

Capítulo 18

Aplicación del modelo de frontera estocástica de producción para analizar la eficiencia técnica de la industria eléctrica en México

Alexander Galicia & Miguel Flores

A.Galicia & M.Flores

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESE-IPN, Plan de Agua Prieta 66, Unidad Profesional Lázaro Cárdenas, Col. Plutarco Elías Calles, Delegación Miguel Hidalgo, C.P. 11350, México, Distrito Federal.
alex_finster@hotmail.com

M.Ramos, F.Miranda (eds.) *Optimización-Estocástica-Recursiva-Coherente-Sistémica y sus variantes (probabilidad, econometría y estadística aplicada)*, Temas Selectos de Optimización-©ECORFAN-Santiago de Compostela, España, 2012.

Abstract

This paper analyzes the technical efficiency of the electricity industry in Mexico for ten types of power generation in the period 2000-2009. We study the allocation of inputs for the production of electricity and are divided according to the type of generation in relation to the input used to estimate a stochastic frontier model of production and determine the relevance for each type of generation.

To make the estimate a panel data structure with 300 samples, representing three explanatory variables for the ten types of electricity generation. The results indicate that the electricity production plants, representing different production frontiers determined by production capacity and production inputs using means that are heterogeneous components, so an energy policy for the electricity industry must take into account this heterogeneity.

18 Introducción

La energía eléctrica es un insumo indispensable en toda actividad económica, por lo tanto su estudio es fundamental en la economía por ser un sector estratégico que influye en el crecimiento económico del país. La producción de electricidad depende de la tecnología y los insumos que se utilizan en la producción, por lo que para cada insumo existe una tecnología específica, que presenta ventajas, desventajas y una gama de posibilidades de producción, con esta información los operadores de un sistema de potencia seleccionan el conjunto de medios de producción que permite satisfacer la demanda de electricidad al menor costo posible, una pregunta que se debe contestar desde el punto de vista económico es si la producción es eficiente a partir de las restricciones en la disponibilidad y el costo de los insumos tal es el caso del agua.

Por otro lado, el análisis de la producción de energía eléctrica toma en cuenta la participación total de los factores que se utilizan, las restricciones técnicas y económicas para determinar la eficiencia de la producción, que se utiliza para discutir la política energética y el efecto de las medidas de regulación. Existen varias técnicas para determinar la eficiencia pero en este trabajo solo se utiliza el método de la frontera eficiente.

Cuando se analizan las decisiones de producción a partir de la teoría económica se encontraron dos condiciones que violan el concepto de producción eficiente; la primera corresponde al caso en el que se presenta un desequilibrio entre los costos marginales y los ingresos marginales, el cual es independiente del número de factores que se tome en cuenta en la evaluación; condición que permite afirmar que la asignación de recursos para la producción es ineficiente; la segunda condición corresponde al caso en el que dentro del proceso de producción no es posible obtener la mayor producción, dado un conjunto de insumos y se asume que existe una ineficiencia técnica. Cuando se realiza un estudio de eficiencia técnica en donde se aplican bienes y recursos, se asume que la eficiencia se obtiene al medir el grado con el que los individuos aplican de manera óptima los recursos escasos que se utilizan en el proceso de producción. Las técnicas económicas que se conocen para medir la eficiencia técnica y de asignación, integran elementos que explican el grado de eficiencia del proceso, independientemente del nivel de sofisticación matemática que utilizan. Sin embargo, en la ciencia económica no existe un método preciso que determine el grado de eficiencia por lo que se ha recurrido a los métodos de aproximación estocástica para establecer la eficiencia de la producción.

Por otra parte, la introducción conceptual de un crecimiento constante en lugar de un estado estacionario en los modelos económicos de evaluación de la eficiencia, permite establecer la mejor práctica productiva explicada por un conjunto de factores que establecen las diferencias en las tasas de crecimiento y productividad.

En la literatura sobre el tema se encuentran dos posturas para la formulación y evaluación de la eficiencia de la producción, por un lado se han desarrollado modelos de equilibrio y por otro modelos de optimización que buscan determinar el nivel de eficiencia en la producción, en el caso de las técnicas de programación lineal para la evaluación de la eficiencia se encontró que existe similitud entre la asignación de recursos de cada tipo de generación.

El propósito de este trabajo, es evaluar la eficiencia técnica de la industria eléctrica a partir de la frontera estocástica de producción, y establecer la participación de los diferentes grupos de tipos de generación en la determinación de la eficiencia del sector y contrastar las principales técnicas para determinar la frontera estocástica de producción.

El marco teórico que soporta el trabajo corresponde a la teoría de la frontera estocástica de producción introducida por Farrell (1957), en su trabajo establece el concepto de eficiencia de la producción y su desempeño; también muestra cómo se define la relación entre costos y beneficios orientada a la búsqueda de la mejor manera de realizar una función o tarea, siempre con el objetivo de promover el uso racional de los recursos. Por otro lado, en el trabajo de Aigner, Lovell y Schmidt (1977), se incorpora una metodología para medir la eficiencia mediante la frontera estocástica de producción, que corresponde a una mejora a la propuesta de Meeusen y Van den Broeck (1977), todos inspirados en el trabajo de Farrell (1957).

Battese y Coelli (1988,1992), a partir de la definición teórica de la función de producción estocástica que expresa la cantidad máxima de producción que es posible obtener a partir de un conjunto de insumos y una tecnología específica, utilizan la evidencia empírica al aplicar técnicas econométricas a modelos de frontera estocástica.

Los resultados que se presentan en esta investigación, siguen la línea de pensamiento de Farrell y se aplica para determinar la eficiencia de la industria eléctrica en México, y para evaluar las prácticas y políticas de operación que se aplican en la producción de electricidad.

