

CUADERNOS DE ECONOMÍA Y ADMINISTRACIÓN

---

COMPENDIUM

---

## **ARTÍCULOS DE ACTUALIDAD**

### **ANÁLISIS DEL BALANCE ENERGÉTICO DEL ECUADOR A TRAVÉS DE DINÁMICA DE SISTEMAS**

*Holger Raúl Barriga Medina*

### **UN ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL EFECTO DE LA PROVISIÓN DE INFORMACIÓN EN DECISIONES ESTRATÉGICAS**

*Gonzalo Eduardo Sánchez Lima, PhD*



## ANÁLISIS DEL BALANCE ENERGÉTICO DEL ECUADOR A TRAVÉS DE DINÁMICA DE SISTEMAS

Holger Raúl Barriga Medina

Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL, Facultad de Ciencias Sociales y Humanísticas, Campus Gustavo Galindo Km 30.5 Vía Perimetral, P.O. Box 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador

### Resumen

Fecha de Recepción: 8 de Diciembre del 2015 – Fecha de aprobación: 29 de Diciembre del 2015

*El presente artículo plantea un modelo de dinámica de sistemas para analizar el balance energético del Ecuador a través de un proceso de simulación. El modelo considera las fuentes de energía primaria, así como las de energía secundaria que son necesarias para satisfacer la demanda. Bajo un conjunto de supuestos y el planteamiento de escenarios entre los años 2014 y 2017, se simula el crecimiento de la demanda de energía por el uso de las nuevas cocinas de inducción y se lo contrasta con el crecimiento de del suministro de energía por la puesta en marcha de nuevos proyectos de generación hidroeléctrica. Los resultados indican que en tres casos de simulación donde se combinan diferentes escenarios de demanda y de generación, se produce un excedente de energía. En uno de los casos de simulación se produce un déficit de energía. Los excedentes de energía pueden convertirse en el futuro en un recurso de exportación para el Ecuador.*

**Palabras Clave:** Balance, energía, primaria, secundaria, inducción, generación, hidroeléctrica, vensim

### Abstract

*This article presents a dynamics system model to analyze the energy balance of Ecuador through a simulation process. The model considers the sources of primary energy and secondary energy that are needed to satisfy the demand. Under a set of assumptions and scenarios approach between years 2014 and 2017, a growth in energy demand by the use of new induction cookers is simulated and it contrasts with the growth of the energy supply by putting up of new hydropower projects. The results indicate that a surplus of energy is produced in three simulation cases where different scenarios of demand and generation are combined. In one simulation case an energy deficit occurs. Surplus energy can become a export resource in the future for Ecuador.*

**Keywords:** Balance, energy, primary, secondary, induction, generation, hydropower, vensim

## 1. Introducción

La energía es un recurso estratégico a nivel mundial y es uno de los motores de desarrollo de los países, por lo cual su planificación y gestión es importante para satisfacer cambios en la demanda. La energía se define como la capacidad para realizar un trabajo y en términos económicos se refiere a un recurso natural (incluyendo a su tecnología asociada) para extraerla, transformarla y darle un uso industrial o económico. Economistas de recursos han desarrollado modelos que incorporan la función de los recursos incluidos la energía en el proceso de crecimiento de un país (Stern & Cleveland, 2004).

La sociedad no sólo responde a la cantidad y el costo de la energía, sino también a la fiabilidad y la previsibilidad de su suministro. Esta previsibilidad aumenta la seguridad energética mediante la planificación estratégica a largo plazo de gobiernos, hogares, empresas e instituciones sociales (Crabtree, Kocs, & Aláan, 2014). Por esta razón dentro de la cadena energética las fuentes se clasifican entre energía primaria y secundaria. Una fuente primaria es toda forma de energía disponible en la naturaleza antes de ser convertida o transformada. La energía secundaria por otra parte se refiere a cualquier energía que se obtiene a partir de una fuente primaria de energía que emplea un proceso de transformación o conversión. Por lo tanto los derivados del petróleo o la electricidad son energías secundarias ya que requieren de refinación o de generadores eléctricos para ser producidos (Springer, 2011). Algunas de las fuentes de energía primaria pueden aprovecharse de manera directa, por ejemplo, la leña, la cual se usa para la cocción de alimentos en sectores rurales donde no hay disponibilidad de gas de uso doméstico u otra forma de combustible. La mayor parte de las fuentes primarias no se pueden usar de forma directa y es necesario entonces transformarlas en energía secundaria, por ejemplo, la gasolina, la cual se obtiene a partir de un proceso de destilación de petróleo.

El objetivo de este estudio es desarrollar un modelo, mediante dinámica de sistemas, para analizar el balance energético del Ecuador. Bajo un conjunto de supuestos, se simula un escenario de crecimiento de la demanda de energía secundaria en el sector residencial promovido la puesta en marcha de los nuevos proyectos hidroeléctricos. En base a las simulaciones se desea responder a la pregunta: ¿Puede la demanda de energía requerida por el uso de las cocinas de inducción en el sector residencial ser satisfecha mediante el arranque y funcionamiento de los nuevos proyectos hidroeléctricos en el Ecuador? Actualmente el Ecuador cuenta con líneas de interconexión en alta tensión con los países vecinos de Colombia y Perú, por lo cual los resultados de las simulaciones deberían además responder otra pregunta adicional: ¿Si existiese un stock de energía resultante de la diferencia entre la generación hidroeléctrica y la demanda de energía, este podría utilizarse como un recurso exportable?

