

La demanda de energía final de la industria manufacturera colombiana

Yezid Orlando Pérez Alemán

RESUMEN: El artículo recoge los resultados de un estudio[1] que desarrolla un modelo econométrico para describir el comportamiento de la demanda de energía de la industria manufacturera colombiana y de sus principales subsectores en el periodo 1975-1990.

El estudio supone que los consumidores buscan minimizar el costo de la energía consumida en la producción de un determinado conjunto de bienes; se supone adicionalmente que los insumos energéticos son separables del total de factores de producción, para así concentrarse en las relaciones de sustitución y complementariedad entre fuentes energéticas. De esta manera las variables independientes del modelo son los precios de los energéticos, el consumo de energéticos y el volumen de producción. Para la estimación de la función de costos propuesta se utiliza un modelo translogarítmico. De esta función de costos se derivan ecuaciones de participación de costos de los energéticos, cuyos parámetros permiten a su vez calcular elasticidades precio de los energéticos y elasticidades de sustitución entre los mismos. Después de verificar la confiabilidad estadística del modelo se discuten los resultados obtenidos.

1. INTRODUCCIÓN

La demanda de energía de consumidores industriales se puede considerar como una demanda derivada, toda vez que dicha demanda está en función del volumen de producción: las industrias buscan lograr una combinación de los factores de producción que les permita minimizar sus costos asociados con un determinado nivel de producción. Como resultado se tiene que la demanda por los factores de producción depende del nivel de producción, de las posibilidades de sustitución entre dichos factores y de sus precios relativos. A raíz de las crisis energéticas de los años setenta se han llevado a cabo diversos estudios para determinar, hasta qué punto se ha producido la sustitución de la energía como factor de producción y de unas fuentes energéticas por otras.

El estudio aquí presentado busca establecer las características de la demanda de energía por parte de la industria manufacturera colombiana y determinar si en Colombia, al igual que en otras economías, se pueden identificar efectos sustitutivos entre fuentes energéticas como resultados de los cambios de los precios relativos de los energéticos. En el estudio se emplea una función translogarítmica para la estimación de las participaciones de los energéticos en una función de costos. Los parámetros estimados sirven de base para la determinación de las elasticidades precio de los energéticos y de las elasticidades de sustitución entre los mismos. El modelo empleado supone separabilidad débil de los factores de producción, condición que permite evaluar las relaciones de sustitucionalidad o complementariedad entre

insumos dentro de un mismo agregado de factores de producción. Esto significa que no se evalúan en el estudio las relaciones de sustitución del agregado energético por otros factores de producción.

A continuación se presenta el modelo translogarítmico empleado y los principales resultados obtenidos. Para efectos de este artículo se renuncia al tratamiento de los fundamentos económicos del estudio desde el punto de vista de la teoría de costos y de producción.

2. EL MODELO TRANSLOGARITMICO

Una función de producción flexible empleada para la caracterización de relaciones de sustitucionalidad y complementariedad entre factores de producción, especialmente en el campo energético, es el modelo translogarítmico.[2] La flexibilidad del modelo translogarítmico está representada en el hecho de que, a diferencia de otras funciones de producción, supone muy poca información a priori acerca de las relaciones de sustitución entre los factores de producción, pero sin lesionar eso sí las restricciones de regularidad de la teoría de producción.

Mediante la expansión logarítmica de una función de producción lineal homogénea, monótona, diferenciable y cóncava se obtiene la ecuación (1).

$$(1) \quad \ln Y = f(\ln X_k, \ln X_l, \ln X_e, \ln X_m)$$

Donde: X_k : Capital, X_l : Trabajo, X_e : Energía X_m : Otros insumos no energéticos.

El modelo translogarítmico es entonces una aproximación de una función de producción de dichas características mediante un polinomio de Taylor en las variables logarítmicas.[3] La ecuación (2) describe dicho modelo translogarítmico.

$$(2) \quad \ln Y = \ln t + a_0 + \sum_i a_i \ln X_i + \frac{1}{2} \sum_i \sum_j a_{ij} \ln X_i \ln X_j \quad [4] \quad \text{con: } t: \text{ variable de adelanto tecnológico}$$

Es posible demostrar que existe una función translogarítmica de costos dual de la anterior función de producción la cual se puede expresar mediante la ecuación (3):

$$(3) \quad \ln K = b_0 + b_y \ln Y + \sum_i b_i \ln p_i + \frac{1}{2} b_{yy} (\ln Y)^2 + \frac{1}{2} \sum_i \sum_j \ln p_i \ln p_j + \sum_i b_{iy} \ln Y \ln p_i$$

con: p_i : Precio del factor de producción i .

