

Análisis de la sustitución de fuentes energéticas en Bolivia

Substitution Analysis of energy sources in Bolivia

Javier Aliaga Lordemann*

Alejandro Capriles**

Resumen

El presente documento realiza un análisis de las elasticidades de sustitución del sector energético boliviano tanto de corto como de largo plazo. Los energéticos que se toma en cuenta son: electricidad, hidrocarburos y biomasa. Para tal efecto se utiliza una función de producción *Transcendental Logarithmic*, “Translog”, conocida como modelo en bloque. Al mismo tiempo se deriva un segundo modelo de corto plazo, conocido como modelo por pares.

Palabras clave: Función de producción “Translog”, elasticidades de sustitución, enfoque dual, modelo en bloque y por pares.

Abstract

The present document analyzes the energy substitution elasticities in the short and long term in Bolivia. The inputs accounted are electricity, hydrocarbons and biomass. In order to measure and identify the direction of the elasticities we use a Transcendental Logarithmic Production Function, known as “Translog”, defined as “block model”. We also derive the short term model, known as “pair model”.

* Director del Instituto de Investigaciones Socio Económicas (IIEC) de la Universidad Católica Boliviana San Pablo (UCBSP). La Paz - Bolivia. Contacto: jaliaga@ucb.edu.bo

** Investigador del Instituto de Investigaciones Socio Económicas (IIEC) de la Universidad Católica Boliviana San Pablo (UCBSP). La Paz - Bolivia. Contacto: acapriles@ucb.edu.bo

Keywords: “Translog” production function, substitution elasticities, the dual approach, block and peers models.

Clasificación/Classification JEL: D29, C51, Q49

1. Introducción

Al menos durante las tres últimas décadas en Bolivia se evidencia la imposibilidad de tener *switches tecnológicos* –léase, el cambio de un energético por otro- lo suficientemente grandes para que se realice una sustitución efectiva de energéticos al interior de la matriz energética. Existen sin duda en este proceso enormes problemas de política energética, tecnológicos y de inversión. Nuestro trabajo parte de este último elemento al ser sencillo su análisis.

Es fácil verificar que el sector eléctrico boliviano presenta un incremento marginal de 0,89% en promedio de la potencia instalada entre 2005 y 2007¹. Esto muestra que no se han efectuado grandes inversiones, al menos en el último quinquenio. Una situación similar se presenta en el sector hidrocarburífero, donde se halla un decremento de la inversión en capital fijo para exploración de 64% entre los años 2000 y 2004² -no se cuenta con mayor información hacia adelante.

En este marco, el objetivo del presente documento es determinar si existe el potencial de sustitución entre electricidad, hidrocarburos y biomasa en la economía boliviana como una aproximación de *switch tecnológico*. Para tal efecto realizamos una regresión de la función de producción “Transcendental Logarithmic” o “Translog” para todo el sector energético, tanto en el corto como en el largo plazo.

Respecto a la estructura del documento, en primer lugar se explica la situación actual del sector energético. En el segundo acápite se presenta el desarrollo teórico del modelo económico y econométrico utilizado. En la tercera sección se presentan e interpretan los resultados obtenidos en base a las regresiones hechas. Finalmente, se dan a conocer las respectivas conclusiones.

1 Superintendencia de electricidad. Informe de capacidad instalada por planta por empresa diciembre de 2005 y 2007.

2 Información elaborada a partir de matrices de capital fijo del Instituto Nacional de Estadística.

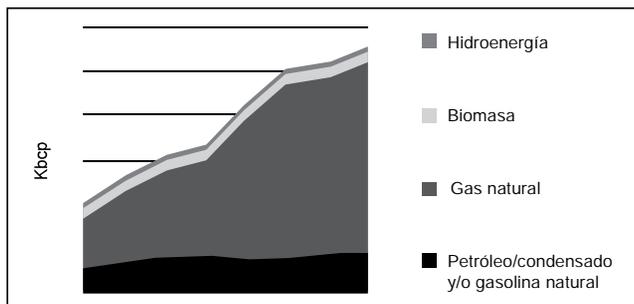
2. Descripción del sector energético en Bolivia

La producción de energía primaria ha ido creciendo a través de los años³. Es así que la oferta total de energía primaria por habitante ha cambiado de 3,08 Bep/hab en 2000 a 4,54 Bep/hab a finales de 2007. Sin embargo, la intensidad energética del país se ha mantenido invariable, denotando el lento avance tecnológico en el sector energético; el consumo de energía secundaria (electricidad) ha pasado solo de 0,10 Bep/hab en el año 2000 a 0,129 Bep/hab en 2007.

2.1. Producción y oferta de energía primaria

En Bolivia la producción de energía primaria está compuesta principalmente por cuatro energéticos: gas natural, petróleo condensado y/o gasolina natural, biomasa e hidroenergía. La producción de energía primaria entre 2000 y 2007 ha mantenido una tendencia creciente. En el Gráfico 1 se puede observar además que la hidroenergía casi no ha crecido, mientras que la producción de gas natural prácticamente triplicó su producción respecto al año 2000.

Gráfico 1: Producción de energía primaria (en Kbcap)



Fuente: Balance Energético Nacional (BEN) 2007

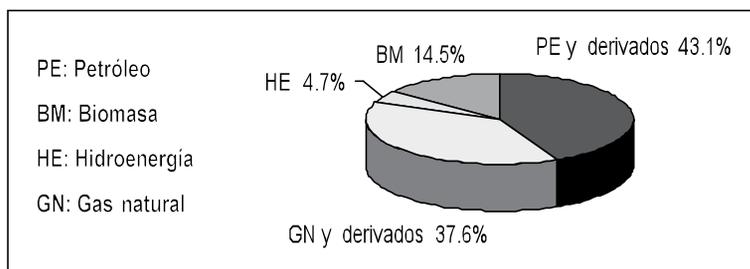
Según el Balance Energético Nacional (BEN) 2007, elaborado por el Ministerio de Hidrocarburos y Energía (MHE), la producción total de energía primaria en Bolivia fue de 111.451 Kbcap. La estructura de esta producción está principalmente constituida por gas natural (78%), petróleo (16%) biomasas (5%) e hidroenergía (2% restante). El balance se cierra con un saldo exportador sobre producción de 83%.