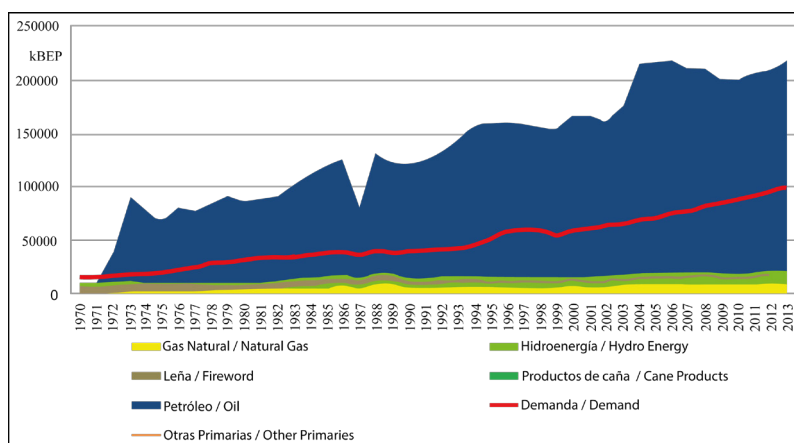
Los modelos de dinámicas sistemas son útiles para representar sistemas reales mediante un proceso de abstracción con el objetivo de facilitar la comprensión de aspectos del sistema real (Izquierdo, Galán, Santos, & Del Olmo, 2008). El modelo en su conjunto es un sistema de sustitución del sistema real, en el que no hay teoría completa y que permite hacer experiencias supuestas para comprender el conjunto complejo de las interacciones (Armatte, 2006). Algunos de los resultados de las simulaciones indican que la entrada en funcionamiento de los nuevos proyectos hidroeléctricos compensa el aumento de la demanda de energía, en el sector residencial, y genera incluso superávits que podrían destinarse a la exportación. Sin embargo, otras simulaciones revelan que los déficits de energía son todavía una posibilidad.

Este artículo se estructura como sigue. La sección 2 describe brevemente el sector eléctrico del Ecuador, en particular las políticas de reemplazo de las cocinas a gas por las de inducción eléctrica, así como los nuevos proyectos de generación. La sección 3 describe el modelo de dinámica de sistemas y las condiciones para las simulaciones. La sección 4 presenta los resultados de las simulaciones. La sección 5 concluye.

## 2. El Sector Eléctrico en el Ecuador

Algunos países optan por una fuente energía primaria como la única para producir electricidad; mientras que otros distribuyen su proceso de generación entre diversas fuentes. Entre las principales fuentes primarias se tienen la solar, geotérmica, petróleo, gas natural, carbón, y la hidroenergía. Entre las fuentes de energía secundaria se tienen la energía eléctrica y los combustibles fósiles como el diésel, el alcohol, y la gasolina. En particular la energía secundaria es aquella que usan los sectores de consumo como el transporte, la industria, y los sectores comercial y residencial. La Figura 1 muestra para el Ecuador la evolución de la oferta de energía primaria por tipo de fuente desde el año 1970 hasta el año 2013, medida en miles de barriles equivalentes de petróleo (kBEP). Se observa que la demanda de energía primaria (línea en color rojo) ha sido satisfecha por medio de gas natural, leña, petróleo, hidroenergía, productos de caña y otras energías primarias. Asimismo se observa que a partir del año 1971 el Ecuador posee un excedente de petróleo (área en color azul), que lo ha posicionado desde entonces, como un país exportador de este recurso energético primario.

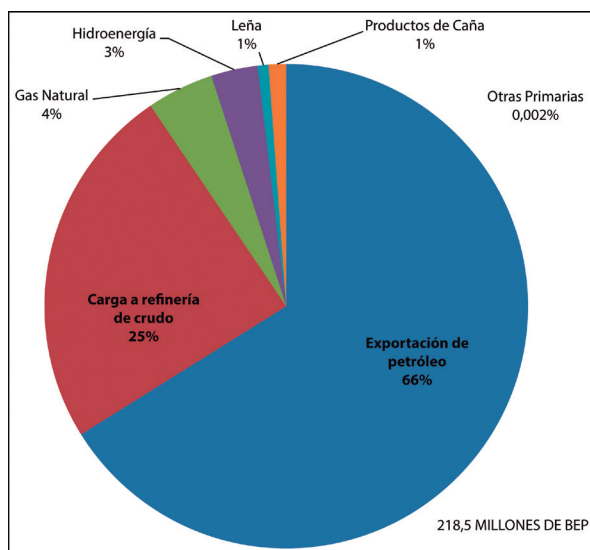
**Figura 1: Evolución de la oferta de energía primaria por tipo de fuente 1970-2013 (kBEP)**



Fuente: Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos

La Figura 2 muestra la estructura porcentual de la oferta de energía primaria en Ecuador para el año 2013. Se observa que el petróleo constituye el 91% de la oferta de energía primaria, de este porcentaje. Un 25% se usa para producir derivados y el 66% restante se exporta. Le siguen en orden de importancia el gas natural con un 4%, la hidroenergía con un 3%, la leña con un 1% y los productos de caña también con 1%; las otras energías primarias en realidad son marginales.

**Figura 2: Estructura de la oferta de energía primaria en Ecuador**

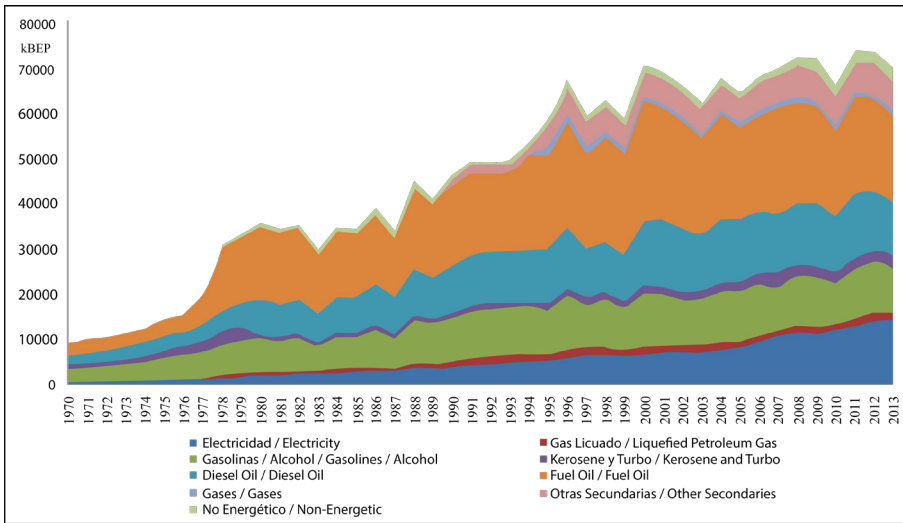


Fuente: Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos

En lo que respecta a las fuentes de energía secundaria, en el Ecuador existen las siguientes fuentes: (a) electricidad, derivados de petróleo como (b) gasolinas y alcohol, (c) diésel, (d) gas licuado de petróleo, (e) kerosene y turbo, (f) fuel oil, (g) gases, (h) otras secundaria, (i) no energético. La Figura 3, muestra la evolución de la producción de energía secundaria por tipo de fuente desde 1970 hasta el 2013.