Empleando el Teorema de Sheppard se pueden deducir de la anterior función translogarítmica de costos las ecuaciones de participación de costos para cada uno de los insumos involucrados, S_i , como:

$$(4) \quad S_i = b_i + \sum_j b_{ij} \ln p_j + b_{iy} \ln Y$$

Las ecuaciones de participación de costos así derivadas corresponden a las funciones de demanda de los factores de producción, pues, como es posible demostrar, dichas ecuaciones de participación de costos coinciden con las productividades marginales logarítmicas de los factores de producción.

La función translogarítmica de costos así obtenida debe verificarse en cuanto al cumplimiento de las restricciones de monotonía creciente, linealidad en los precios, simetría, concavidad y de rendimientos marginales constantes para el rango de la función especificado.

Las relaciones de sustitucionalidad pueden derivarse de la función translogarítmica de costos con ayuda de las elasticidades de sustitución parciales de Uzawa-Allen, las cuales están dadas mediante las siguientes expresiones:[5]

$$(5) \quad s_{ij} = \frac{b_{ij} + S_i S_j}{S_i S_j} \quad \text{y} \quad (6) \quad s_{ii} = \frac{b_{ii} + S_i^2 - S_i}{S_i^2}$$

La elasticidad de sustitución s_{ij} , entrega el cambio en la demanda del factor de producción i a un cambio porcentual de un 1% en el precio del factor de producción j , cuando los precios de los demás factores de producción y la demanda del agregado de dicho factor de producción permanecen constantes. Estas elasticidades de sustitución son simétricas y en razón de la forma logarítmica de S_i , adimensionales. A partir de estas elasticidades de sustitución y de las participaciones de costos estimadas es también posible obtener las elasticidades precio parciales de la demanda por los factores de producción como:

$$(7) \quad \varepsilon_{ij} = \sigma_{ij} * S_j \quad \text{y} \quad \varepsilon_{ii} = \sigma_{ii} * S_i$$

La elasticidad precio de la demanda por los factores de producción entrega el cambio porcentual de la cantidad empleada del factor de producción i ante un cambio porcentual de un 1% del precio del factor de producción j . A diferencia de las elasticidades de sustitución estas últimas no se comportan simétricamente.

3. EMPLEO DEL MODELO TRANSLOGARITMICO PARA LA CARACTERIZACION DE LA DEMANDA POR FUENTES ENERGETICAS

La demanda por el factor de producción energía puede entenderse como la demanda por diferentes fuentes energéticas que compiten por la satisfacción de necesidades energéticas en el mercado. De esta manera una función de producción puede expresarse como:

$$(8) \quad Y = f(X_k, X_l, X_{e1}, \dots, X_{en}, X_m, t) \quad \text{con: } e_1, \dots, e_n: \text{ Fuentes de energía}$$

Dados los supuestos de separabilidad débil y homocedasticidad del modelo translogarítmico la anterior ecuación puede expresarse como:

$$(9) \quad Y = f(X_k, X_l, X_e(X_{e1}, \dots, X_{en}), X_m, t)$$

La función X_e representa el agregado del factor de producción energía, que se

compone de las diferentes fuentes energéticas disponibles. Es claro que esta función agregada no es simplemente la media aritmética de los factores de producción individuales, pues este sería el caso únicamente cuando existan relaciones perfectas de complementariedad o sustitucionalidad.

De acuerdo con la teoría de la dualidad la función de costos correspondiente muestra también condiciones de separabilidad débil en los precios, esto es,

(10) $K = g(pk, pl, pe(pe_1, \dots, pe_n), pm, Y)$ con: p_i : Precios de los factores de producción

La variable pe de la anterior ecuación es nuevamente una función de agregación de los precios de las fuentes energéticas individuales, que nuevamente, no es simplemente el promedio aritmético de los precios individuales. Bajo los supuestos de homocedasticidad, esta función agregada de precios es igualmente lineal homogénea, monótona creciente y cóncava. Como pe es el precio del factor de producción energía y bajo los supuestos de separabilidad del modelo, es entonces posible emplear la función translogarítmica de costos como forma funcional para pe , en donde las correspondientes ecuaciones de participación de costos se encuentran, cumpliendo las mismas restricciones que en la ecuación (4) como:

$$(11) \text{Se}_i = b_i + \sum_j b_{ij} \ln p_i + b_{yi} \ln Y$$

Las elasticidades precio de la demanda por los factores de producción y las elasticidades de sustitución derivadas suponen, dadas las restricciones de separabilidad del modelo, que no se presentan sustituciones del agregado energético por otros factores de producción.