³ Este agregado ha pasado de 41.241 Kbcap en el año 2000 a 111.451 Kbcap en el 2007.

La oferta interna bruta total (OIBT)⁴ en 2007 fue de 38.050 Kbp, con un 43% de petróleo (PE) y derivados; un 38% de gas natural y derivados; un 14% de biomasa (BM) y el 5% de hidroenergía (HE).

Por origen, el 97% fue producción nacional de fuentes primarias y el 3% corresponde a importación. Por destino, el 66% fue a exportación y al abastecimiento de los centros de transformación. Al consumo propio y al consumo final de los sectores se destina un 33%⁵, donde el 94% de las exportaciones fue gas natural (véase Gráfico 2).

Gráfico 2: Estructura de la oferta interna total, año 2007



Fuente: Balance Energético Nacional 2007

En cuanto a la estructura de la oferta, el 81% está compuesto por recursos no renovables y el 19% por renovables –esto muestra una fuerte dependencia del primer tipo de fuentes–; al mismo tiempo se evidencia un perfil energético exportador –el 64% de la producción primaria es gas natural que se destina a la exportación. La estructura energética doméstica es también poco diversificada –el 43% de la OIBT depende del petróleo y sus derivados y el 38% del gas natural – y al mismo tiempo es dependiente de fuentes energéticas contaminantes, como la biomasa, que representa un 14,5% de la oferta.

2.2. Producción y oferta de energía secundaria

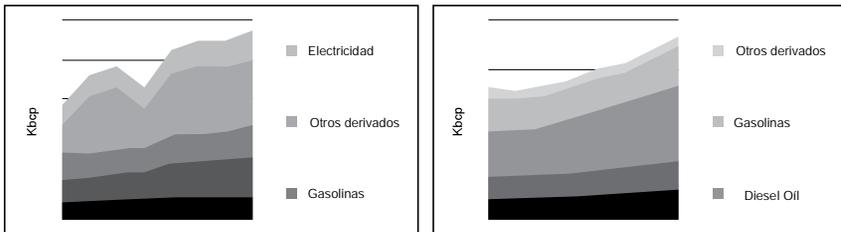
Respecto a la energía secundaria, la producción se incrementó de 14.398 Kbp el año 2000 a 23.295 Kbp el año 2007. Lo que resalta del Gráfico 3 es la evolución del consumo de diesel oil, el mismo que no vino acompañado por un incremento en su producción. Esta

4 OIBT = oferta de energía primaria + oferta de energía secundaria - producción de energía secundaria.

5 El balance se completa con 109 Kbp de aumento de inventarios y 458 Kbp de gas natural no aprovechado que se restan a la OIBT.

brecha que está siendo cerrada por la importación de dicho energético, aunque con un alto costo financiero y de oportunidad.

Gráfico 3: Producción y consumo secundario por energético (Kbep)



Fuente: Balance Energético Nacional 2007

Respecto a la generación secundaria de energía en 2007, la generación bruta de electricidad fue de 3.613 Kbep (5734 GWh). De la generación bruta total, el 40% fue en centrales hidroeléctricas y el 60% en centrales termoeléctricas. Las centrales termoeléctricas consumieron 6.117 Kbep de combustibles –el 91% fue gas natural, el 5,2%, biomasas (bagazo), y el 3,7% restante, diesel oil – mostrando de esta manera una inadecuada composición de la curva de carga eléctrica, que se encuentra fuertemente sesgada hacia la generación térmica

3. La función de producción “Translog”

Para analizar las perspectivas de sustitución de fuentes de energía en Bolivia se procede al cálculo de sus respectivas elasticidades de sustitución. De esta manera se estima una función de producción “Translog”, más conocida como *Transcendental Logarithmic*, la cual depende de precios y cantidades de los distintos inputs y/o energéticos⁶. Finalmente, se utilizan los coeficientes de dicha función de producción para calcular las elasticidades de sustitución.

3.1. Desarrollo de la función de producción

Siguiendo a Christensen, Jorgenson y Lau (1973), partimos de una función de producción que depende de ciertos inputs de la forma⁷:

6 Para obtener las elasticidades precio de sustitución se utiliza el enfoque dual.

7 Solo en este subtítulo se mantiene la notación que utilizaron los autores. Para ilustrar esta forma de escribir las funciones, y_1 es normalmente el output y los demás los inputs.

$$F(y_1, y_2, \dots, y_n) = 0 \quad (1)$$

donde y_i ($i = 1, 2, \dots, n$) representa el output neto del insumo o energético i .

La ecuación (1) cumple con la condición de primer orden –se verifica la maximización del beneficio en competencia perfecta- donde se iguala la relación técnica de sustitución de los distintos energéticos al cociente de sus precios.

En términos de un problema dual se tiene una función de beneficios de la siguiente manera⁸:

$$\Pi(p_1, p_2, \dots, p_n) = 0 \quad (2)$$

donde p_i , representa el beneficio asociado con el conjunto de precios $\{p_i\}$, con $i = 1, 2, \dots, n$.

Para fines de este trabajo se utiliza el enfoque dual⁹. La fortaleza de esta función es su homogeneidad, lo cual causa aditividad, y en ese sentido es ideal para el cálculo de elasticidades cruzadas de los energéticos. En este marco, la homogeneidad se representa de la siguiente manera:

$$\Pi(p_1, p_2, \dots, p_n) = \Pi(\lambda p_1, \lambda p_2, \dots, \lambda p_n) = 0 \quad (3)$$

donde λ representa el grado de homogeneidad para todo $\lambda > 0$.