Se observa que de 1970 a 1977 la producción de energía secundaria tuvo un crecimiento moderado, a partir de 1978 el crecimiento en la producción de derivados de petróleo se incrementa, coincidiendo con la entrada en producción en ese año de la Refinería de Esmeraldas. Además se observa una tendencia de crecimiento en la producción de las diferentes fuentes de energía secundaria, sobresaliendo entre ellas la electricidad, las gasolinas, el diésel, el fuel oil y en los últimos 20 años el gas licuado de petróleo.

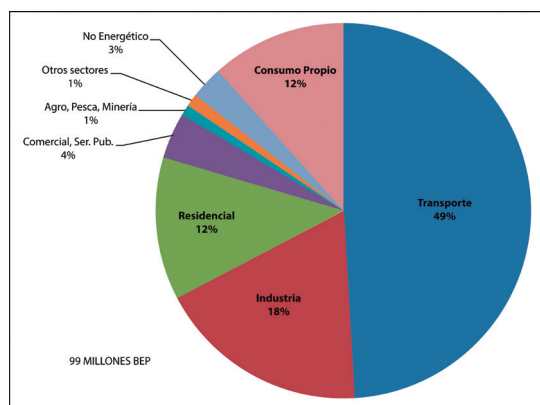
**Figura 3: Evolución de la producción de energía secundaria por tipo de fuente 1970-2013**



Fuente: Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos

Los sectores de consumo que el Ecuador tiene son los siguientes: (a) transporte, (b) industria, (c) residencial, (d) comercial y servicio público, (e) agro, pesca y minería, (f) consumo propio, (g) otros sectores y (h) no energético. La Figura 4 muestra la estructura porcentual de consumo por tipo de sector para el año 2013. Se observa que el sector más importante de consumo es el sector de transporte con un 49%, el sector industrial le sigue con un 18%, el sector residencial y de consumo propio con un 12% cada uno, luego el sector comercial 4%, no energético 3%, agricultura, pesca y minería 1% y otros sectores 1%. Los sectores de consumo representan la demanda de energía del Ecuador, la cual crece sostenidamente cada año, por ejemplo para el año 2013 el consumo final de energía por sector creció un 4,3% con respecto al año 2012 (Tabla 1).

**Figura 4: Estructura del Consumo por sectores 201**



Fuente: Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos

**Tabla 1: Consumo anual de energía por sector (kBEP)**

	2011	2012	2013	Variación porcentual 2013/2012
Transporte	45,121	45,999	48,551	5.5
Industria	15,577	16,819	18,050	7.3
Residencial	11,661	12,291	12,127	1.3
Consumo Propio	11,287	11,499	11,519	0.2
Comercial, Ser. Pub.	3,354	3,539	3,933	11.1
Agro, pesca, minería	731	796	878	10.3
Otros	1,023	1,101	1,132	2.8
No energético	2,631	2,825	2,782	-1.5
<b>Consumo Final</b>	<b>91,385</b>	<b>94,868</b>	<b>98,970</b>	<b>4.3</b>

Fuente: Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos

Un hecho importante en Ecuador, es que se están construyendo varios proyectos de generación para cambiar la matriz energética y atender el Plan Maestro de Electrificación (Conelec, 2013) (Tabla 2). De acuerdo con el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, con información actualizada al 15 de julio del 2015, varios proyectos de generación hidroeléctrica van a entrar en operación entre los años 2015 y 2017. Hasta el año 2016 se planifica que entren en operación 8 proyectos emblemáticos, que totalizan una potencia de 2.756 MW, con lo cual se duplica la capacidad de generación hidroeléctrica del Ecuador y convertiría a la electricidad en un nuevo recurso de exportación. Paralelamente también se está promoviendo en el sector residencial el cambio de cocinas de gas por cocinas eléctricas de inducción, lo cual se viene promocionando desde el año 2014 y de manera concreta a partir del año 2015 con incentivos (en forma de créditos y subsidios), y financiamiento directo.



**Tabla 2: Proyectos Emblemáticos de Generación Hidroeléctrica del Ecuador**

Proyecto	Ubicación	Potencia (MW)	Arranque
Coca Codo Sinclair	Sucumbíos	1500	Febrero 2016
Sucumbíos	Azuay-Morona	487	Diciembre 2015
Toachi Pilatón	Pichincha-Cotopaxi	253	Diciembre 2015
Minas San Francisco	Azuay	270	Marzo 2016
Delsatanisagua	Zamora Chinchipe	115	Marzo 2016
Mazar Dudas	Cañar	1	Julio 2015
Manduriacu	Pichincha	60	Marzo 2015
Quijos	Napo	50	Marzo 2016

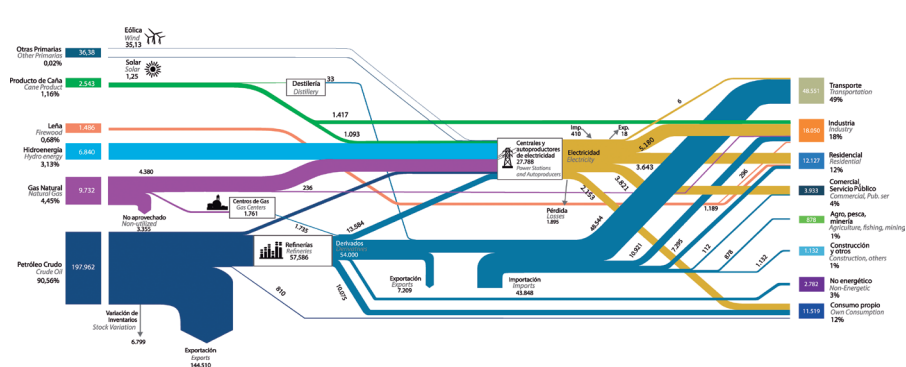
Fuente: Ministerio de Electricidad y Energías Renovables

Una representación completa del sector eléctrico se tiene en la Figura 5, la cual muestra el Diagrama de Sankey del balance energético del Ecuador en el 2014. Este diagrama es una representación gráfica de los flujos de energía, los cuales son representados por líneas de diferentes colores según el tipo de fuente de energía, y el ancho de estas líneas es proporcional a la cantidad de energía suministrada.

