

LMDI Una Herramienta Para Medir Eficiencia Energética. Un Caso De Estudio

Julio Ariel Potschka ^{a*}, Manuel Armando Mazzeletti ^a, Mario Orlando Oliveira ^a

^a Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

^aLaboratorio de Investigación y Desarrollo en Energía Eléctrica-LIDEE, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones Juan Manuel de Rosas 325, Oberá, Misiones, Argentina
potschka@fio.unam.edu.ar, amazzoletti@gmail.com, oliveira@fio.unam.edu.ar

Resumen

El presente trabajo describe y analiza la aplicación de un método denominado LMDI para medir la eficiencia energética en un sistema considerado. Incluye una contextualización sobre el estado del arte y el desarrollo del método con su expresión general, las condiciones que deben cumplirse para su utilización y la aplicación sobre un caso de estudio práctico. Se especifica el origen de los datos utilizados, la metodología de cálculo y los resultados obtenidos con un análisis numérico y gráfico, justificando la utilidad de la herramienta. Los resultados muestran una identificación de la evolución del consumo de energía, la eficiencia energética en los efectos considerados como variables y en qué grado son impulsores o inhibidores en el consumo de energía eléctrica.

Palabras Clave – Descomposición de factores, energía, eficiencia energética

1 Introducción

El aumento sostenido de la población mundial en conjunto con nuevas tecnologías, usos y cambios en la forma de vida, nuevos equipamientos en general, la industrialización y el transporte, demandan un sostenido aumento de energía eléctrica. Según un informe de la Asociación Internacional de la Energía AIEP, existe un aumento sostenido en el consumo de energía eléctrica desde los años 1990 al 2019 y pone de manifiesto un aumento importante en el consumo a nivel industrial a partir de los años 2000 de manera significativa. Se puede decir que el consumo está centrado en los primeros tres grupos de sectores Industrial, residencial, comercial y de servicios públicos. Un informe de la unión europea del año 2021, muestra un aumento de la temperatura en 2,7 °C para fines de siglo, que es un valor elevado más de lo esperado por el acuerdo de París que es de 1,5 °C. Según el informe, la reducción de las emisiones de metano de los sectores de combustibles fósiles, residuos y agricultura podría ayudar a cerrar la brecha de emisiones y reducir el calentamiento a corto plazo. El análisis de los factores que inciden en el cambio del consumo de energía en un período puede contribuir a identificar las medidas óptimas para lograr los objetivos de las políticas energéticas de una institución, empresa, sectores y hasta un país. Existen varios métodos de análisis de la influencia de estos factores y es a través de la descomposición, determinando el grado de interacción de los componentes de las variables en estudio llamados “efectos”. En este trabajo el objetivo fundamental es mostrar la metodología conocida como LMDI, que básicamente descompone los efectos que se consideran como factores de consumo de energía en el sistema en estudio y en un determinado período, por ejemplo, la actividad económica, estructural, transporte, sector comercial, industrial y la intensidad energética. Esta metodología se usa aproximadamente desde los años 70 en el estudio de la descomposición del CO₂ y el análisis sobre el impacto del calentamiento global por los gases de efecto invernadero. Autores como ANG et. al y CHENG et. han realizado descomposición con efectos como

estructural, actividad económica, carbonización, renta per cápita, mezcla de combustible, entre otros.

2 Descripción del método LMDI

Se conoce como LMDI, (por sus siglas en inglés, Logarithmic Mean Divisia Index) al método que permite descomponer el consumo de energía eléctrica en los factores que intervienen, como ser factores estructurales, servicios, transporte, población y todo lo relacionado al uso final de la energía eléctrica como variables en estudio. En adelante estos factores se denominarán efectos, ya que se analiza la consecuencia, resultado y el impacto que tiene la evolución del consumo de energía. De manera generalizada se fundamenta en los métodos de índices de Divisia con función de pesos tipo media logarítmica, la cual proporciona un residuo nulo, llegando a una descomposición exacta.[1] [2]

Un índice de Divisia es una construcción teórica para crear series de números índices para datos en tiempo continuo, usado en economía, por ejemplo, en cantidad y precio. Esta construcción puede incluir distintas unidades de las variables en estudio llamados subcomponentes, pero como resultado, la serie de números índices no especifica unidades. Son usados en productividad multifactorial, índices de precios, índices agregados monetarios. [3], entre otros.