El trabajo se encuentra organizado en seis apartados, el primero corresponde a una introducción, en el segundo se hace un esbozo teórico donde se tratan los supuestos y aspectos más relevantes para el estudio de la eficiencia; en el tercero se analiza de la literatura sobre la eficiencia de la producción, y se discuten tres métodos de estudio; se dedica el cuarto apartado a la medición de la eficiencia, especificación teórica y metodológica del modelo de la frontera estocástica de producción, así como los métodos para estimarla; en el quinto apartado, se analiza la eficiencia técnica de la industria estableciendo diez tipos de generación de electricidad y se diseña un panel de datos con información de diez años, se muestra la evidencia empírica y se analizan resultados. Finalmente, en el último apartado se presentan las principales conclusiones.

18.1 Argumentos teóricos referentes al concepto de eficiencia

Desde el punto de vista de la teoría microeconómica el término eficiencia se relaciona con la asignación de recursos, por lo que la eficiencia se logra cuando se proporciona a los consumidores, la combinación óptima de bienes y servicios que satisfacen sus necesidades de la mejor forma posible, al considerar una cantidad de insumos y tecnología limitada.

Por otro lado, se dice que hay eficiencia cuando no existe una reasignación de recursos para mejorar el bienestar de un individuo sin empeorar el de otro; en condiciones de eficiencia de asignación solo es posible aumentar la satisfacción o utilidad de un individuo reduciendo la de otro, tal como lo refiere la ley de Pareto.

A partir de Farrel (1957), quien fue el primer autor en conceptualizar y medir la eficiencia; en su trabajo propone una perspectiva real donde cada unidad productiva se evalúa en relación a un grupo representativo y homogéneo, la idea central ha evolucionado y relaciona dos conceptos importantes, el primero corresponde a la eficiencia técnica y el otro a la eficiencia de asignación.

De acuerdo a Pinzón (2003), la eficiencia económica es la maximización de los beneficios en términos de la asignación dinámica de los bienes escasos para la producción al menor costo posible.

Por otro lado, Paramo (1995), presenta que la eficiencia técnica es la capacidad de transformar factores de la producción como el de trabajo y el capital en bienes y servicios, en donde la tecnología está inmersa en la función de producción que determina el valor máximo o la frontera de producción.

Trabajos posteriores como el de Banker, Charnes y Cooper (1984), dividen el concepto de eficiencia técnica en eficiencia pura y eficiencia de escala, y presentan un modelo de rendimientos variables para determinar el nivel de eficiencia; el cual presenta una mejora con respecto al modelo de Farrel porque incorpora el concepto de rendimientos variables. La eficiencia técnica pura, corresponde a la medida en que cada unidad producida corresponde al máximo producto que se puede obtener a través de un cantidad de insumos disponibles, mientras que la eficiencia de escala representa el aumento en el rendimiento al modificar la dimensión de las unidades de producción, por lo tanto; la eficiencia técnica global corresponde al producto de ambas eficiencias.

La teoría microeconómica indica que la eficiencia de asignación, tiene relevancia cuando no se hace un mal uso de los recursos, es decir no se desperdician recursos en un proceso productivo y adicionalmente se cumple con el principio del óptimo de Pareto (1906). Otros elementos relacionados con concepto de eficiencia de asignación, corresponde a los costos y precios que refieren a un gasto total en términos monetarios y que se utilizan para producir una cantidad determinada de bienes, es decir, la eficiencia de asignación de recursos monetarios que determina el mínimo posible de acuerdo con los precios de los insumos. La eficiencia de asignación se encuentra estrechamente relacionada con el cumplimiento de los objetivos en cada unidad de producción y está relacionada con la gestión operativa, en donde se llevan a cabo las decisiones de producción para alcanzar la frontera de producción, a partir de todas las combinaciones óptimas de recursos y actividades, esto es que no se puede mejorar el objeto de producción o mejorar el nivel de producción sin consumir una mayor cantidad de insumos.

18.2 La eficiencia productiva de la industria eléctrica en México

A la fecha no se encuentran estudios documentados sobre la eficiencia productiva de la industria eléctrica mexicana bajo el enfoque económico de la frontera estocástica de producción, por lo que representa un área poco explorada y que motiva el interés de este trabajo.

En el análisis de la literatura sobre la eficiencia de la producción, se discuten tres métodos de estudio: i) determinístico, ii) el método probabilístico y iii) el método de estimación estocástica.

Los dos primeros métodos requieren para el análisis una muestra representativa para observar el comportamiento de las variables de interés.

Por lo que dada la complejidad del problema y la enorme cantidad de información que se requiere, se decidió hacer un estudio de forma agregada por tipo de generación, para un periodo de diez años que es la base del estudio empírico; y se eligió el tercer método de estudio, el cual requiere de una clasificación de la información para estimar la frontera estocástica de producción; y se basa en una técnica de estimación paramétrica que incorpora un error de especificación que incluye las perturbaciones y que corresponde al nivel de tecnología empleado.

18.3 Medición de la eficiencia

Level (1993) menciona que para medir la eficiencia se deben tomar en cuenta los desequilibrios producidos por el uso de los factores, por lo que en el caso de la eficiencia técnica se consideran los factores sobre los que tiene control el productor y en el caso de la eficiencia de asignación, se toman en cuenta los factores que están fuera del control del productor. Con esto se explica la modificación entre precios proyectados y precios observados que corresponden a la subvaluación o sobrevaluación de la producción. Por lo tanto, si se consideran los argumentos de Level (1993), la eficiencia se puede medir al aplicar el uso de las técnicas de frontera estocástica de producción, que relacionan la distancia que existe entre una observación y el valor que predice un modelo teórico. Los modelos de frontera más utilizados son los de producción y de costos; los primeros permiten estimar la eficiencia técnica relacionando la distancia entre la producción observada y la frontera que representa el producto máximo que se puede obtener dado un vector de insumos, el cual representa la cantidad de salida de producto máximo, y se puede expresar matemáticamente de la siguiente forma:

$$Q_i = f(X_i, \beta) - \varepsilon_i \quad (18.1)$$

Donde:

Q_i – Cantidad observada de salida micro i -ésima unidad

X_i – Vector de niveles de entrada para la micro i –ésima unidad

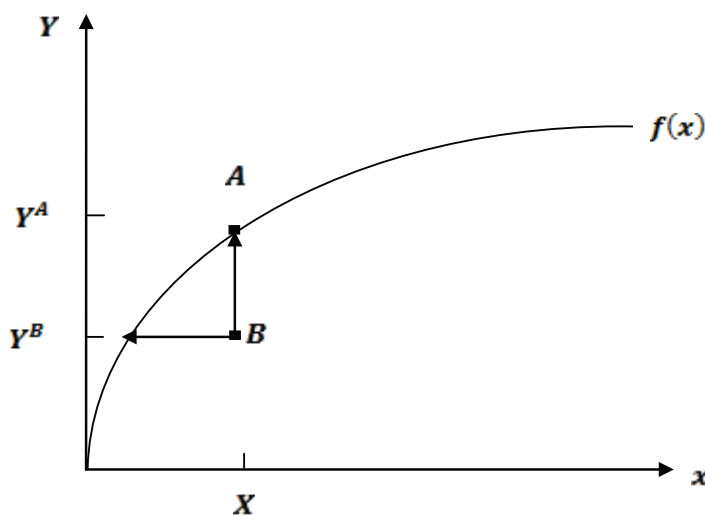
$f(x)$ – Frontera de producción

β – Parámetro del vector

ε_i – Error estocástico para la micro i –ésima unidad

Dada la expresión 1 se desarrolla la figura 18.1, que muestra que las unidades de producción que se localizan en la frontera **A** son eficientes; por otro lado, todas las unidades de producción que se localizan fuera de la frontera son ineficientes como es el caso del punto **B**, en este caso la eficiencia de la producción se puede mejorar al modificar el vector de insumos como lo menciona Lovell y Kumbakar (2000).

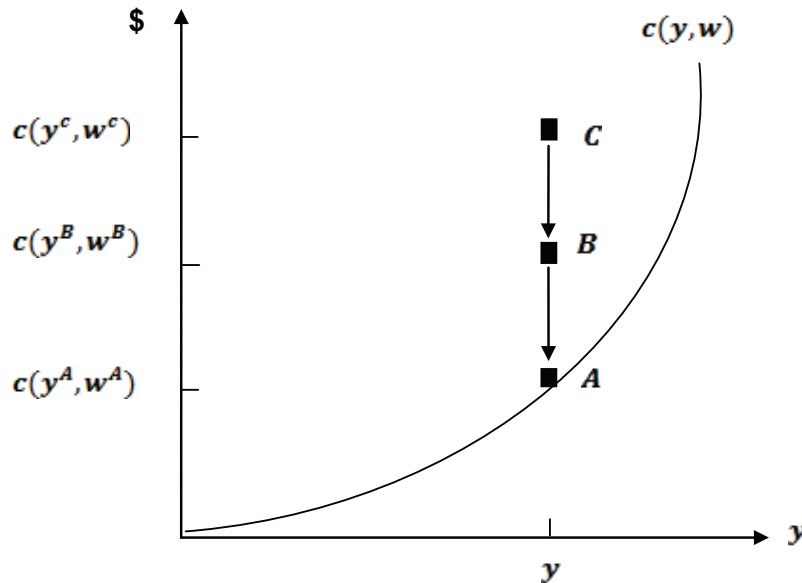
Figura 18.1 Medición de la eficiencia técnica para una frontera de producción



Fuente: Kumbhakar y Lovell (2000).

Cuando el análisis se realiza bajo el enfoque de la frontera de costos; la eficiencia económica se mide como la diferencia entre los costos observados y el costo mínimo, que corresponde a la frontera, como lo muestra la figura 18.2; en este caso la unidad producida que representa el punto **A** es óptimo por que representa el mínimo costo para la unidad de producción con un conjunto de insumos, por lo tanto; un punto alejado de la frontera resulta ineficiente.

Figura 18.2 Medición la eficiencia económica para una frontera de costos



Fuente: Kumbhakar y Lovell (2000).

Por otro lado, es importante retomar la afirmación que hace Green (1993), dentro del análisis de medición de la eficiencia, respecto a que un productor puede operar bajo condiciones de eficiencia técnica, pero puede ser ineficiente bajo el enfoque de costos. La opinión que tiene Barrow (1988) al respecto, es que las funciones de producción pueden medir la eficiencia técnica, dado que las cantidades de insumos están dadas y pueden estar asignadas de forma no óptima. Mientras que las funciones de costos, miden la suma de la ineficiencia técnica y la de asignación.

De acuerdo con Kalirajan y Shand (1999), medir la eficiencia es importante porque: a) indica la eficiencia relativa en distintas unidades productivas; b) cuando se presentan diferencias en las unidades de producción, se podrían identificar los factores causantes de esas diferencias; y c) se pueden definir políticas para mejorar el nivel de eficiencia.

18.4 Forma general del modelo de frontera estocástica de producción

Teóricamente una frontera de producción $f(x)$ se define como la cantidad máxima de producto Q_i , que una determinada firma puede producir dado un conjunto de insumos X_i , determinando el límite superior de posibilidades de producción Q^∞ , dada una mezcla óptima de insumo-producto, que se ubica por arriba o por debajo de la frontera estimada $f(x)'$. La capacidad de que una unidad de producción permita maximizar el producto, dado un conjunto particular de insumos corresponde al concepto de eficiencia técnica.

La forma funcional linealizada de la función de producción Cobb-Douglas es el origen del desarrollo de la frontera de producción estocástica, y uno de los aspectos analizados en este estudio es el término estocástico de perturbación ε . Para la i -ésima unidad productiva, el término aleatorio está compuesto por ruido simétricamente distribuido ($v_i \sim N[0, \sigma_v^2]$) y por un término negativo de ineficiencia (u_i distribuido como seminormal $u_i \sim N^-[u, \sigma_u^2]$), los cuales son distribuidos entre sí de forma independiente considerando a $\varepsilon = v_i + u_i$.