4. PRUEBA EMPIRICA DEL MODELO

El modelo translogarítmico fue empleado para el estudio de las relaciones de sustitución y complementariedad entre energéticos en la industria manufacturera colombiana en general y en los cinco principales subsectores manufactureros desde el punto de vista del consumo de energía en el período 1975-1990. Estos subsectores, responsables durante todo el periodo de estudio de más del 85% del consumo energético en el sector industrial manufacturero son: la industria de alimentos y bebidas, la industria química, la industria de transformación de piedras y arenas, la industria del papel y productos del papel y las industrias metálicas básicas ferrosas y no ferrosas. Como fuentes energéticas se consideraron el carbón, el gas natural, el petróleo crudo, los derivados del petróleo (Fuel Oil, Diesel Oil, Kerosene, GLP) y la electricidad.

Los datos con respecto al volumen de producción del sector industrial manufacturero y de los subsectores analizados fueron obtenidos de la Encuesta Anual Manufacturera realizada por el Departamento Nacional de Estadística (DANE). Información con respecto al consumo por fuente energética fue tomada de los balances energéticos producidos y publicados por el Sistema de Informaciones Energéticas del Ministerio de Minas y Energía. Los índices de precios empleados fueron construidos a partir de series de precios recopilados en las diferentes empresas encargadas del manejo

de los recursos energéticos en el país: La Empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL) en el caso del gas natural, petróleo y sus derivados, Carbones de Colombia S.A. (CARBOCOL), hasta el año 1990 responsable del manejo del recurso carbonífero y las empresas eléctricas en el caso de la electricidad. Los precios empleados para la construcción de los índices de precios fueron promedios nacionales de los precios de cada fuente energética para consumidores industriales.

El modelo a estimar se compone del siguiente conjunto de ecuaciones simultáneas:

$$(12) \quad Sei = bi + \sum_j bijLnPj + byiLnY + ui$$

Este requiere ser estimado mediante el empleo de un método interdependiente. Por tal razón para la estimación del modelo se empleó el método iterativo *SUR* (*seemingly unrelated regressions*), que estima simultáneamente los parámetros de un conjunto de ecuaciones y permite la inclusión de las restricciones propias del modelo translogarítmico. Para cada subsector y para el sector industrial manufacturero en general se plantearon dos modelos a estimar: un modelo no homotético, el cual incluye el volumen de producción como variable independiente; en este caso los parámetros estimados *biy* representan las elasticidades producto directas de la demanda de energía. el caso homotético supone de otra parte que los parámetros *biy* son nulos.

Como soporte de software se empleó para la estimación del modelo el procedimiento *Model* del módulo de econometría del programa estadístico SAS.

5. RESULTADOS OBTENIDOS

La Tabla 1 muestra los resultados de los tests estadísticos de la estimación. Aparte de la prueba Durbin-Watson se ejecutaron tests adicionales para verificar cada una de las condiciones de regularidad del modelo. De allí se desprende que los resultados de la estimación en términos generales pueden catalogarse como estadísticamente significativos.

La Tabla 2 presenta las elasticidades de sustitución calculadas para el caso homotético a partir de los valores estimados de *Si*. Las elasticidades de sustitución son significativas estadísticamente en la mayoría de los casos. Problemas de significancia se encuentran para aquellos energéticos con una baja participación de costos, dada la relación inversa entre las elasticidades de sustitución y las participaciones de los energéticos evidenciada en la ecuación (5). Los resultados obtenidos permiten observar una fuerte relación de sustitución entre los derivados del petróleo y los demás energéticos considerados con excepción de la electricidad. Sobre todo se aprecia la sustitucionalidad de los derivados del petróleo por crudo tanto en la industria manufacturera en general como en los subsectores considerados individualmente. Para las elasticidades de sustitución entre gas natural y crudo así como gas natural y carbón se observan en todos los subsectores con excepción de la industria química en el primer caso y de la industria del papel en el segundo, valores positivos, lo cual indica una capacidad de sustitución significativa del gas natural

por estos energéticos. Por el contrario, las elasticidades para el caso del carbón, especialmente con relación al petróleo crudo, indican ante todo una relación de complementariedad. En general las elasticidades derivadas de la estimación parecerían indicar un alto potencial de sustitución entre combustibles.

La electricidad muestra con respecto a los demás energéticos una relación ante todo de complementariedad, con algunas excepciones como es el caso con respecto al petróleo crudo en la industria química, la industria papelera y la industria de alimentos y bebidas.

6. CONCLUSIONES

Las elasticidades de sustitución presentadas en este trabajo así como las de precio calculadas a partir de los valores estimados muestran en general las características esperadas de la racionalidad económica y permiten deducir importantes conclusiones para el periodo considerado.