Esta función debe cumplir que, para un nivel de beneficio constante igual a cero, las derivadas de la función de beneficio con respecto a sus precios deben ser iguales a los productos relativos y el factor de intensidad. Ahora bien, bajo el supuesto de rendimientos constantes a escala, y asumiendo que todos tengan el mismo grado o al menos grado de homogeneidad uno, entonces dicha función se puede separar aditivamente de la siguiente forma:

$$\Pi(p_1, \dots, p_n) = \Pi^1(p_1) + \Pi^2(p_2) + \dots + \Pi^n(p_n) = 0 \quad (4)$$

donde $\{\Pi^i\}$ es estrictamente monótonica y solo depende de una sola variable. Además, es homogénea del mismo grado o dichas funciones son logarítmicas.

Cada uno de los Π^i pueden ser representados de la siguiente manera:

8 La dualidad en la producción es discutida por Samuelson (1953: 15-20) y Bruno (1969).

9 Empero, el procedimiento para hacerlo desde el enfoque primal es el mismo.

$$\Pi^i(p_i) = (\text{sgn } y_i) b_i |p_i|^\eta \quad (5)$$

donde $i = 1, 2, \dots, n$; y además

$$\frac{1}{\rho} + \frac{1}{\eta} = 1 \quad (6)$$

$\mathbf{Y} \rho$ es el exponente que acompaña a \mathbf{y} en el caso del enfoque primal.

Entonces, si la función es logarítmica y la función de beneficios también lo es, tanto en cantidades como en precios, respectivamente, se puede escribir de la siguiente manera:

$$\Pi(p_1, \dots, p_n) = (\text{sgn } y_1) b_1 \ln p_1 + (\text{sgn } y_2) b_2 \ln p_2 + \dots + (\text{sgn } y_n) b_n \ln p_n = 0 \quad (7)$$

Respecto a la propiedad de la aditividad en grupo, se sabe que la función de beneficios está dividida en m grupos, los cuales son exclusivos y exhaustivos¹⁰ en cada uno de los grupos de los inputs o commodities. Se dice que esta función es aditiva en grupos si y solo si se puede escribir de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \Pi(p_1, p_2, \dots, p_n) = \\ \Pi^1(p_1, p_2, \dots, p_{n_1}) + \Pi^2(p_{n_1+1}, p_{n_1+2}, \dots, p_{n_1+n_2}) + \dots + \\ \Pi^m(p_{n_1+n_2+\dots+n_{m-1}+1}, \dots, p_{n_1+n_2+\dots+n_m}) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

donde $\sum n_i = n$ es el número de los commodities. Cada grupo es un solo commodity y el número de grupos es igual al número de commodities.

Al igual que en el caso de la aditividad simple, la función es homogénea y aditiva en grupo si y solo si las funciones $\{\Pi^i\}$ dentro de los grupos son homogéneas del mismo grado y/o las mismas $\{\Pi^i\}$ son logarítmicas de funciones homogéneas de grado uno. Entonces se puede escribir:

$$\Pi(p_1, p_2, \dots, p_n) = (\text{sgn } G^1) b_1 |G^1|^\eta + (\text{sgn } G^2) b_2 |G^2|^\eta + \dots + (\text{sgn } G^m) b_m |G^m|^\eta = 0 \quad (9)$$

De otra manera, si se requiere, las funciones también pueden ser escritas de manera logarítmica:

¹⁰ Por exclusivos, Christensen *et al.* (1973) se refieren a que los componentes de la función $\Pi^1(p_1, p_2, \dots, p_{n_1})$ se utilizan y afectan solo a Π^1 y no así a $\Pi^2(p_{n_1+1}, p_{n_1+2}, \dots, p_{n_1+n_2})$, por ejemplo. Por exhaustivos se refieren a que estos grupos se agotan.

$$\Pi(p_1, p_2, \dots, p_n) = (\text{sgn } G^1)b_1 \ln|G^1| + (\text{sgn } G^2)b_2 \ln|G^2| + \dots + (\text{sgn } G^m)b_m \ln|G^m| = 0 \quad (10)$$

En ambas ecuaciones $\{G^i(p_{n_1+n_2+\dots+n_{i-1}+1}, \dots, p_{n_1+n_2+\dots+n_i})\}$ se reconoce que son homogéneas de grado uno, $b_i > 0 (i = 1, 2, \dots, m)$, y:

$$(\text{sgn } G^1)b_1 + (\text{sgn } G^2)b_2 + \dots + (\text{sgn } G^m)b_m = 0 \quad (11)$$

Una función que cumple la aditividad en grupo puede presentar los siguientes casos:

- Tener solo un grupo de outputs, $\eta < 1$
- Solamente un grupo de inputs $\eta > 1$
- O que los grupos de commodities sean perfectamente sustitutos $\eta = 1$

En cualquiera de los casos dicha función se considera aditiva en outputs y en inputs, tomando cada grupo como si fuera un commodity.

3.2. Propiedades de la función de costos

En Pyndick (1977) se especifica la función de costos “Translog” como homogénea de grado con las siguientes propiedades¹¹:

$$\sum_i a_i = 1 \quad (12)$$

$$\sum_i \gamma_{Qi} = 0 \quad (13)$$

$$\gamma_{ij} = \gamma_{ji}, i \neq j \quad (14)$$

$$\sum_i \gamma_{ij} = \sum_j \gamma_{ij} = 0 \quad (15)$$

Así, para que dicha función sea separable, se debe incorporar una restricción que permite la **homoteticidad**:

$$\gamma_{Qi} = 0 \quad (16)$$

¹¹ Se hace notar que estas propiedades se insertarán en forma de restricciones antes de realizar las regresiones.