Una función de producción para la i -ésima unidad productiva, dado un conjunto de insumos X_{it} , se expresa como:

$$Y_{it} = f(X_{it}, \dots, X_{itk}; \beta) \exp(v_{it} - u_{it}) \quad (18.2)$$

Donde:

Y_{it} – Producto de la i -ésima unidad

β – Parámetro que asocia las entradas de insumos con producto

Por lo tanto, en la estimación de la producción en la frontera eficiente se excluye el parámetro de ineficiencia denotado por u_{it} y se representa por la siguiente expresión:

$$Y_{it} = f(X_{1it}, X_{2it}, \dots, X_{kit}; \beta) \exp(v_{it}) \quad (18.3)$$

La razón de producción para una unidad productora con respecto a su frontera es entonces: $\exp(-u_{it})$, como una medida de la ineficiencia técnica de la i -ésima unidad estudiada y se escribe como:

$$(ET): ET_{it} = \exp(-u_i) \quad (18.4)$$

Al afirmar que el término de error aleatorio ε se encuentra simétricamente distribuido en $Y_{it} = X_{it}\beta_{it} + \varepsilon = X_{it}\beta_{it} + (v_{it} - u_{it})$, se observa que si v es simétrico y u es no negativo, entonces ε es asimétrico y al aplicar el término de esperanza se tiene:

$$E\varepsilon = E(v_{it} - u_{it}) = E_u < 0. \quad (18.5)$$

18.4.1 Programación lineal para estimar la frontera estocástica de producción de la industria eléctrica

Para evaluar la aplicación de la frontera estocástica de producción mediante programación lineal, se utiliza el método de mínimos cuadrados ordinarios considerando los siguientes aspectos:

- $u_{it} > 0 \Rightarrow \varepsilon (v_{it} - u_{it})$ es sesgada y existe ineficiencia técnica. Si

$u_{it} < 0 \Rightarrow \varepsilon(v_{it} - u_{it})$ es simétrica y los datos no reflejan la ineficiencia técnica. Por otro lado, es necesario estimar la especificación de $Y_{it} = X_{it}\beta_{it} + (v_{it} - u_{it})$, para esto, las funciones de densidad de v normal y de u seminormal se escriben como:

$$f(v_{it}) = (2\pi\sigma_v^2)^{-\frac{1}{2}} \exp[-v^2(2\pi\sigma_v^2)^{-1}] \quad (18.6)$$

Y,

$$f(u_{it}) = (2\pi\sigma_u^2)^{-\frac{1}{2}} \exp[-u^2(2\pi\sigma_u^2)^{-1}] \quad (18.7)$$

Si los vectores aleatorios v_{it} y u_{it} se consideran independientes, su densidad conjunta es el producto de sus densidades individuales:

$$f(u_{it}, v_{it}) = (\pi\sigma_v\sigma_u)^{-1} \exp[-v^2(2\pi\sigma_u^2)^{-1} - u^2(2\sigma_u^2)^{-1}] \quad (18.8)$$

Si $\varepsilon = v_{it} - u_{it}$, entonces la densidad conjunta de u_{it} y ε_{it} se escribe como:

$$f(u_{it}, v_{it}) = (\pi\sigma_v\sigma_u)^{-1} \exp[-v^2(2\pi\sigma_u^2)^{-1} - u^2(2\sigma_u^2)^{-1}] \quad (18.9)$$

Una forma de obtener la densidad marginal de ε_{it} como lo plantean Kumbhakar y Lovell (2000), es integrando a u_{it} de $f(u_{it}, \varepsilon_{it})$, mediante la siguiente expresión:

$$f(\varepsilon_{it}) = \int_0^{\infty} f(u_{it}, \varepsilon_{it}) du = 2\sigma^{-1} \phi(\varepsilon\sigma^{-1}) \Phi(-\varepsilon\lambda\sigma^{-1}), \quad (18.10)$$

Donde $\sigma = [\sigma_u^2 - \sigma_v^2]^{\frac{1}{2}}$, $\lambda = \frac{\sigma_u}{\sigma_v}$, y $\phi(t)$ y $\Phi(t)$, son funciones de densidad y de distribución normal.

Por lo tanto, se puede concluir que el logaritmo natural para obtener estimadores con máxima verosimilitud para una muestra de n unidades productivas, con una constante k es maximizando la siguiente expresión:

$$\ln L = k - n \ln \sigma + \sum \ln \phi(-\varepsilon_{it} \lambda \sigma^{-1}) - (2\sigma^2)^{-1} \sum \varepsilon_{it}^2 \quad (18.11)$$

Encontrado el conjunto de estimadores se realiza la estimación de eficiencia técnica para cada elemento, tomando en cuenta los supuestos mencionados anteriormente y aplicando el método de mínimos cuadrados ordinarios donde: si $\varepsilon_{it} > 0$, u_{it} no es muy grande y se determina que la unidad productora es técnicamente eficiente. Por otro lado, si $\varepsilon_{it} < 0$, entonces u_{it} es muy grande y se considera que la unidad productora es ineficiente.

Finalmente, es necesario separar la información que ε_{it} contiene sobre u_{it} mediante la obtención de la distribución condicional de u_{it} dado ε_{it} , la idea es calcular los parámetros de interés y estimar la eficiencia técnica para cada unidad productora la cual se denota por:

$$ET_{it} = \exp(-\widehat{u}_{it}) \quad (18.12)$$

Para ello, se puede retomar la propuesta hecha por Battese y Coelli (2005), que se escribe como:

$$ET_{it} = E[\exp(u_i) | \varepsilon_i] = \frac{1 - \phi(\sigma_u - \frac{u_i}{\sigma_u})}{1 - \phi(-u_i/\sigma_u)}. \quad (18.13)$$

18.4.2 Panel de datos para estimar la producción de electricidad

La metodología que se utiliza en este trabajo para determinar la frontera estocástica de producción, se basa en el planteamiento de una función de máxima verosimilitud que se soluciona con la ayuda de un modelo de datos de panel y por el método de mínimos cuadrados ordinarios, tomando en cuenta efectos fijos y efectos aleatorios; de forma alternativa la solución se logra al utilizar un modelo de programación lineal.