La expresión general es la siguiente:

$$\Delta E = \sum_i w_i \ln \frac{X_{ij}^T}{X_{ij}^0} \quad (1)$$

donde, E es la energía en KWh, X_{ij} es la variable del sector “i” hasta el sector “j”, w_i es un ponderador que indica la media logarítmica del consumo de energía eléctrica del sector “i” entre el período de 0 a T y se determina como sigue,

$$w_i = L(E^0, E^T) = \frac{E_i^T - E_i^0}{\ln E_i^T - \ln E_i^0} \quad (2)$$

Para la aplicación del método debe cumplirse, primeramente, una condición denominada identidad de KAYA [4], según la siguiente definición:

$$E = \prod_1^n Ef \quad (3)$$

donde, Ef son los “n” efectos considerados.

Ef pueden ser la relación de variables en diferentes unidades, por ejemplo, la población de un país, la superficie de una región; también relación de variables en unidades similares por ejemplo el cociente de unidades monetarias, etc. Es decir, siempre que se cumpla la identidad (3) el resultado deberá ser en unidades energéticas si la descomposición final es la energía “E”.

2.1 Aplicación del método

El método se aplica mediante la selección de efectos, los cuales se eligen de acuerdo a la variable en estudio que se quiere descomponer, para temas ambientales se analiza el CO₂ y es usual elegir la Población Humana, PBI per cápita, Intensidad energética del PBI e Intensidad de las emisiones energéticas. Como caso práctico en este trabajo consideramos la República Federativa del Brasil, con los siguientes efectos para analizarlos, Población, Actividad económica, Estructural y la Intensidad energética.

Con estos efectos mencionados la ecuación de KAYA se expresa de la siguiente manera:

$$E = P \cdot A \cdot S \cdot I \quad (4)$$

donde, P es el efecto población (cantidad de personas), A representa el efecto actividad (unidad monetaria/cantidad de personas), S es el efecto estructura (unidad monetaria/unidad monetaria) e I es el efecto intensidad energética (KWh/unidad monetaria).

Considerando los subsectores la ecuación (1) se reescribe de la siguiente manera:

$$E = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n \left(P \cdot \frac{Y}{P} \cdot \frac{Y_i}{Y} \cdot \frac{E_i}{Y_i} \right) = \sum_{i=1}^n EP \cdot EA \cdot ES \cdot EI_i \quad (5)$$

donde, EP es el efecto población, ES : efecto actividad, ES : efecto estructura, EI : efecto intensidad

Los subsectores se identifican desde $i=1$ hasta “ n ” y para el caso en estudio “ $n=5$ ”, ya que se analizará 5 subsectores.

Aplicando la expresión general (1), el resultado se denomina descomposición aditiva [5] y se define de la siguiente manera:

$$E^T - E^0 = \Delta E_{tot} = \Delta E_{pop} + \Delta E_{act} + \Delta E_{str} + \Delta E_{f_{ii}} \quad (6)$$

Esta expresión muestra los cambios absolutos del consumo energético entre dos períodos de tiempo inicial “0” y final “T”.