La propiedad de homogeneidad se representa¹²:

$$\gamma_{\rho\rho} = 0 \quad (17)$$

Finalmente, para que la suma de todas las elasticidades cruzadas sea uno se debe restringir una de ellas:

$$\gamma_{ij} = 0 \quad (18)$$

Esta propiedad hace que esta función sea de largo plazo, donde no existen costos fijos. Esta última se representa:

$$C(p, 0) = 0 \text{ (inexistencia de costos fijos)}$$

La idea de incorporar esta propiedad como restricción nace de Thutil (2008).

3.3. Elasticidades Allen-Uzawa

La ventaja de la elasticidad Allen-Uzawa, en comparación con la elasticidad normal, es que, además de medir el signo y la magnitud de la sustitución, mide la facilidad de sustitución de un insumo por otro. En otras palabras, la elasticidad Allen-Uzawa no es más que una elasticidad cruzada ponderada que representa el cambio porcentual de la cantidad de un insumo suscitada por el cambio porcentual del precio de otro insumo, manteniendo constantes los precios de los otros insumos. Se muestra la forma matemática a continuación:

$$\sigma^{AU} = \frac{\eta_{ij}}{S_j} \quad (19)$$

donde:

σ^{AU} es la elasticidad Allen-Uzawa insumo i

η_{ij} representa la elasticidad cruzada del insumo i e j , cuando $i \neq j$

S_j representa la participación del gasto del insumo j en el costo total variable.

Esta elasticidad además es simétrica, lo que implica que la elasticidad de sustitución del insumo i por el j es el mismo que el de j por i .

¹² Se resalta que esto es más un efecto que una causa de la homoteticidad.

Modelos en bloque y por pares

Se supone que el modelo en bloque es de largo plazo, dado que en su estructura incorpora todos los energéticos en una sola ecuación y por lo tanto su variación constituye una variación de la función de costos. Por su parte, el modelo por pares es una derivación del modelo en bloque y refleja rigideces en las funciones de corto plazo¹³ entre energéticos. El modelo en bloque se caracteriza principalmente por asumir la no existencia de costos fijos. Por eso constituye una función de costos agregada para toda la economía. Así, toma una función de costos e incorpora las restricciones, procediendo a la búsqueda de la solución¹⁴. De otro lado, el modelo por pares toma ecuaciones basadas en las demandas derivadas de los inputs. El modelo no incorpora restricciones, por eso es una estimación individual en términos de una derivación de la función de costos y/o producción.

3.4. Modelo ecuacional utilizado en el trabajo

A continuación se presentan las ecuaciones que se regresan en el trabajo:

Ecuación en bloque con restricciones incorporadas

$$\begin{aligned}
 \ln C - \ln p_e = & \alpha_0 + \alpha_Q \ln Q + \alpha_h (\ln p_h - \ln p_e) + \alpha_b (\ln p_b - \ln p_e) + \alpha_k (\ln p_k - \ln p_e) \\
 & + \alpha_l (\ln p_l - \ln p_e) + \frac{1}{2} \gamma_{QQ} (\ln Q)^2 + \frac{1}{2} [2\gamma_{eh} (\ln p_e \ln p_h - \ln p_e \ln p_e) + \\
 & 2\gamma_{eb} (\ln p_e \ln p_b - \ln p_e \ln p_e) + 2\gamma_{ek} (\ln p_e \ln p_k - \ln p_e \ln p_e) + 2\gamma_{el} (\ln p_e \ln p_l - \ln p_e \ln p_e) + \\
 & \gamma_{hh} (\ln p_h \ln p_h - \ln p_e \ln p_e) + 2\gamma_{hb} (\ln p_h \ln p_b - \ln p_e \ln p_e) + \\
 & 2\gamma_{hk} (\ln p_h \ln p_k - \ln p_e \ln p_e) + 2\gamma_{hl} (\ln p_h \ln p_l - \ln p_e \ln p_e) + \gamma_{bb} (\ln p_b \ln p_b - \ln p_e \ln p_e) + \\
 & 2\gamma_{bk} (\ln p_b \ln p_k - \ln p_e \ln p_e) + \gamma_{kl} (\ln p_k \ln p_l - \ln p_e \ln p_e) + 2\gamma_{ll} (\ln p_l \ln p_l - \ln p_e \ln p_e) + \\
 & \gamma_{hh} (\ln p_h \ln p_h - \ln p_e \ln p_e) + \gamma_{Qh} (\ln Q \ln p_h - \ln Q \ln p_e) + \gamma_{Qb} (\ln Q \ln p_b - \ln Q \ln p_e) + \\
 & \gamma_{Qk} (\ln Q \ln p_k - \ln Q \ln p_e) + \gamma_{Ql} (\ln Q \ln p_l - \ln Q \ln p_e)
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

donde:

$\ln C$: Logaritmo del costo total variable de producción de electricidad, hidrocarburos y biomasa.

13 Para obtener el modelo por pares se utiliza el lema de Shepard, es decir, se deriva la función de costos -sin incorporar las restricciones- con respecto a los distintos precios de los inputs. Se obtiene tantas ecuaciones como inputs o energéticos.

14 Las restricciones a ser utilizadas en el marco teórico se encuentran en un modo más formal en las ecuaciones (12) a la (15).

$\ln Q$: Logaritmo de la cantidad total producida de electricidad, hidrocarburos y biomasa.

$\ln p_e$: Logaritmo del precio de la electricidad

$\ln p_h$: Logaritmo del precio de los hidrocarburos

$\ln p_b$: Logaritmo del precio de la biomasa

$\ln p_k$: Logaritmo del precio del capital

$\ln p_l$: Logaritmo del precio del trabajo

Ecuaciones por pares

$$S_e = \alpha_e + \gamma_{Qe} \ln Q + \gamma_{ee} \ln p_e + \gamma_{eh} \ln p_h + \gamma_{eb} \ln p_b + \gamma_{ek} \ln p_k + \gamma_{el} \ln p_l \quad (21)$$

$$S_h = \alpha_h + \gamma_{Qh} \ln Q + \gamma_{hs} \ln p_e + \gamma_{hh} \ln p_h + \gamma_{hb} \ln p_b + \gamma_{hk} \ln p_k + \gamma_{hl} \ln p_l \quad (22)$$

$$S_b = \alpha_b + \gamma_{Qb} \ln Q + \gamma_{be} \ln p_e + \gamma_{bh} \ln p_h + \gamma_{bb} \ln p_b + \gamma_{bk} \ln p_k + \gamma_{bl} \ln p_l \quad (23)$$

donde:

S_e : Participación del gasto de electricidad en el costo total variable.