Como lo plantea Mundlak (1961), el uso de datos de panel se adapta fácilmente a las relaciones de producción, lo que se corrobora en este trabajo encontrando que las variables que afectan a la producción están correlacionadas con la utilización de los insumos. La idea de construir un panel de datos es visualizar las características no observadas a simple vista, que pueden estar correlacionadas con el nivel de producción de cada tipo de generación.

Asimismo, se utilizan los hallazgos de los pioneros en el uso de datos de panel para analizar fronteras estocásticas de producción como lo hicieron Pitt y Lee (1981), y mejorados por Schmidt y Sickles (1984), quienes identificaron tres ventajas para este tipo de análisis:

- La independencia entre x_{it} y u_{it} , permite una relajación en la estimación de datos de corte transversal.
- La especificación de la distribución para v_{it} y x_{it} , requiere datos de corte transversal para estimar el nivel de eficiencia de la empresa.
- El nivel de eficiencia de la empresa se estima con mayor precisión en el caso en que $T_{\rightarrow\infty}$ se evite.

18.4.3 Especificación del modelo para la industria eléctrica

Para el estudio se diseñó un panel de datos compuesto por 300 observaciones, que corresponde a las observaciones del periodo para cada tipo de generación, la suma representa la generación total de energía eléctrica en GWh para el país, los datos corresponden a 10 tipos de generación en el periodo 2000-2009.

El análisis de la eficiencia, se logra por un proceso de ajuste de mínimos cuadrados para la función de producción, con el objetivo de evaluar la eficiencia técnica en el proceso de generación de electricidad para cada tipo de producción.

Por lo tanto, la especificación del modelo a estimar se escribe como:

$$Y_{it} = \beta_1 + \beta_2 X_{2it} + \beta_3 X_{3it} + \mu_{it} \quad (18.14)$$

Donde:

Y_{it} – Generación total real

β_{it} – Coeficiente de elasticidad

X_{2it} – Factor de planta

X_{3it} – Frontera heurística

i – i -ésima central transversal

t – Tiempo (año).

Se seleccionan 30 variables transversales a las que a cada una se les asocia grupos de centrales generadoras con características similares; el periodo de estudio abarca 10 años de 2000 a 2009. En el modelo se asume que las variables X_{it} son determinísticas y la estructura de probabilidad del término de error μ_{it} , corresponde a una distribución normal $E(\mu_{it}) \sim N(0, \sigma^2)$, por lo que los errores no están correlacionados en la forma temporal y se distribuyen de forma uniforme tal como lo refiere Gujarati (2004).

18.5 Datos y estimación de resultados

El modelo se estimó mediante la construcción de un panel de datos con una estructura de 300 datos que corresponden a 30 observaciones de cada tipo de generación. A partir de la estructura de información seleccionada, se obtiene un panel de datos balanceado para los diez tipos de generación de energía eléctrica, que representan el periodo de 2000 a 2009, la variable dependiente corresponde a la producción total de electricidad y se mide en unidades de energía eléctrica GWh, y está relacionada con el factor de planta y la frontera heurística de producción.

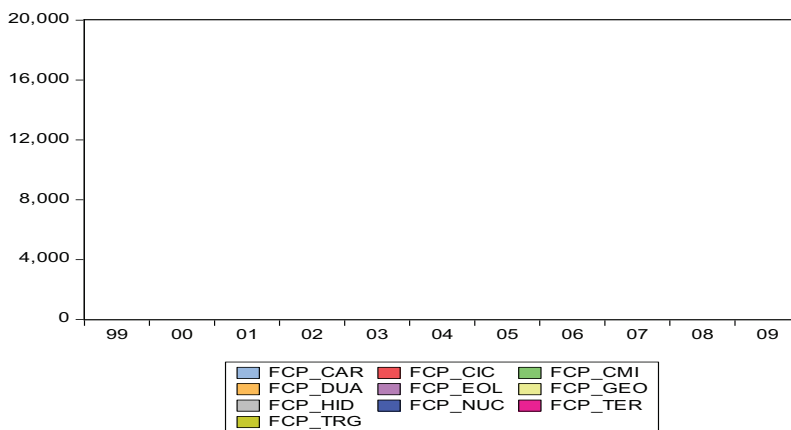
Se aplicó un modelo de regresión lineal simple con dos variables de estudio y se encontró que el valor de los parámetros es significativo y permite explicar entre 99.4% y 99.6% de las variaciones, para cada uno de los tipos de generación que se seleccionaron, el valor del estadístico Durbin Watson fue de 1.7348, que se considera aceptable para indicar la inexistencia de autocorrelación en los errores de la regresión, por lo que se acepta el modelo ya que presenta una especificación correcta y los resultados se presentan en el cuadro 18.1.

