obtenidos de los indicadores durante el tiempo en que el sistema se encuentra en estado estable.
- Es interesante mencionar la importancia en el rigor de la elección del método de pronóstico utilizado para generar la proyección de la demanda, en función de la cantidad de información histórica para cada modelo de simulación.

- El modelo se puede flexibilizar para extenderse a una cantidad mayor de unidades operativas, es decir modelar la cantidad de gaso-centros que comercializan cualquier tipo de combustible.
- El enfoque de procesos y la simulación se convierten en una herramienta de análisis de gran utilidad si se aplican orientadas a medir tiempos, costos y eficiencias.
- El modelamiento de cadenas de abastecimiento y distribución física puede trasladarse a los servicios y a nuevas expresiones de los canales de distribución como la comercialización multinivel y la distribución de intangibles, pudiendo complementarse con algoritmos heurísticos que optimicen soluciones por aproximación.

BIBLIOGRAFÍA

- Aracil, Javier y Francisco Gordillo. *Dinámica de sistemas*. Madrid: Alianza Editorial, 1997.
- Checkland, Peter. *Pensamiento de sistemas*. México: Noriega S.A. de C.V., 2003.
- Chopra, Sunil y Peter Meindl. *Supply Chain Management. Strategy, Planning and Operation*. Nueva Jersey: Pearson Education, 2004.
- David, Fred. *Conceptos de administración estratégica*. 9.^a edición. México: Pearson Educación S.A. de C.V., 2003.
- Delurgio, Stephen. *Forecasting principles and applications*. Boston: Irwin/McGraw-Hill, 1998.
- Friend, John y Allen Hickling. *Planning under pressure. The strategic choice approach*. Oxford: Heinemann, 2005.
- Forrester, Jay. *Industrial dynamics*. Massachusetts: MIT Press, 1961.
- Gaither, Norman. *Administración de operaciones*. México: International Thomson. 2000.
- Gallardo Ku, José; Cordano Vásquez, Arturo y Luis Bendezú Medina. “La problemática de los precios de los combustibles”. Documento de trabajo 11. Lima: Osinerg, Oficina de Estudios Económicos, 2005.
- Harrel, Charles y Biman Ghosh. *Simulation using promodel*. Nueva York: McGraw-Hill, 2000.

- Hernández Sampieri; Fernández, Roberto; Collado Baptista; Carlos y Pilar Lucio. *Metodología de la Investigación*. México, D.F.: McGraw-Hill, 2003.
- Kelton, David; Sadowski, Randall y David Sturrock. *Simulation with Arena*. 3.^a edición. Boston: McGraw-Hill, 2004.
- Knolmayer, Gerhard. *Supply chain management based on SAP systems; Order management in manufacturing companies*. Berlín: Springer, 2002.
- JLaw, Averill y David Kelton. *Simulation modeling and analysis*. 3.^a edición. Nueva York: McGraw-Hill, 2000.
- JLaw, Averill. *Statistical analysis of simulation output data: The practical state of the art*. Proceedings of Winter Simulation Conference, Maryland: Informs, 2007.
- McGarvey, Bernard. *Modeling for business management: an introduction*. Nueva York: Springer Verlag, 2004.
- Morecroft, John D. W. *Modeling for learning organizations*. Nueva York: Productivity Press, 2000.
- Poirier, Charles. *Administración de cadenas de aprovisionamiento. Cómo construir una ventaja competitiva sostenida*. México: Oxford University Press, 2001.
- Reyes Pérez Espejo, Raúl y Arturo Vásquez Cordano. “La organización económica de la industria de hidrocarburos en el Perú: La comercialización del GLP envasado”. Documento de trabajo 21. Lima: Osinerg, Oficina de Estudios Económicos, 2006.
- Sanchez, Susan. “Guidelines for designing simulation experiments”. Proceedings of Winter Simulation Conference. Maryland: Informs, 2007.
- Sargent Robert. “Verification and validation of simulation models”. Proceedings of Winter Simulation Conference. Maryland: Informs, 2007.
- Senge, Peter. *La danza del cambio. Los retos de sostener el impulso en organizaciones abiertas al aprendizaje*. Bogotá: Norma, 2000.
- Scheaffer, Richard; Mendenhall, William y Ott Lyman. *Elementos de muestreo*. México S.A. de C.V.: Iberoamericana, 1987.

- Simchi Levi, David. *Designing and managing the supply chain*. 3.^a edición. Nueva York: McGraw-Hill, 2008.
- Sipper, Daniel y Bulfin Robert. *Planeación y control de la producción*. México, D.F.: McGraw-Hill/Irwin, 2003.
- Sterman, John D. *Business dynamics. Systems thinking and modeling for a complex world*. Nueva York: McGraw-Hill/Higher Education Edition, 2000.
- Rodríguez Ulloa, Ricardo. *La sistémica, los sistemas blandos y los sistemas de información*. Lima: Universidad del Pacífico, 1994.
- Tarzijan, Jorge. *Organización industrial para la estrategia empresarial*. 2.^a edición. Santiago de Chile: Pearson Educación, 2006.
- Vásquez Cordano, Arturo. “La organización económica de la industria de hidrocarburos en el Perú”. Documento de trabajo. 8. Lima: Osinerg, Oficina de Estudios Económicos, 2005.
- Vásquez Cordano, Arturo; Gallardo, José; Bendezú, Luis; Salvador, Julio y Fidel Amésquita. “La informalidad y sus manifestaciones en la comercialización de combustibles líquidos en el Perú”. Documento de trabajo 15. Lima: Osinerg, Oficina de Estudios Económicos, 2005.
- Vieira, Guilherme E. y Osmar César Júnior. “A conceptual model for the creation of supply chain simulation models”. Proceedings of Winter Simulation Conference. Maryland: Informs, 2005.