S_h : Participación del gasto de hidrocarburos en el costo total variable.

S_b : Participación del gasto de biomasa en el costo total variable.

3.5. Explicación de coeficientes y signos esperados

γ_{ii} : Variación porcentual del costo total ante variación porcentual de precio i. Signo esperado, negativo.

γ_{ij} : Variación porcentual del costo total ante variación porcentual cruzada de precio de i e j. Signo esperado, negativo.

α_0 : Características energéticas de la economía (leyes, instituciones, reglamentos, etc.). Signo esperado, indiferente.

4. Manejo y análisis de la información

La construcción de una función “translog” requiere una demandante cantidad y calidad de información –en términos de producción– relacionada con el BE de un año representativo y la evolución de precios de los diferentes energéticos que estructuran la matriz energética sujeta al análisis. Para nuestro caso de estudio tomamos en cuenta los agregados de producción y consumo de electricidad¹⁵, hidrocarburos¹⁶ y biomasa¹⁷, correspondientes al Balance Energético de Bolivia (2007) y series oficiales de tiempo comprendidas entre 1990 y 2010 para estos energéticos.

4.1. Pruebas estadísticas realizadas

Tanto en el modelo en bloque como por pares se descarta evidencia de quiebre estructural y multicolinealidad en base a las pruebas de CUSUMQ¹⁸ y Farrar-Glauber. La inexistencia tanto de quiebre estructural como de multicolinealidad valida la correcta especificación del modelo.

En cuanto al análisis de heteroscedasticidad, se toma en cuenta las pruebas de Breusch-Pagan-Godfrey, White y Glesjer. Los resultados indican existencia de heteroscedasticidad tanto en el modelo en bloque como en todos los casos del modelo por pares. Este problema es frecuente en modelos de sección cruzada y es necesario para corregirlo aplicar la metodología propuesta por White, la cual permite que el problema de heteroscedasticidad sea consistente con el modelo¹⁹.

Finalmente, para testear autocorrelación se realizan las pruebas de Durbin Watson y Breusch-Godfrey. Todos los test arrojaron evidencia de autocorrelación de distintos órdenes tanto en el modelo en bloque como en todos los casos del modelo por pares. Es probable que esta información esté capturando algunas estacionalidades de producción. Para solucionar este problema se vuelve a estimar el modelo mediante la metodología HAC (*Heteroskedastic*

15 La información corresponde al Comité Nacional de Despacho de Carga (CNDC).

16 La información corresponde a reportes oficiales de Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos (YPFB).

17 La información corresponde a informes de la Fundación Proleña (2010).

18 Se encuentra quiebre estructural en el modelo por pares para el caso de los hidrocarburos, debido a cambios en el marco legal del país producidos entre 2006 y 2007. Este problema se corrige mediante la introducción de variables dicotómicas.

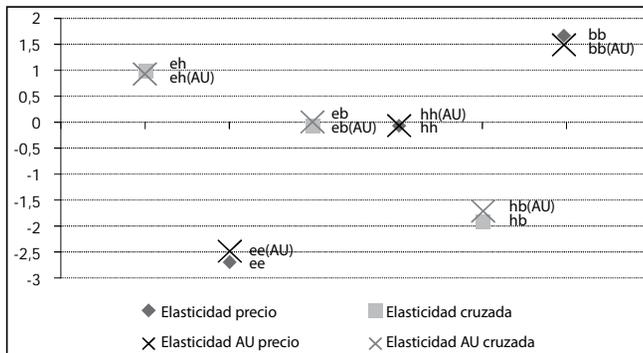
19 Esto último se realiza con el fin de no alterar las variables explicativas del modelo para que la regresión no pierda sentido económico, como ocurriría en el caso en el que se hubiera utilizado otras metodologías.

Autocorrelation Consistent), que es una extensión de la metodología de White propuesta por Newey-West (1987: 703-08).

5. Resultados del modelo

A continuación, se muestra en el Gráfico 4 el resultado de las elasticidades obtenidas a partir de la regresión en bloque²⁰. Como se puede observar, todas las elasticidades precio de la demanda arrojan signos esperados (negativo), a excepción de la biomasa. Esto puede deberse a que 80% de la biomasa es de autoabastecimiento y cerca del 70% es consumida en el área rural²¹ -aunque el costo de oportunidad de consumo de la biomasa aumente, la población rural mantiene su nivel de uso.

Gráfico 4: Elasticidades normales y Allen-Uzawa del modelo en bloque



Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos por el modelo

donde²²:

ee = elasticidad normal del precio de la electricidad

ee(AU) = elasticidad Allen-Uzawa del precio de la electricidad

hh = elasticidad normal del precio de los hidrocarburos

hh(AU) = elasticidad Allen-Uzawa del precio de los hidrocarburos

bb = elasticidad normal del precio de la biomasa

²⁰ Los valores de las elasticidades, así como los niveles de significancia, pueden verse en el Anexo 1.

²¹ Véase informe BID (2006)

²² Esta explicación es válida tanto para el modelo en bloque como para el modelo por pares.