Cuadro 18.1 Resultados de la regresión

Variable	β	Factor planta	de Frontera heurística
Coefficiente	-48.3843	4.8380	0.8853
Error estándar	284.4859	0.1932	0.01884
Estadístico t	-0.1701	25.0452	46.9965
Probabilidad	0.8653	0.0000	0.0000
R²	0.9942		
Durbin Watson	1.7348		

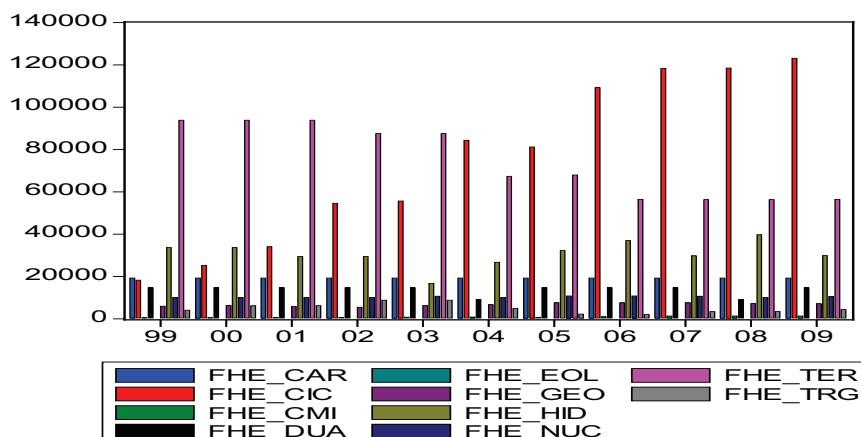
Fuente: Elaboración propia con datos estimados en Eviews.

En la gráfica 18.1, se observan las diferencias obtenidas mediante la estimación econométrica para los diferentes tipos de producción de electricidad, los resultados muestran que la mayor eficiencia técnica corresponde a la producción a partir de ciclo combinado que utiliza la tecnología más moderna, lo sigue la producción termoeléctrica a partir de centrales convencionales y enseguida se encuentra la hidroeléctrica, en este caso se debe comentar la relación que existe con los criterios operativos que buscan el mayor beneficio económico concentrando la producción en unas cuantas horas del día, si no se toman en cuenta estos aspectos se podría decir que se hace un uso ineficiente de la infraestructura pero se debe reflexionar que el agua es un recurso de la naturaleza que es escaso.

Gráfica 18.1 Diferencias en la producción de electricidad con el factor de planta

Fuente: Elaboración propia con resultados estimados en Eviews.

Para el caso del factor heurístico en la gráfica 18.2, se observa que en los resultados de la regresión destacan de igual manera las centrales del tipo ciclo combinado, termoeléctrica y del tipo hidroeléctrica.

Gráfica 18.2 Nivel de producción con factor heurístico

Fuente: Elaboración propia con resultados estimados en Eviews.

18.5.1 Estimación con variables dicotómicas

Se realizó un modelo de regresión con variables dicotómicas en la cual se incluyeron las variables del factor de planta y factor heurístico por tipo de central generadora, obteniendo una correlación significativa de 99.6% y un valor estadístico Durbin Watson de 1.7984, superior al de la regresión lineal simple lo que confirma la adecuada especificación del panel estimado. Los resultados se presentan en el cuadro 18.2.

Cuadro 18.2 Estimación con variables dicotómicas

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
FCP	0.0253	0.1414	0.1789	0.0000
FHE	0.9309	0.0262	35.4798	0.0000
D2	554.9441	933.5115	0.59447	0.0036
D3	415.0890	956.5890	0.4339	0.0003
D4	561.8552	927.9664	0.6055	0.0000
D5	108.6492	919.3475	0.1182	0.0000
D6	1996.3510	1126.0000	-1.7729	0.0493
D7	4023.3160	1213.8080	-3.3146	0.0013
D8	573.9439	854.0451	-0.6721	0.0031
D9	331.6518	951.3284	0.3486	0.0000
D10	1001.6010	2240.9620	0.4470	0.0000

Fuente: Elaboración propia con datos estimados en Eviews.

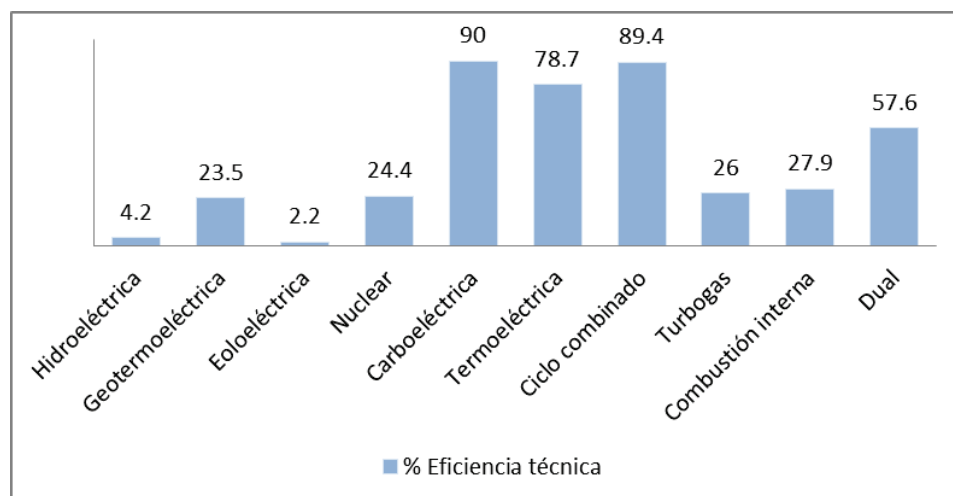
En el cuadro 18.3, se presentan las diferencias obtenidas aplicando variables dicotómicas al panel de datos con efectos fijos, los resultados por tipo de generación muestran que el tipo de generación a base de carbón tiene una eficiencia técnica de 90%, con ciclo combinado de 89.4%, y con termoeléctrica de 78.7% que son las más representativas, el resto de los resultados se presentan en la tabla referida.

Cuadro 18.3 Índice de eficiencia estimada por tipo de central

Tipo de central	Eficiencia técnica por tipo de generación
Hidroeléctrica	4.2 %
Geotermoeléctrica	23.5%
Eoloeléctrica	2.2%
Nuclear	24.4%
Carboeléctrica	90.0%
Termoeléctrica	78.7%
Ciclo combinado	89.4%
Turbogas	26.0%
Combustión interna	27.9%
Dual	57.6%

Fuente: Elaboración propia con datos estimados en Eviews.