Donde cada efecto queda definido de la siguiente manera:

$$\Delta E_{pop} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \ln \left(\frac{EP^T}{EP^0} \right) \Delta E_{act} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \ln \left(\frac{EA^T}{EA^0} \right) \quad (7)$$

$$\Delta E_{str} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \ln \left(\frac{ES^T}{ES^0} \right) \Delta E_{f_{ii}} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \ln \left(\frac{EI^T}{EI^0} \right) \quad (8)$$

2.2 Datos requeridos para el método

Los datos del efecto actividad ES corresponden al valor agregado bruto (VAB) y se extrajeron de las cuentas nacionales de Brasil, según el Instituto de Geografía y Estadística (IBGE) [6]. Estos datos se muestran en la Tabla 2 expresado en millones de reales por cada subsector.

Por otro lado, Los datos del consumo de energía eléctrica total por sector se extrajeron de la empresa de investigación de energía (EPE) [7].

En la siguiente Tabla 1 se resume el grupo de valores para el año “0” correspondiente al 2010 y final “T” el 2019.

Tabla 1 - Energía Total por subsector

Consumo energético total (ktep)	Año 0 /2010	Año T/2019
Comercial	6.731	8862
Publico	3.636	4268
Agropecuario	10.010	12631
Transporte	69.614	84810
Industrial	85.247	78699
TOTAL	175 238	189270

El consumo de energía total es en kilos equivalentes de petróleo (ktep). Los valores mostrados en la Tabla 2 y Tabla 3 corresponden al valor agregado bruto y la población total del país, respectivamente.

Tabla 2 -Valor agregado bruto

VAB a precios del 2010 (R\$\$ 1000000 Reales)	Año 0 /2010	Año T/2019
Comercial	416229	822590
Publico	343319	646123
Agropecuario	159932	310714
Transporte	1441660	284471
Industrial	904158	1385804
TOTAL	1965298	3449702

Para calcular el efecto población, *EP*, es necesario la utilización de datos de la evolución de la población en el período en estudio en el ámbito económico denominada “Expansión”. [8]

Tabla 3 -Población total

Población	Año 0 /2010	Año T/2019
Habitantes	194891000	210147000

3 Resultados obtenidos

Los resultados presentados, se obtienen una vez aplicadas las ecuaciones (6) y (7), realizando el cálculo del ponderador para cada efecto y utilizando los valores de las Tablas 1, 2 y 3, respectivamente.

A modo de ejemplo se calcula el efecto EP para el sector comercial, calculando primeramente el ponderador:

$$w_1 = L(E^0, E^T) = \frac{8862 - 6731}{\ln(8862) - \ln(6731)} = 7747,44$$

Reemplazamos en la formula siguiente y calculamos el efecto se obtiene:

$$\Delta E_{pop} = w_i \cdot \ln\left(\frac{EP^T}{EP^0}\right) = 7747,44 * \ln\left(\frac{8862}{6731}\right) = 584 \quad (9)$$

De manera similar, los valores de los otros efectos calculados se muestran de manera resumida en la siguiente Tabla 4.

Tabla 4 -Resultados de la descomposición aditiva (Ktep)

Sectores	EP	EA	ES	EI	Total
Comercial	584	3775	919	-3146	2131
Público	297	1922	275	-1861	636
Agropecuario	849	5492	1144	-4863	2621
Transporte	5800	37502	10356	-38462	15196
Industrial	6175	39922	-11111	-41534	-6548
TOTAL	13706	88613	1582	-89868	14033

Cabe aclarar que el efecto Actividad se calcula como actividad económica per cápita y el efecto estructura también se conoce como estructura económica y se calcula a partir del VAB. Se observa en los valores totales que en el efecto Población, Actividad y Estructura presentan un signo positivo, estos se denominan Impulsores en el consumo de energía; mientras que el efecto Intensidad energética tiene un signo negativo resultando un Inhibidores en el consumo de energía. Esto se puede representar en un gráfico del tipo cascada, como se muestra en la Fig. 1 detallando los efectos Población (EP), Actividad (EA), Estructura (ES), Intensidad energética (EI) y el total (ET).