$bb(AU)$ = elasticidad Allen-Uzawa del precio de la biomasa

eh = elasticidad normal cruzada de electricidad e hidrocarburos

$eh(AU)$ = elasticidad Allen-Uzawa cruzada de la electricidad e hidrocarburos

eb = elasticidad normal cruzada de electricidad y biomasa

$eb(AU)$ = elasticidad Allen-Uzawa cruzada de la electricidad y biomasa

hb = elasticidad normal cruzada de los hidrocarburos y biomasa

$hb(AU)$ = elasticidad Allen-Uzawa cruzada de los hidrocarburos y biomasa

Por su parte, las elasticidades cruzadas muestran que ante cambios en el precio de algunos insumos se producen presiones para que las cantidades de otros insumos también varíen. Los resultados del modelo en bloque concluyen –como se explica más adelante– como era de esperar, que algunos energéticos son sustitutos y otros no.

Para el caso referido a la electricidad y los hidrocarburos, se demuestra la imposibilidad de sustitución –se acepta la hipótesis nula de no significancia individual–; el signo puede explicarse por la baja cobertura del servicio eléctrico que hace inviable la sustitución, así como una baja capacidad de cambio tecnológico en el corto plazo.

En el caso de la electricidad y la biomasa, el modelo permite presumir una baja sustitución energética de corto plazo –en áreas rurales con vocación forestal y agroecológica–; en el mediano y largo plazo la sustitución depende de la orientación de las políticas energéticas, así como de la intensidad de inversión que se destine a la adquisición de capital para el cambio de tecnología.

Como era de esperar, la sustitución entre hidrocarburos y biomasa es inviable para todo horizonte de planificación. El bajo consumo energético –agrupado en comunidades de menos de 60 familias– de las áreas rurales, su reducida capacidad de pago y la enorme dispersión geográfica de esta población impiden erogar recursos económicos necesarios para realizar un cambio tecnológico incluso en el largo plazo.

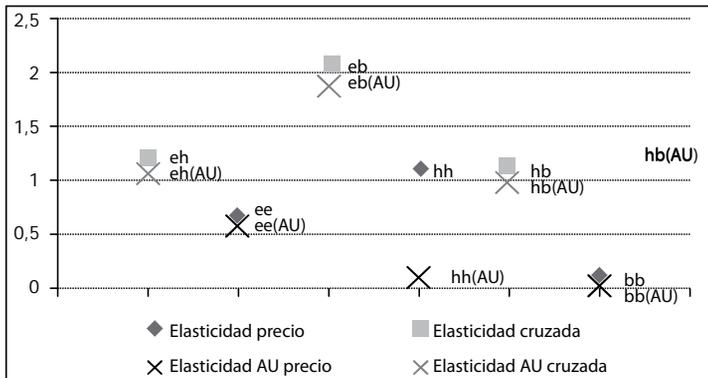
En este punto conviene recordar que las elasticidades Allen-Uzawa resultan de una ponderación de la elasticidad de precios cruzados. El resultado de éstas dio signo negativo, excepto para el caso de la biomasa –tanto en el modelo en bloque como por pares. Este resultado puede deberse a que la biomasa representa una fracción significativa del gasto de las familias en su canasta de consumo.

Finalmente, para el modelo en bloque el resto de combinaciones de sustitución energética en todo el espectro de la matriz energética de Bolivia presenta estadísticos muy poco significativos.

Precisando los resultados del modelo por pares²³ (véase el Gráfico 5), todas las elasticidades cruzadas muestran imposibilidad sustitución energética. En el corto plazo sin duda es difícil encontrar sustitutos energéticos, debido a los altos costos fijos iniciales que presentan algunos, así como por restricciones tecnológicas y logísticas.

También existen explicaciones más puntuales; por ejemplo, en los casos de electricidad e hidrocarburos, es notoria una alta dependencia de consumo fósil, junto con una subvención de producción a los mismos, la cual distorsiona los incentivos económicos de otro tipo de fuentes energéticas. Otra línea argumental gira en torno a las especificaciones de cada combustible que limitan su sustitución.

Gráfico 5: Elasticidades normales y Allen-Uzawa del modelo por pares



Fuente: Elaboración propia

Las elasticidades de sustitución Allen-Uzawa en este modelo arrojan valores positivos, indicando no sustitución, al igual que las elasticidades precio. La explicación es que las elasticidades del modelo por pares muestran relaciones de variación porcentual entre precios y cantidades en el corto plazo, que hacen que sea imposible dejar de demandar por inexistencia de sustitutos.

²³ Los valores de las elasticidades, así como los niveles de significancia, pueden verse en el Anexo 2.

6. Conclusiones

La conclusión central del documento apunta a señalar que la matriz energética de Bolivia se encuentra estructuralmente limitada en cuanto a sus posibilidades de sustitución de fuentes energéticas, tanto en el corto como en el largo plazo, entre los tres principales agregados de consumo secundario de energía; a nivel urbano se cuenta con electricidad e hidrocarburos, mientras que a nivel rural se cuenta con la biomasa.

Según los resultados encontrados en este trabajo, se constata que en el largo plazo los únicos sustitutos energéticos viables (bajo señales económicas) son la electricidad y la biomasa. Como era de esperar –dada la capacidad de pago de los agentes económicos y la limitada capacidad empresarial de efectuar inversiones de capital en un horizonte sostenido de tiempo– ningún energético mostró condiciones efectivas de sustitución.

Una primera explicación de este problema está relacionada con la imposibilidad de generar un cambio o switch tecnológico, debido a la complejidad técnica y logística que implica mudar de una tecnología a otra. Debemos tomar en cuenta que este fenómeno es realmente posible solo en el largo plazo y depende sustancialmente de un adecuado y armonizado sistema de incentivos entre productores (léase inversiones rentables) y consumidores (en nuestro caso, con un muy bajo consumo específico de energía y capacidad de pago).

Una segunda aproximación –más profunda– del problema resalta que la falta de un esquema integral de planificación técnica y estabilidad jurídica del sistema energético (en sendas de producción y consumo) ha rigidizado y segado la matriz energética hacia fuentes fósiles, ocasionando desbalances entre estos agregados. Esta situación sin duda ya incide e incidirá en el futuro en la seguridad energética del país y en las perspectivas de inversión de los sectores de hidrocarburos y electricidad.