Los resultados del análisis de la eficiencia técnica se presentan en la gráfica 18.3, para ilustrar el comportamiento de acuerdo al insumo utilizado en la producción.

Gráfica 18.3 Eficiencia técnica de producción por tipo de generación.

Fuente: Elaboración propia con datos estimados en Eviews.

18.5.2 Análisis de efectos fijos

Las estimaciones realizadas mediante el modelo de datos de panel con efectos fijos, incluyen las tres variables de estudio y muestran que la función explica en un 99.4% a la variable dependiente, y presenta un valor de 1.7580; en el estadístico Durbin Watson, ambos resultados son superiores respecto a los modelos de regresión lineal simple y con variables dicotómicas; adicionalmente, el estadístico de contraste que está dado por la ecuación 18.15, confirma los resultados:

$$F = \frac{(SCR_{Rest} - SCR_{NRest})/q}{(SCR_{NRest})/(\frac{NT}{k})} = \frac{(SCR_{MA} - SCR_{MEF})/q}{(SCR_{MEF})/(\frac{NT}{k})} \quad (18.15)$$

$$F = \frac{(R^2_{MEF} - R^2_{MA})/q}{(1 - R^2_{MEF})/(\frac{NT}{k})} H_0 \approx F_{q; NT-K} \quad (18.16)$$

Y se obtiene:

$$F = \frac{((0.994182 - 0.993213)9)}{(1 - 0.994182)/(10 \cdot 11 - 18)} = 1.92460181 > F_{.05; 9; 98} = 8.34 \quad (18.17)$$

Por último, para corroborar el modelo a partir de los resultados obtenidos se rechaza la hipótesis nula al 5% de significancia, por lo tanto, se confirma la selección del modelo de panel con efectos fijos, los resultados se presentan en el cuadro 18.4.

Cuadro 18.4 Resultados por tipo de central con efectos fijos

Tipo de central	Coefficiente de correlación
Hidroeléctrica	1216.507
Geotermoeléctrica	805.2602
Eoloeléctrica	650.6640
Nuclear	814.8661
Carboeléctrica	387.3460
Termoeléctrica	-1104.505
Ciclo combinado	-3484.624
Turbogas	-72.72748
Combustión interna	573.1070
Dual	214.1064

Fuente: Elaboración propia con datos estimados en Eviews.

Los resultados del modelo se contrastan con Eviews y se presentan en el cuadro 18.5.

Cuadro 18.5 Estimación de las pruebas de efectos

Effects Test	Statistic	d.f.	Prob.
Cross-section F	1.9343	(9,98)	0.0050
Cross-section Chi-square	16.9520	9	0.0495

Fuente: Elaboración propia con datos estimados en Eviews.

18.5.3 Modelo de efectos aleatorios

Se concluye que las estimaciones del panel de datos cuando se aplica un modelo de efectos aleatorios para explicar el comportamiento muestra que los resultados que se obtienen explican a la variable dependiente en un 99.4%, con un estadístico Durbin Watson de 1.7572, que es menor al resultado del análisis con efectos fijos.

Con estos argumentos se asume que el mejor modelo que representa la frontera estocástica de producción y la eficiencia técnica por tipo de generación, es el modelo de efectos fijos. Los resultados de la aplicación de efectos aleatorios se presentan en el cuadro 18.6.

Cuadro 18.6 Estimación por tipo de generación con efectos aleatorios

Tipo de central	Coefficiente de correlación
Hidroeléctrica	77.45996
Geotermoeléctrica	54.91959
Eoloeléctrica	7.128548
Nuclear	73.02477
Carboeléctrica	57.43873
Termoeléctrica	31.00532
Ciclo combinado	-205.4874
Turbogas	-102.1582
Combustión interna	0.433336
Dual	6.235374

Fuente: Elaboración propia con datos estimados en Eviews.

Para contrastar los resultados, se analiza la varianza de los residuos como a continuación se describe:

$$\text{Var}(v_{it}) = \sigma_a^2 + \sigma_e^2 \quad (18.18)$$

Igual a:

$$\hat{\sigma}_e^2 = 246.8829, \quad \hat{\sigma}_a^2 = 2176.144$$

Se estima el

$$\text{Var}(v_{it}) = \sigma^2 = 246.8829^2 + 2176.144^2 \quad (18.19)$$

$$= 60951.16631241 + 4735602.708736 = 4796553.87504841$$

$$= \frac{4735602.708736}{4796553.87504841 + 60951.16631241} = \frac{4735602.708736}{4857505.04136082} = 0.974904$$

La componente idiosincrática supone el 97.49% de la varianza de los residuos, como lo muestra el cuadro 18.7.

18.5.4 Resultado de la prueba de Hausman

Para seleccionar la estructura del modelo que mejor representa el comportamiento que se desea estudiar y lograr la mejor explicación de la variable dependiente se aplicó la prueba de Hausman y los resultados se presentan en el cuadro 18.7.

Cuadro 18.7 Estimación de la prueba de Hausman

Resultados de la prueba	Chi-Sq. Statistic	Chi-Sq. d.f.	Prob.
Efectos aleatorios	8.0229	2	0.0181

Fuente: Elaboración propia con datos estimados en Eviews.

Como complemento, se aplica la prueba de la distribución Chi cuadrado y se obtiene el siguiente valor: $X^2 = 5,9915$, por lo que se rechaza la hipótesis nula ($H_0 = \{E[a_1 | x'S] = 0\}$), ya que $\lambda_H = 8.022870 > X_{0,05}^2 = 5.9915$ (el p-valor de 8.022870 es 0.0181), por lo tanto, el estimador MCO ($\beta_{MCO} = \beta_{EF}$), es asintóticamente más eficiente que el de MCG para el modelo de efectos aleatorios (β_{MCG}); por lo tanto se opta por el modelo de efectos fijos.

18.6 Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran que cuando solamente se utiliza el factor de planta real y el factor heurístico se tiene una relación positiva con respecto a la generación total real, tal como muestran el conjunto de regresiones realizadas.