En el lado izquierdo del diagrama están las seis fuentes de energía primaria que posee el Ecuador: (a) gas natural, (b) hidroenergía, (c) leña, (d) productos de caña, (e) petróleo y (f) otras fuentes primarias donde se incluyen la energía solar y la energía eólica. En la parte central se encuentran los centros de transformación de energía primaria en energía secundaria como son: (a) destilerías de alcohol, (b) refinerías de petróleo, (c) centros de gas y (d) las centrales y autoprodutores de electricidad. En cada uno de estos centros de transformación se utilizan en la entrada uno o varios tipos de energía primaria y se obtiene en la salida energía secundaria como son electricidad y diferentes tipos de combustibles. En cada proceso de transformación se generan pérdidas (que son contabilizadas), por lo cual hay una tasa de rendimiento para cada tipo de proceso de transformación. En el lado derecho están los ocho sectores de consumo que tiene definido el Ecuador: (a) transporte, (b) industria, (c) residencial, (d) comercial y servicio público, (e) agro, pesca y minería, (f) consumo propio, (g) otros sectores y (h) no energético. En el diagrama también se muestran los flujos de energía que se importan y los flujos de energía que se exportan. Cabe indicar que la importación y exportación se da tanto con fuentes de energía primarias como secundarias.

Las unidades de medición de la energía primaria y secundaria son miles de barriles equivalentes de petróleo (kBEP), los cuales aparecen descritos en el diagrama de balance energético (Figura 5). El sistema está en equilibrio en el año 2014, esto significa que el flujo de energía de entrada (energía primaria) es exactamente igual al flujo de energía de salida (energía secundaria) más las pérdidas producidas en el proceso de transformación. A partir de esta condición de equilibrio se simularán los cambios en la generación de hidroenergía y en la demanda de energía del sector de consumo residencial.

**Figura 5: Balance Nacional de Energía del Ecuador 2014 (año base 2013)**



Fuente: Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos del Ecuador

### 3. Metodología

#### 3.1 Modelo y Dinámica de Sistemas

Los modelos de dinámica se construyen mediante un proceso de abstracción con el objetivo de facilitar la comprensión de ciertos aspectos de un sistema real (Izquierdo, Galán, Santos, & Del Olmo, 2008). El modelo abstracto, el conjunto de ecuaciones, las interfaces, y los datos se incorporan en un software como Vensim® PLE, y constituyen un sistema de sustitución del sistema real donde no hay teoría completa pero que permite experimentar supuestos o escenarios para comprender el conjunto complejo de las interacciones (Armatte, 2006).

La dinámica de sistemas es una metodología que aborda e integra la información disponible y las interacciones entre los componentes de un sistema. La Dinámica de Sistemas fue desarrollada en los años cincuenta en el Massachusetts Institute of Technology, donde las primeras aplicaciones fueron en la gestión de sistemas comerciales, control de inventarios, logística y toma de decisiones; luego las aplicaciones se extendieron a problemas de la sociedad urbana, como el hacinamiento y el deterioro de las ciudades (Forrester, 1969). La innovación de la dinámica de sistemas consiste en transferir el conocimiento de la teoría de control y realimentación de la ingeniería automática a otras áreas como la organización y las ciencias sociales, proponiendo una sencilla metáfora hidrodinámica, pues se trabaja con flujos y niveles para la representación de un sistema, abstrayendo las ecuaciones diferenciales que define un sistema no lineal.

Un Diagrama de Forrester se compone de diferentes elementos que pueden tener distinta naturaleza según el comportamiento que representen, son cuantitativos porque poseen un valor numérico en una determinada magnitud y pueden ser internos o exógenos al sistema. Estos elementos pueden ser variables o parámetros (o coeficientes). Las variables pueden ser de tres clases: (i) variables de nivel: son los recipientes, las variables que acumulan magnitudes con el tiempo. (ii) variables de flujo: simbolizan el cambio de las variables de nivel durante un periodo de tiempo. (iii) variables auxiliares: son variables dependientes intermedias que reciben información de otras variables (Santa Catalina, 2010).

La existencia de variables auxiliares evidencia la existencia de canales de información que permiten la transferencia de datos desde variables de nivel hacia variables de flujo. Dicha información se traduce en acciones de regulación del flujo, de entrada o de salida, de los niveles. Los modelos de dinámica de sistemas facilitan el uso del aparato matemático del cálculo diferencial propio de los sistemas de control y motiva la comprensión y manejo de los modelos de simulación dinámica. De allí que los niveles acumulan sus flujos y, por tanto, un nivel será la integral de sus flujos. Si se toma como referencia la variable Nivel de la Figura 5, entonces se puede que:

$$\text{Nivel}(t) = \int_{t_0}^t (\text{Entrada}(t) - \text{Salidas}(t)) dt + \text{Nivel}(t) \quad (1)$$

**Figura 5: Esquema de Dinámica de Sistemas**



Fuente: Elaboración Propia

En consecuencia, la variación neta de un nivel será la derivada con respecto al tiempo, tal que:

$$\frac{d(\text{Nivel}(t))}{dt} = \text{Entrada}(t) - \text{Salida}(t) \quad (2)$$

Los flujos son función del propio así como de otros niveles ajustados con coeficientes o parámetros. El modelo matemático encerrado en un Diagrama de Forrester es un sistema de ecuaciones diferenciales que generalmente no se puede solucionar analíticamente, por ello para generar el comportamiento del sistema a lo largo del tiempo se utilizan métodos computacionales de simulación.