Por una parte, los resultados confirman los procesos de adaptación (sustitución) entre energéticos observados durante el periodo en cuestión en la industria manufacturera colombiana, que han estado determinados entre otras cosas por la situación de oferta de los energéticos en el país y por las políticas de promoción al consumo de determinados combustibles. Importantes procesos de sustitución se han dado en el caso de los derivados del petróleo, por gas natural en primer lugar y luego por petróleo crudo y carbón. La razón para ello parece encontrarse en la variación de los precios relativos de estos energéticos.

En el caso de la electricidad su preponderante relación de complementariedad con respecto a los demás energéticos considerados puede atribuirse a su poca posibilidad de sustitución en los usos específicos de electricidad. En general puede afirmarse que existen amplias posibilidades de sustitución en los mercados energéticos para generación de vapor y calor mientras en los usos específicos de electricidad estas posibilidades son reducidas o inexistentes.

Por otra parte los resultados obtenidos permiten deducir que la relación de dependencia de la demanda por una fuente energética a cambios en los precios relativos de los energéticos está en función de la composición del agregado energético de cada subsector, lo cual está representado en el modelo por el conjunto de ecuaciones de participación de costos de los energéticos considerados.

Tabla 1. Resumen de los resultados de las pruebas estadísticas realizadas.^a

Ecuación / Test	Total industria manufacturera	Industria química	Industria de piedras y arenas	Industria del papel	Industrias metálicas	Industria de alimentos y bebidas
Participación del carbón R ²	0.9401	0.9535	0.6222	0.7333	0.1471	0.8582
Durbin-Watson	1.810	1.684	0.934	1.643	2.161	1.485
Participación de la electricidad R ²	0.9607	0.7020	0.9463	0.8617	0.6879	0.9050
Durbin-Watson	2.125	1.381	2.266	1.574	0.955	1.345
Participación del crudo R ²	0.6783	0.8029	0.5170	0.1768	0.0746	0.6113
Durbin-Watson	0.777	0.880	0.909	0.687	1.988	0.459
Participación de derivados R ²	0.7048	0.8453	0.6108	0.8166	0.5678	0.6711
Durbin-Watson	0.594	0.749	1.021	1.381	0.439	0.524
Monotonía ^b	100%	100%	100%	96,25%	97,5%	98,75%
Concavidad ^c	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Homocedasticidad ^d	3,35	1,70	5,67	8,34	6,06	20,00
Estabilidad ^e	0.1053	0.4794	0.4493	1.4788	1.6782	1.3582

^a Acerca del diseño de los tests estadísticos realizados se recomienda recurrir al documento original. Se presentan aquí solamente los resultados de las pruebas del caso homotético. El sistema de ecuaciones excluyendo la ecuación correspondiente al gas natural presenta en todos los casos mejores resultados, por tanto se muestran aquí los resultados de la estimación del conjunto de ecuaciones simultáneas sin incluir dicha ecuación. ^b Porcentaje de las ecuaciones de participación de costos que son positivas. ^c Porcentaje de las matrices de Hesse que cumplen la condición de ser negativas definidas. ^d El valor crítico del estadístico F para la prueba de homocedasticidad con $v_1=4$ y $v_2=46$ y para un error del 1% es 3,391. ^e El valor crítico del estadístico F para la prueba de estabilidad con $v_1=16$ y $v_2=30$ y para un error del 2,5% es 3,28.

Tabla 2. Valores promedio de las elasticidades de sustitución entre energéticos para el periodo 1975-1990.*