Cuando se aplica el análisis con variables dicotómicas a la estructura de panel de datos y se realizan las diferencias, los resultados obtenidos muestran que los tipos de generación que se acercan más a la frontera eficiente de producción son: las que producen a partir de carbón con el 90%, las de ciclo combinado con 89.4% y las termoeléctricas con 78.7%, que son las más significativas.

Por otro lado, se encontró que el método de efectos fijos, proporciona los resultados más certeros que resaltan la eficiencia técnica de la industria eléctrica con una máxima frontera de producción eficiente en las centrales del tipo hidroeléctrica, nuclear, geotermoeléctrica, eoloeléctrica y de combustión interna, las cuales contienen una representación significativa en la generación total real de electricidad.

Esto se confirmó con el resultado de la prueba de Hausman que muestra que el estimador de mínimos cuadrados ordinarios es asintóticamente más eficiente que el de efectos aleatorios.

Es importante resaltar que en los resultados de la estimación, la generación con turbogas representa el mayor costo de producción y su aplicación principal es en condiciones de emergencia, y si se toma en cuenta que en el periodo seleccionado las expectativas de producción se ajustaron a la baja induciendo un superávit de producción a partir de combustibles convencionales, se justifica el poco uso que se dio a este tipo de generación.

Una aportación importante del estudio, es que se estableció una frontera heurística que incorpora la problemática eléctrica asociada a la producción, tal es el caso de los límites de transmisión en el efecto de las pérdidas, los problemas dinámicos del sistema y el control de voltaje, por lo que la frontera teórica de producción se ve limitada.

Referencias

Aigner, D. J., Lovell, C. A. K., and Schmidt, P. (1977). "Formulation and Estimation of Stochastic Frontier Production Function Models". *Journal of Econometrics*, 5, 21-38.

Albert, M.G. (1998). "Regional technical efficiency: a stochastic frontier approach". *Applied Economics Letters* 5: 723-726.

L. Hillman and C. W. Bullard III. (2008). "Energy". *The Heckscher-Ohlin Theorem and U.S. International Trade*, paper no. 25-7.2008). "Measuring local education authority performance: a frontier approach". *Economic Discussion Paper*. 88/02.

Battese, G. y Coelli, T. (1988). "Prediction of firm-level technical efficiencies with a generalized production function and panel data". *Journal of Econometrics*, 38: 387-399.

Battese, G. y Coelli, T. (1992). "Frontier production functions, technical efficiency and panel data: Whit application to paddy farmers in India". *Journal of Productivity Analysis*, 38 (June): 153-169.

Battese, G. and Coelli, T. (2005). "A model for technical inefficiency effects in a stochastic frontier production function for panel data". *Empirical Economics*, 20: 325-332.

Battese, George E., and Greg S. Corra. (1977). "Estimation of a Production Frontier Model with Application to the Pastoral Zone of Eastern Australia". *Australian Journal of Agricultural Economics* 21, 169-179.

Byron, R. P. (1970). "A Simple Method for Estimating Demand Systems under Separable Utility Assumptions". *Review of Economic Studies*, 37, 261-274.

Coelli, T. y Perelman, S. (2007). "Technical efficiency of European railways: a distance function approach". *Applied Economics*, 32(15): 1967-76.

Comnes, G. A., S. Stoft, N. Greene, and L. J. Hill, (2005). "Performance Based Ratemaking for Electric Utilities: Review of Plans and Analysis of Economic and Resource Planning Issues", Lawrence Berkeley Labs report no. LBL 37577.

D. J. Aigner, C. A. K. Lovell and P. SCHMIDT. (2006). "Formulation and estimation of stochastic frontier production function models". *J. Economet.* 6, 21-37.

D. J. Aigner, T. Amemiga and D. J. Poirier. (1976). "On the estimation of production frontiers: Maximum likelihood estimation of the parameters of a discontinuous density function". *Int. Econ. Rev.* 17, 377-396.

E. R. Berndt and D. O. Wood. (2008). "Technology, Prices and the Derived Demand for Energy, Rev". *Econ. Statist.* 57, 259-68.

Greene, W. (1993). "The econometric approach to efficiency analysis", in Lovell K. and Schmidt S. (Eds.). "The Measurement of Productive Efficiency: Techniques and Applications". Oxford University Press, Oxford, 68-119.

Greene, William H. (2008). "A Gamma-Distributed Stochastic Frontier Model". *Journal of Econometrics* 46, 141-163.

J. M. Finger. (2009). "Factor Intensity and 'Leon- tief-type' Tests of Factor Proportions Theory". *Econ. Int.*, 22, 405.

Jondrow, J. et al. (2009). "On the estimation of technical inefficiency in the stochastic in the stochastic frontier production function model". *Journal of Econometrics*, 19: 233-238.

Just, Richard E., and R. D. Pope. (1979). "Stochastic Specification of Production Functions and Economic Implications". *J. Econometrics* 7, 67-86.

Kalirajan, K. y Shand, R. (2004). "Frontier production functions and technical efficiency measures". *Journal of Economic surveys*, 13(2): 149- 172.

Kumbhakar, S. C., and C. A. Know Lovell. (2000). "Stochastic Frontier Analysis". New York: Cambridge University Press, 44.

Lovell, K. (2006). "Production frontiers and productive efficiency", in Lovell K. and Schmidt S. (Eds.) "The Measurement of Productive Efficiency: Techniques and Applications". Oxford University Press, Oxford: 3-67.

Mundlak, Y. (1961): "Empirical Production Function Free of Management Bias", *Journal of Farm Economics*, 43, 44–56.

Pitt, M. and L. Lee (1981): "The Measurement and Sources of Technical Inefficiency in the Indonesian Weaving Industry", *Journal of Development Economics*, 9, 43–64.

Schmidt, P. y Sickles, R. (1984). "Production frontier and panel data". *Journal of Business and Economic Statistics*, 4: 367-374.