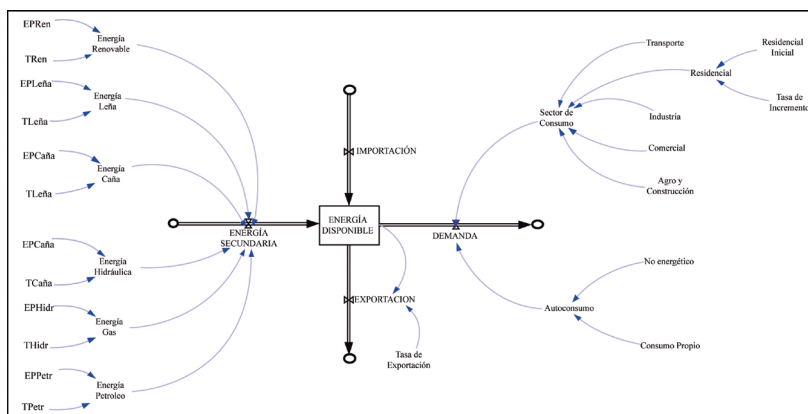
Las principales aplicaciones de software para la Dinámica de Sistemas existentes en la actualidad como Vensim® PLE, simulan el modelo matemático por medio de métodos numéricos computacionales facilitando el análisis de su comportamiento e incertidumbre a través de una interfaz gráfica amigable. Simular un modelo elaborado con la metodología de la dinámica de sistemas implica, en primer término, reproducir el comportamiento del sistema real. Mediante este proceso de simulación se identifica elementos ante cuyas variaciones el sistema es más sensible, probar hipótesis o apoyar decisiones en base al comportamiento del sistema sin necesidad de actuar directamente sobre el sistema real, analizar efectos de mediano y largo plazo producidos por cambios, explicar las acciones o decisiones a tomar en base a los estados del sistema en cada unidad de tiempo.

### 3.2 Implementación

La aplicación Vensim® PLE permite modelar sistemas o procesos mediante la dinámica de sistemas. De entre el conjunto de herramientas de análisis que dispone, proporciona dos herramientas para verificar el modelo. Dispone de funciones para revisar la sintaxis del modelo (Check Model) así como para detectar errores en la coherencia de las unidades (Units Check).

Nuestro modelo para el sistema energético del Ecuador obtenido a partir del diagrama de Sankey (Figura 5), se detalla en la Figura 6. Para obtener el modelo, en el diagrama de Sankey indicado se analizan los flujos de energía primaria y secundaria, y se calculan factores de conversión de energía primaria en secundaria por tipo de fuente de energía. Los resultados de este análisis y la descripción de variables-parámetros del modelo se detallan en la Tabla 3.

**Figura 6: Modelo de Balance Energético del Ecuador usando Vensim® PLE**



Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 3**  
**Parámetros del Modelo de Balance Energético usando Vensim® PLE**

Variable-Parámetro	Descripción	Valor Inicial	Unidades	Tipo
EPRen	Energía Primaria Renovable	36,38	kBEP/year	Flujo
EPLeña	Energía Primaria Leña	1486	kBEP/year	Flujo
EPCaña	Energía Primaria Caña	2543	kBEP/year	Flujo
EPHidr	Energía Primaria Hidroenergía	6840	kBEP/year	Flujo
EPGas	Energía Primaria Gas	9732	kBEP/year	Flujo
EPPetr	Energía Primaria Petróleo	61358,1	kBEP/year	Flujo
TRen	Factor de conversión Renovable	0,5431 3	n.a.	constante
TLeña	Factor de conversión Leña	1	n.a.	constante
TCaña	Factor de conversión Caña	0,80363	n.a.	constante

THidr	Factor de conversión Hidráulica	0,54313	n.a.	constante
TGas	Factor de conversión Gas	0,44697	n.a.	constante
TPetr	Factor de conversión Petróleo	0,82660	n.a.	constante
Energ				
Renovable	Energía Secundaria Renovable	20	kBEP/year	Flujo
Energía Leña	Energía Secundaria Leña	1486	kBEP/year	Flujo
Energía Caña	Energía Secundaria Caña	2044	kBEP/year	Flujo
Energía				
Hidráulica	Energía Secundaria Hidroenergía	3715	kBEP/year	Flujo
Energía Gas	Energía Secundaria Gas	4350	kBEP/year	Flujo
Energía Petróleo	Energía Secundaria Petróleo	50719	kBEP/year	Flujo
Energía				
Secundaria	Total de Energía Secundaria	62333	kBEP/year	Flujo
Importación	Energía Secundaria Importada	36639	kBEP/year	Flujo
Exportación	Energía Secundaria Exportada	0	kBEP/year	Flujo
Demanda	Energía Secundaria Demandada	98972	kBEP/year	Flujo
Energía				
Disponibile	Stock de Energía Secundaria (energía secundaria)	0	kBEP	Nivel
Residencial				
Inicial	Consumo Residencial inicial	12127	kBEP/year	Flujo
Tasa de				
incremento	Tasa de incremento consumo Residencial	1	n.a.	constante
Transporte	Demanda de energía sector Transporte	48551	kBEP/year	Flujo
Residencial	Demanda de energía sector Residencial	12127	kBEP/year	Flujo
Industria	Demanda de energía sector Industria	18050	kBEP/year	Flujo
Comercial	Demanda de energía sector Comercial	3933	kBEP/year	Flujo
Agro y	Demanda de energía sector Agro			
Construcción	y Construcción	2010	kBEP/year	Flujo
Sector Consumo	Demanda Total de Energía Sectores de			
	Consumo	84671	kBEP/year	Flujo
No energético	Energía consumida para generación	2782	kBEP/year	Flujo
Consumo Propio	Energía autoconsumida por el sistema	11519	kBEP/year	Flujo
Autoconsumo	Energía Total autoconsumida por el sistema	14301	kBEP/year	Flujo