Artículo recibido en: febrero de 2011

Manejado por: ABCE

Aceptado en: julio de 2011

Referencias

7. Adeyemo, O. O., Mabugu, R. y Hassan, R. H. (2007). Interfuel substitution: the case of the Nigerian industrial sector. *Journal of Energy in Southern Africa*, 18 (1)
8. Allen, R. (1938). *Mathematical Analysis for Economists*. Londres: Macmillan.
9. Anderson, R. y Moroney, J. (1993). Morishima Elasticities of substitution with nested production functions. *Economics Letters*, 42: 159-166.
10. Astorga, A. y Rodriguez, J. (1984). La función exponencial y la función logarítmica. Instituto Tecnológico de Costa Rica Escuela de Matemática.
11. Atkinson, S. y Halvorsen, R. (1976). Interfuel Substitution in Steam Electric Power Generation. *The Journal of Political Economy*, 84 (5): 959-978. University of Chicago Press.
12. Bacon, R. (1992). "*Measuring the possibilities of Interfuel Substitution*". Working Paper, Country Economic Department, The World Bank.
13. BID (2006). "*Plan Maestro de Electrificación Rural*"
14. Blackorby, Ch. y Russell, R. (1981). The Morishima Elasticity of Substitution: Symmetry, Constancy, Separability, and Its Relationship to the Hicks and Allen Elasticities. *Review of Economic Studies*, 46: 527-31, julio.
15. Bong, C. y Labys, W. (1988). Application of the translog model of energy substitution to developing countries: The case of Korea. *Energy Economics*, 10: 313-323.
16. Christensen, L., Jorgenson, D. y Lau, L. (1973). Transcendental Logarithmic Production Frontiers. *The Review of Economics and Statistics*, 55 (1), 28-45, febrero.
17. Christev, A. y Allen, F. (2005). A Note on Allen-Uzawa Partial Elasticities of Substitution: The Case of the Translog Cost Function. Heriot Watt University. School of Management and Languages Discussion Paper Series in Economics ISSN 1741-8240. DP2004-E07.
18. CNDC. (2010). Revista mensual de los resultados de la operación del sistema interconectado nacional (sin) y del mercado eléctrico mayorista (mem).

19. Considine, T. (1989). Separability, functional form and regulatory policy in models of interfuel substitution. *Energy Economics*, 11: 82-94.
20. Diewert, W. (1974). Applications of Duality Theory. En: Intriligator y Kendrick (eds). *Frontiers of Quantitative Economics*. Vol. II: 106-171. Amsterdam, North-Holland.
21. Diewert, W. y Wales, T. (1987). Flexible Functional Forms and Global Curvature Conditions. *Econometrica*, January, 55(1): 43-68.
22. Ernst, R. y Wood, D. (1975). *Technology, Prices, and the Derived Demand for Energy*. The MIT Press.
23. Griffin, J. y Gregory, P. (1976). An Intercountry Translog Model of Energy Substitution. Responses. *The American Economic Review*, 66(5): 845-857, December.
24. Hall, V. (1986). Major OECD country industrial sector interfuel substitution estimates, 1960-1979. *Energy Economics*, 8: 74-89.
25. Henderson, J. y Quandt, R. (1981). *Teoría microeconómica. Una aproximación matemática*. Ariel.
26. Hertel, T. (1984). Applications of the Duality and Flexible Functional Form: The Case of the Multiproduct Firm. *Research Bulletin* 980, Purdue University, September, 15-20.
27. Hicks, J. (1932). *Theory of wages*. New York: St. Martin Press.
28. Jones, C. (1995). A dynamic analysis of interfuel substitution in US industrial energy demand. *Journal of Business and Economics Statistics*, 13: 459-465.
29. Lau, L. (1978). Testing and Imposing Monotonicity, Convexity, and Quasi-Convexity Constraints, in: Fuss and McFadden, eds., *Production Economics: A Dual Approach to Theory and Applications Vol. I*. Amsterdam, North-Holland.
30. Mara, H. (2000). *Operaciones con números índices*. Universidad de los Andes. Seminario de Economía Aplicada. Sección Única.
31. Ministerio de Hidrocarburos y Energía. (2007). *Balance energético Nacional (BEN)*.

32. Morrissett, I. (1953): Some Recent Uses of Elasticity of Substitution. A Survey. *Econométrica*, January, 21(1): 41-62.
33. Newey, W. y West, K. 1987. A Simple, Positive Semi-definite, Heteroskedasticity and Autocorrelation Consistent Covariance Matrix. *Econométrica*, Econometric Society, vol. 55(3): 703-08, May.
34. Østbye, S. (2004). The Translog Neoclassical Growth Model. Universitetet I Tromsø. Department of Economics and Management Norwegian College of Fishery Science University of Tromsø Norway Working Paper Series in Economics and Management No.02/04.
35. Pyndick, R. (1977). Interfuel Substitution and the Industrial Demand for Energy: An International Comparison. Massachusetts Institute of Technology. Working Paper.
36. Ramsey, J. (1969): Tests for Specification Errors in Classical Linear Least-Squares Regression Analysis. *Journal of the Royal Statistical Society*. Series B (Methodological), 31 (2): 350-371,.
37. Russell, S, Paresh, K. y Hongliang, S. (2010). Inter-fuel Substitution in the Chinese Iron and Steel Sector. Monash University. Business Economics. Department of Economics ISSN 1441-5429 Discussion paper 22/10.
38. Serletis, A. y Shahmoradi, A. (2008). Semi-nonparametric estimates of interfuel substitution in US energy demand. *Energy Economics*, 30: 2123-2133. 18
39. Serletis, A., Timilsana, G. y Vasetsky, O. (2009). International evidence on interfuel substitution. World Bank Working Paper.
40. Serletis, A., Timilsana, G. y Vasetsky, O. (2010). Interfuel substitution in the United States. *Energy Economics*, 32: 737-745.
41. Stern, D. (2009). Interfuel Substitution: A Meta-Analysis. Australian National University, Arndt-Corden Division of Economics, Research School of Pacific and Asian Studies.