Elasticidades	Total industria manufacturera	Industria química	Industria de piedras y arenas	Industria del papel	Industrias metálicas	Industria de alimentos y bebidas
Scarbón-carbón	-6,953 (0,239)	2,335 (5,116)	-2,208 (0,080)	-1,741 (0,068)	-3783,76 (2335,0)	20,386 (6,219)
Scarbón-gas	7,752 (0,6639)	4,983 (0,472)	2,521 (0,081)	-0,018 (0,125)	270,579 (480,9)	3,466 (0,577)
Scarbón-electricidad	-1,022 (0,066)	-1,402 (0,184)	-1,067 (0,024)	0,076 (0,017)	-16,701 (7,521)	-0,624 (0,141)
Scarbón-crudo	-7,660 (1,240)	-39,360 (5,586)	-5,034 (1,591)	3,844 (5,198)	-46,217 (21,85)	-46,11 (26,51)
Scarbón-derivados	2,827 (0,221)	2,046 (0,444)	11,973 (2,578)	3,368 (0,430)	89,712 (33,40)	3,948 (0,544)
Sgas-gas	-7,136 (0,475)	-3,096 (0,200)	-4,342 (0,111)	-5,997 (1,162)	-1797,42 (1378,0)	-28,433 (4,115)
Sgas-electricidad	-1,236 (0,094)	-0,388 (0,057)	0,844 (0,006)	-2,434 (0,456)	-4,250 (2,011)	-1,622 (0,737)
Sgas-crudo	8,707 (1,897)	-0,686 (0,332)	3,105 (0,663)	3,121 (3,356)	115,93 (55,13)	39,348 (48,44)
Sgas-derivados	6,716 (0,614)	41,652 (15,28)	2,258 (0,279)	26,320 (4,284)	27,438 (9,271)	26,338 (5,697)
Selectricidad-electricidad	0,539 (0,021)	0,667 (0,029)	0,117 (0,033)	0,445 (0,014)	0,449 (0,003)	0,207 (0,004)
Selectricidad-crudo	-0,990 (0,420)	4,656 (0,8279)	-1,035 (0,694)	5,193 (6,074)	-1,970 (0,128)	3,510 (1,667)
Selectricidad-derivados	-0,493 (0,070)	-14,713 (5,197)	-0,463 (0,245)	-1,481 (0,298)	-1,311 (0,163)	-1,074 (0,168)
Scrudo-crudo	-154,94 (54,65)	-613,6 (209,1)	-51,678 (25,77)	-5257,36 (5087,0)	-43,516 (2,893)	-6730,69 (6476,0)
Scrudo-derivados	15,060 (1,683)	28,381 (6,622)	37,111 (5,5029)	2,072 (51,10)	15,985 (1,775)	57,543 (33,86)
Sderivados-derivados	-8,851 (0,841)	76,795 (62,56)	-187,23 (73,41)	-45,937 (10,83)	-2,506 (0,199)	-12,667 (1,654)

* Resultados del modelo homotético. Error standard entre paréntesis.

REFERENCIAS

- [1] Pérez Alemán, Y. O., *Die Endenergienachfrage der verarbeitenden Industrie Kolumbiens. (La demanda de energía final de la industria manufacturera colombiana)* Estudio presentado en la Technische Hochschule Darmstadt, 1992.
- [2] Entre los trabajos que emplean dicha función en el campo energético se cuentan entre otros: Christensen, L. R. / Jorgenson, D. W. / Lau, L. J. *Conjugate Duality and the Transcendental Logarithmic Function*, *Econometrica*, Vol. 39, pp. 255-256., Berndt, E. / Christensen, L. R., *The internal Structure of functional Relationships: separability, substitution and aggregation*, *the Review of Economic Studies*, Vol. 40, pp. 403-410., Magnus, J. / Woodland, D. *Interfuel Substitution in Dutch Manufacturing*, *Applied Economics*, Vol. 19, pp. 1639-1664.
- [3] Acerca de la expansión de Taylor véase Hippmann, H.-D., et al. *Preiselastizitäten der Energienachfrage. Eine ökonomische Analyse für verschiedene Wirtschaftszweige der Bundesrepublik Deutschland*, *Jahrbuch für Sozialwissenschaft*, Vol. 33, pp. 139-159. pág. 142.
- [4] Esta ecuación supone que la variable adelanto tecnológico actúa en forma neutral, en donde la productividad marginal logarítmica es independiente del adelanto tecnológico. El volumen de producción se obtiene mediante multiplicación de dicha función logarítmica con la función de progreso tecnológico. De esta manera el análisis se puede concentrar en la función $\ln Y(X_i)$ sin lesionar los supuestos de rendimientos marginales constantes y de neutralidad del progreso tecnológico. Al respecto véase Berndt, E. / Christensen, L. *The Translog Function and the Substitution of Equipment, Structures and Labor in U.S. Manufacturing 1929-1968*, *Journal of Econometrics*, Vol. 1, pp. 81-114. pág. 85.
- [5] Véase Fuss, M. / Hyndman, R. / Waverman, L. *Residential, Commercial and Industrial Demand for Energy in Canada: Projections to 1985 with three alternative Models*, pp. 151-179. en: *International Studies of the Demand for Energy*, Nordhaus, W. (ed.). New York, North Holland, 1976. y Berndt, E. / Wood, D. *Technology, Prices and the derived Demand for Energy*, *Review of Econometrics and Statistics*, Vol. 57, pp. 259-268.

¹ Las referencias aquí presentadas son tan sólo una parte del total de referencias utilizadas. La publicación del estudio contiene la relación completa de las referencias empleadas.