En el lado izquierdo del modelo (Figura 6) se presentan las fuentes de energía primaria que posee el Ecuador con su respectivo factor de conversión de energía. Este factor permite transformar la energía primaria en energía secundaria. Por ejemplo para el caso de la energía primaria de hidroenergía que es de interés para la simulación, el elemento THidr representa el factor de conversión de energía primaria (hidroenergía) en energía secundaria (energía hidráulica); EPHidr representa el valor inicial de la energía primaria (hidroenergía) usada en el sistema junto con el incremento anual propuesto en la simulación. La energía secundaria por cada tipo de fuente puede ser calculada a partir de las siguientes ecuaciones:

$$ER = \text{Energía Renovable} = EP_{Ren} * T_{Ren} \quad (3)$$

$$EL = \text{Energía Leña} = EP_{Leña} * T_{Leña} \quad (4)$$

$$EC = \text{Energía Caña} = EP_{Caña} * T_{Caña} \quad (5)$$

$$EH = \text{Energía Hidráulica} = EP_{Hidr} * T_{Hidr} \quad (6)$$

$$EG = \text{Energía Gas} = EP_{Gas} * T_{Gas} \quad (7)$$

$$EG = \text{Energía Petróleo} = EP_{Petr} * T_{Petr} \quad (8)$$

El total de energía secundaria es igual a:

$$ES = \text{Energía Secundaria} = ER + EL + EC + EH + EG + EP \quad (9)$$

El nivel de energía disponible será la integral resultante de los flujos de energía de entrada: (a) energía secundaria, (b) importación (*IM*) menos los flujos de energía de salida (c) exportación (*EX*) y (d) demanda (*DE*):

$$ED = \text{Energía Disponible} = \int (ES + IM - EX - DE) \quad (10)$$

En el lado derecho de la Figura 6 se han agrupado las demandas de energía de los diferentes sectores de consumo, como son: (a) transporte (*TR*), (b) residencial (*RE*), (c) industria (*IN*), (d) comercial (*CO*), (e) agro, pesca, minería y construcción (*AC*), (f) no energético (*NE*) y (g) consumo propio (*CP*). Por ejemplo para el caso del sector residencial, Residencial Inicial representa el valor inicial de la demanda en el sector (año 2013) junto con el incremento anual propuesto en la simulación, mientras que Tasa de incremento representa la tasa de incremento normal de la demanda. La demanda de energía por cada sector de consumo puede ser calculada de la siguiente manera:

$$RE = \text{Residencial} = \text{Residencial Inicial} * \text{Tasa de Crecimiento} \quad (11)$$

$$SC = \text{Sector Consumo} = TR + RE + IN + CO + AC \quad (12)$$

$$AU = \text{Autoconsumo} = NE + CP \quad (13)$$

$$DE = \text{Demanda} = AU + SC \quad (14)$$

Para la simulación se asume que el sistema en el año 2013 está en equilibrio, es decir que la cantidad de energía secundaria producida es igual a la demanda requerida en dicho año, esta condición es similar a una condición de equilibrio de mercado. Si esta condición de equilibrio no se cumpliera, entonces el modelo debería ser ajustado para considerar esta condición y seguramente sería un modelo más complejo de analizar y de simular año.

La simulación consiste además en asumir que a partir del 2014 la demanda del sector residencial aumenta debido al mayor uso de las cocinas eléctricas de inducción. Lo que se conoce en la actualidad es que entre septiembre del 2014 y julio del 2015, los fabricantes nacionales han vendido 177.472 cocinas de inducción dentro del programa que lleva adelante el Minis-

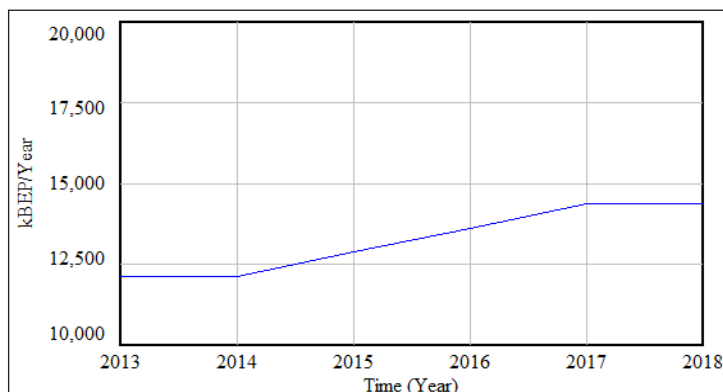
terio de Electricidad y que la capacidad de producción nacional es de 125.000 cocinas mensuales (El Comercio, 2015). Según las estimaciones oficiales un total de aproximadamente 3'000.000 de cocinas de gas deben ser reemplazadas por cocinas de inducción y el consumo mensual estimado de electricidad de una de estas cocinas está en el orden de los 100kWh (kilovatios-hora). El Estado Ecuatoriano subsidiará los primeros 80kWh (El Universo, 2015). La Tabla 4 resume las condiciones para la simulación.

**Tabla 4: Proyección anual de demanda de energía por cocinas de inducción**

Escenario	Cocinas/año	Energía/año (kWh)	Total (MWh)	Total (kBEP)	Años	Total (kBEP)
1	250,000	1,200	300,000	186	12	2,232
2	500,000	1,200	600,000	372	6	2,232
3	750,000	1,200	900,000	558	4	2,232
4	1,000,000	1,200	1,200,000	744	3	2,232

Se proyecta un incremento lineal de la demanda de cocinas de inducción, de acuerdo con la Tabla 4. Para el escenario 1 se asume que la demanda será de 250 mil cocinas por año y que la energía anual requerida para su funcionamiento es de 300,000 kWh o de 186 kBEP, con lo cual al término de 12 años se reemplazarían los tres millones de cocinas de gas por cocinas de inducción y la energía total necesaria es de 2,232kBEP; lo mismo sucede para los escenarios 2, 3 y 4. Para la simulación de este crecimiento lineal de la demanda en el sector residencial, se usa una función rampa (pendiente constante) como se muestra en la Figura 7.