42. Tuthill, L. (2008). Interfuel Substitution and Technical Change in the US Electricity Generating Industry Under the Tradable Sulphur Allowance Scheme: 1990–2004. Oxford Institute for Energy Studies.
43. Uri, N. (1979). Energy Demand and Interfuel Substitution in India. *European Economic Review*, 12:181-90.
44. Uzawa, H. (1962). Production Functions with Constant Elasticities of Substitution. *Review of Economic Studies*, 29: 291-299, Octubre.
45. Yacimientos Petrolíferos Fiscales de Bolivia, YPFB (2010). “*Boletín estadístico Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos*”.

Anexo 1

Resultados de las elasticidades del modelo en bloque

Elasticidad	Valor	Allen-Uzawa	Valor
Precio		σ_{ee}^{AU}	-2,45386039 ^{na}
η_{ee}	-2,6796046 ^{na}	σ_{hh}^{AU}	-0,08657191
η_{hh}	-0,09488547	σ_{bb}^{AU}	1,5168816 ^{**}
η_{bb}	1,66609744 ^{**}	σ_{eh}^{AU}	0,92333276
Cruzada		σ_{eb}^{AU}	-0,00523535 ^{**}
η_{eh}	1,01200107	σ_{hb}^{AU}	-1,74782256
η_{eb}	-0,00575036 ^{**}	** Indica que es significativo al 5%.	
η_{hb}	-1,91975665	* Indica que es significativo al 10%	
R²		Prob.(Estadístico F)	Durbin-Watson
0,790798		0	2,619861

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del IISEC recabados de CNDC, YPFB, Proleña (2010) y BID (2006)

Resumen de las pruebas ejecutadas del modelo en bloque

Quiebre estructural		
Nombre del test	Resultado	Porcentaje
CUSUM Q	No existe quiebre	Por debajo del 5%
Ninguna variable tiene algún quiebre significativo		
Multicolinealidad		
Nombre del test	Resultado	Porcentaje
Correlaciones	No existe	
Gráfica	No existe	
Farrar-Glauber	No existe	Por debajo del 5%
Variables distintas tanto teórica como empíricamente		

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del IISEC recabados de CNDC, YPFB, Proleña (2010) y BID (2006)

Resumen de las pruebas ejecutadas del modelo en bloque

Heteroscedasticidad			
Nombre del test	Resultado	Porcentaje	Solución
Breusch-Pagan-Godfrey	Existe	1,9	Newey-West
White	Existe	1,9	
Glesjer	Existe	0,6	
Alta variabilidad en su producción			
Autocorrelación			
Nombre del test	Resultado	Porcentaje	Solución
Durbin-Watson	Region indecisión	2,68	Heteroskedastic-Autocorrelation Consistent
Breusch-Godfrey	Existe (12)	0	
Correlograma	Existe (1,6,11,12,13)	0	
Expectativas de producción			

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del IISEC recabados de CNDC, YPFB, Proleña (2010) y BID (2006)

Anexo 2

Resultados de las elasticidades del modelo por pares

Elasticidad	Valor	Allen-Uzawa	Valor
Precio			
η_{ee}	0,64401519**	σ_{ee}^{AU}	0,58975991**
η_{hh}	1,09563956*	σ_{hh}^{AU}	0,09147518*
η_{bb}	0,06032864**	σ_{bb}^{AU}	0,00957894**
Cruzada		σ_{eh}^{AU}	1,0664221*
η_{eh}	1,16883138*	σ_{eb}^{AU}	1,87321106**
η_{eb}	2,05747968**	σ_{hb}^{AU}	0,99472608
η_{hb}	1,09257773	** Indica que es significativo al 5%. * Indica que es significativo al 10%	
	R ² (E)	R ² (H)	R ² (B)
	0.734813	0.998930	0.997483

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del IISEC recabados de CNDC, YPFB, Proleña (2010) y BID (2006)

Resumen de las pruebas ejecutadas del modelo por pares

Quiebre Estructural			
Nombre del test	Resultado	Porcentaje	Solución
CUSUM Q (E)	No existe	Por debajo del 5%	
CUSUM Q (H)	Existe	Por encima del 5%	Variables dicotómicas
CUSUM Q (B)	No existe	Por debajo del 5%	
Cambio en la ley de hidrocarburos (2006)			
Multicolinealidad			
Nombre del test	Resultado	Porcentaje	
Correlaciones	No existe		
Gráfica	No existe		
Farrar-Glauber	No existe	Por debajo del 5%	
Variables completamente independientes			

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del IISEC recabados de CNDC, YPFB, Proleña (2010) y BID (2006)

Resumen de las pruebas ejecutadas del modelo por pares

Heteroscedasticidad				
Nombre del test	Resultado (E)	Resultado (H)	Resultado (B)	Solución
Breusch-Pagan-Godfrey	Existe	Existe	Existe	Newey-West
White	Existe	Existe	Existe	
Glesjer	Existe	Existe	Existe	
Alta variabilidad en su producción				
Autocorrelación				
Nombre del test	Resultado (E)	Resultado (H)	Resultado (B)	Solución
Durbin-Watson	Region indecisión	Existe	Existe	Heteroskedastic-Autocorrelation Consistent
Breusch-Godfrey	Existe (12)	Existe (12)	Existe (12)	
Correlograma	Existe (1,11,12,13)	Existe (1,2,3,11,13)	Existe (1,2,3,7)	
Expectativas de producción				

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del IISEC recabados de CNDC, YPFB, Proleña (2010) y BID (2006)