**Figura 7: Función rampa para simulación de demanda residencial**



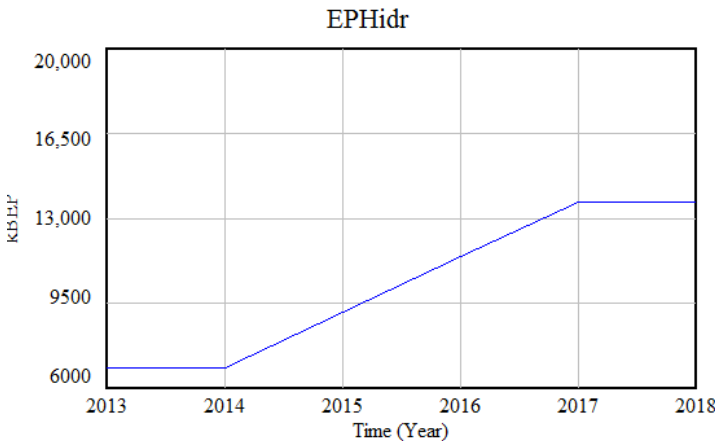
A partir del 2014 se asume un incremento en la generación de energía secundaria de origen hidráulico, provocada por la puesta en marcha de nuevas centrales hidroeléctricas. Se desconoce si las fechas planificadas de operación de las nuevas centrales de generación hidroeléctrica que se indican en la Tabla 2 son fechas efectivas, puesto que a más de la puesta en marcha de las centrales hidroeléctricas es necesario también la adecuación y reforzamiento de las redes de transmisión y de distribución, así como la construcción de la nueva red de transmisión de 500kV (kilovoltios) para la central Coca Codo Sinclair.

**Tabla 5: Proyección de generación de energía hidráulica**

Escenario	Energía anual (kBEP/año)	Años	Total (kBEP)
1	1,140	6	6,840
2	2,280	3	6,840
3	3,420	2	6,840

Se proyecta un incremento lineal de la generación de hidroenergía de acuerdo con la Tabla 5. Por ejemplo para el escenario 2, se asume que la hidroenergía generada será de 2,280 kBEP por año, con lo cual en el término de 3 años se duplicaría el nivel actual de 6,840 kBEP; lo mismo sucede para los escenarios 1 y 3. Para la simulación de este crecimiento lineal de la generación de hidroenergía, se usa también una función rampa (pendiente constante) como se muestra en la Figura 8.

**Figura 8: Función tipo rampa para simulación de generación**



Fuente: Elaboración Propia a partir de software Vensim

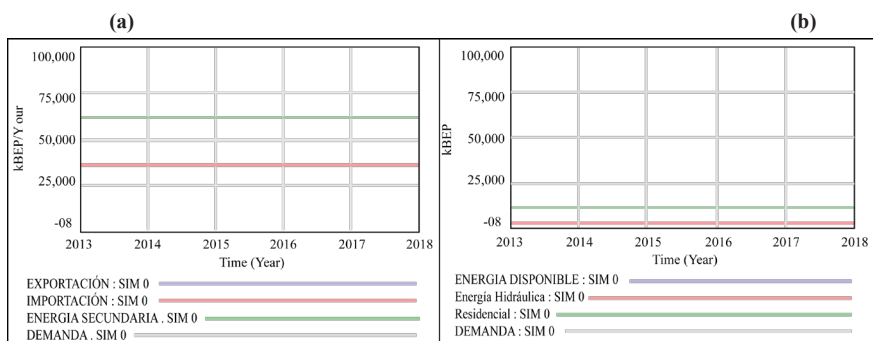
Se asume también que el sistema se equilibra cada año, es decir entre la demanda de los diferentes sectores de consumo y la generación de otras fuentes de energía se produce un balance energético.



#### 4. Resultados

La condición de equilibrio representa la primera simulación (SIM 0) donde se ven los valores iniciales de balance de energía así como de algunos parámetros de energía del modelo Figuras 9(a) y 9(b). En la Figura 9(a) se muestran los valores iniciales de los parámetros de energía secundaria, importación, exportación y demanda que definen el nivel de energía disponible. Por ejemplo, en la Figura 9(a) el valor inicial de energía secundaria en el modelo es de 62,333 kBEP/año, obtenido de la Tabla 3 y detallado con línea de color verde. En la Figura 9(b) se muestran los valores iniciales de los parámetros de energía disponible, residencial, energía hidráulica y demanda del modelo que van a variar en función de la simulación. Por ejemplo, en la Figura 9(b) el valor inicial de la energía residencial en el modelo es de 12,127 kBEP, obtenido de la Tabla 3 y detallado con línea de color verde.

**Figura 9: Parámetros de Balance Energético – Equilibrio (a) y de Energía (b)**



Las simulaciones SIM 1 y SIM 2 son el resultado de combinaciones de incrementos en la demanda de energía en el sector residencial (escenario demanda) y de incrementos en la generación de hidroenergía (escenario de generación) se indican en la Tabla 6.

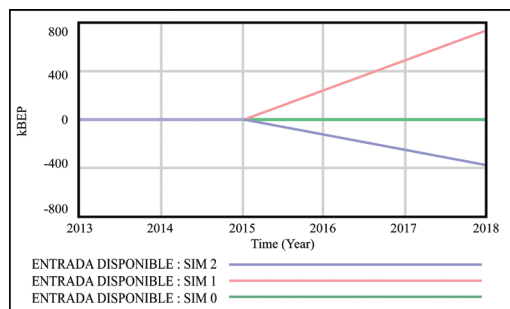
**Tabla 6: Escenarios de Simulación SIM 1 y SIM 2**

Simulación	Escenario Demanda	Escenario Generación	Incremento de la Demanda (kBEP/año)	Incremento de la Generación (kBEP/año)
SIM 1	2	1	372	1,140
SIM 2	4	1	744	1,140

El resultado de las simulaciones SIM 1 y SIM 2 sobre el nivel de energía disponible se observa en la Figura 10. En SIM1 se observa que si la demanda de energía se incrementa por la instalación de 500.000 cocinas de inducción por año y la generación de energía se incrementa a razón de 1.140 kBEP por año, se produce un superávit de energía de 247 kBEP en el año 2016, 494 kBEP en el año 2017 y 740 kBEP en el año 2018, lo cual se convertiría en un recurso de

exportación. En SIM2 se observa en cambio que si la demanda de energía se incrementa por la instalación de 1'000.000 de cocinas de inducción por año y la generación de energía se incrementa a razón de 1.140 kBEP por año, entonces se produce un déficit de energía de 125 kBEP en el año 2016, 249 kBEP en el 2017 y 374 kBEP en el 2018, con lo cual se haría necesario importar energía o aumentar la generación de energía.

**Figura 10: Energía Disponible para SIM 1 y SIM 2**



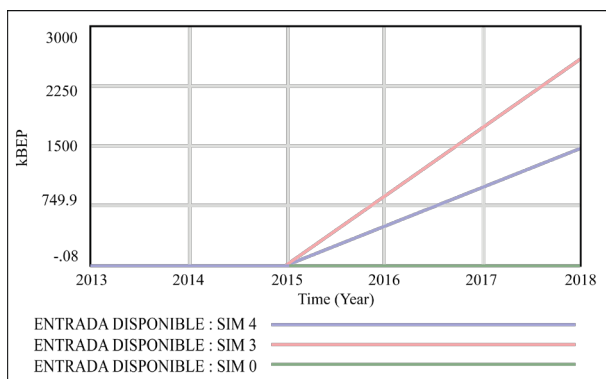
Las simulaciones SIM3 y SIM4 parten de la condición de equilibrio y realizan una nueva combinación de los incrementos en la demanda de energía (Tabla 7). Los resultados se detallan en la Figura 11. En la simulación SIM3 se observa que si la demanda de energía se incrementa por la instalación de 500.000 de cocinas de inducción por año y la generación de energía se incrementa a razón de 2.280 kBEP por año, se produce un superávit de energía de 866 kBEP en el año 2016, 1.732kBEP en el 2017 y 2.598 kBEP en el 2018, el cual se convertiría en un recurso de exportación.

**Tabla 7: Escenarios de Simulación SIM 3 y SIM4**

Simulación	Escenario Demanda	Escenario Generación	Incremento de la Demanda (kBEP/año)	Incremento de la Generación (kBEP/año)
SIM 3	2	2	372	2280
SIM 4	4	2	744	2280

En la simulación SIM4 se observa que si la demanda de energía se incrementa por la instalación de un millón de cocinas de inducción por año y la generación de energía se incrementa a razón de 2.280 kBEP por año, se produce un superávit de energía disponible de 494kBEP en el 2016, 938 kBEP en el 2017 y de 1.483 kBEP en el 2018.

**Figura 11: Energía Disponible para SIM3 y SIM4**



Los resultados se resumen en la Tabla 8.

**Tabla 8: Resultados de la Simulación**

Simulación	Escenario Demanda	Escenario Generación	Superávit de energía	Déficit de energía
SIM 1	2	1	X	
SIM 2	4	1		X
SIM 3	2	2	X	
SIM 4	4	2	X	

## 5. Discusión

Este artículo analiza el sector eléctrico del país, en particular el sector residencial en función de los potenciales incrementos de la demanda debido a la adopción de las cocinas de inducción. A esto se añade la mayor oferta de energía debido a los nuevos proyectos hidroeléctricos que entraran en funcionamiento a partir del 2015. En base al crecimiento en la demanda de energía del sector residencial bajo los supuestos de este artículo, la demanda de energía se incrementa de modo tal que si no existiese crecimiento en el sector de generación de energía, sería necesario importar energía para satisfacer la demanda. Los resultados muestran excedentes de energía a partir del 2015 para las condiciones de las simulaciones SIM 1, SIM 3 y SIM 4, por lo cual el Ecuador estaría en capacidad de exportar energía eléctrica después de satisfacer la demanda del sector residencial. Sin embargo para las condiciones de la simulación SIM 2, se presenta un déficit, por lo cual el Ecuador debería importar energía.

El modelo propuesto tiene limitaciones por cuanto considera únicamente escenarios en función del incremento de la demanda debido al reemplazo de las cocinas de gas por cocinas eléctricas de inducción, sin embargo no considera el reemplazo de otros dispositivos que funcionan con gas en el sector residencial, como son los calefones o calentadores de agua que se deberían re-

emplazar por duchas eléctricas que en consumo de energía son similares a las cocinas de inducción y que se usan principalmente en la región Sierra. El modelo propuesto puede ser mejorado para clasificar la energía secundaria en energía eléctrica y en derivados de petróleo. Además, se puede considerar una simulación más compleja estimando un crecimiento porcentual anual de las otras fuentes de energía, así como un crecimiento porcentual anual de la demanda en los demás sectores de consumo. Más aún, estudios futuros podrían incluir impactos debido a fenómenos como El Niño o el cambio climático.

## Referencias

Armatte, M. (2006). La noción del Modelo en las Ciencias Sociales. *Empiria. Revista de Metodología de Ciencias Sociales*(11), 33-70.

Conelec. (2013). Plan Maestro de Electrificación 2013 -2022. Guayaquil: Advantlogic Ecuador S.A.

Crabtree, G., Kocs, E., & Aláan , T. (2014). Energy, society and science: The fifty-year scenario. *Futures*, 58, 53-65.

El Comercio. (28 de Agosto de 2015). La venta de cocinas de inducción locales cae. *Actualidad*, pág. Economía.

El comercio. (13 de Noviembre de 2015). La venta de cocinas de inducción todavía registra altibajos. *Actualidad*, pág. Economía.

El Universo. (10 de Agosto de 2015). Cocinas de inducción de China, a la venta en mercado local en 2 semanas. *Cocinas de Inducción*, pág. Economía.

Forrester, J. (1969). *Urban Dynamcis*. Portland: Productivity Press.

Izquierdo, L. R., Galán , J. M., Santos, J. I., & Del Olmo, R. (2008). Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y dinámica de sistemas. *Empiria. Revista de Metodología de Ciencias Sociales*(16), 85-112.

Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos. (2014). *Balance Energético Nacional 2014*.

Nakata, T., Silva, D., & Rodionov, M. (2011). Application of energy system models for desingning a low-carbon society. *Progress in Energy and Combustion Science*(37), 462-502.

Santa Catalina, I. M. (2010). *Modelo de Dinámica de Sistemas para la implantación de Tecnologías de la Información en la Gestión Estratégica Universitaria*. Donostia, España: Universidad del País Vasco.

Stern, D., & Cleveland, C. (2004). *Energy and Economic Growth*. Rensselaer, 1-41.