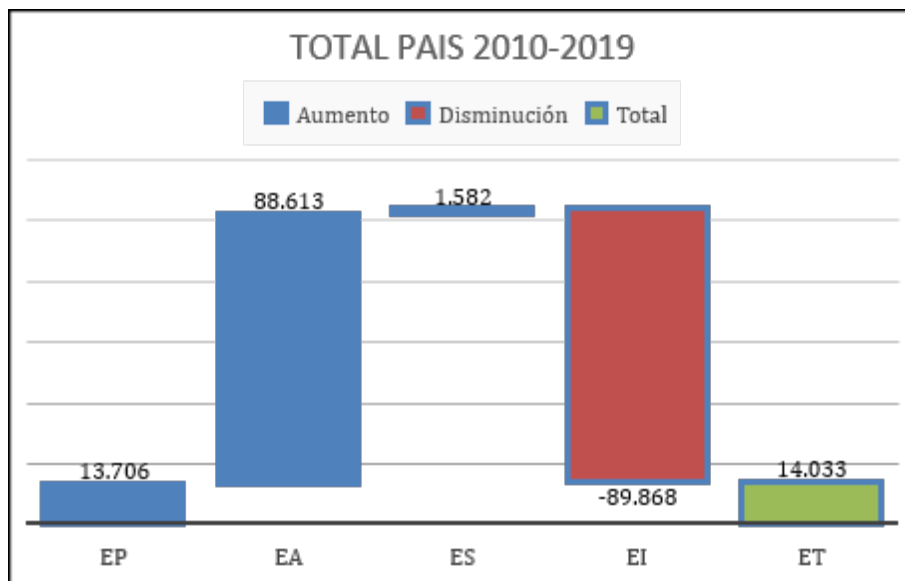


Fig. 1. Efecto Total País en Ktep

Relacionando el efecto Intensidad Total en valores absolutos con el total de los sectores, representa un 46,3 %, esto quiere decir que se pone de manifiesto como el efecto más importante a la eficiencia energética, ya que esta se define como la inversa de la intensidad energética.

La propiedad importante del método de descomposición es el análisis de la interacción y el grado de incidencia entre los efectos y subsectores considerados. Las Fig. 2- Fig. 5 muestran los resultados de estas interacciones.

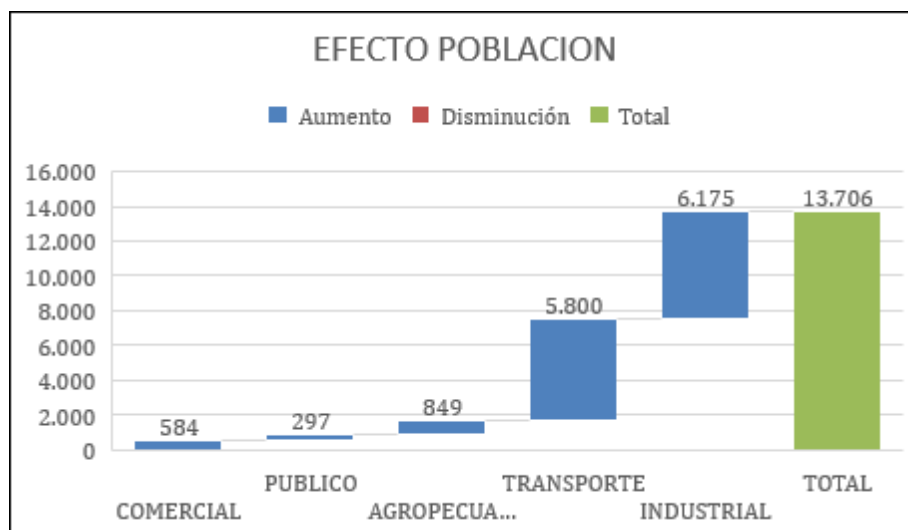


Fig. 2. Efecto Población en Ktep

En la Fig. 2 Se observa que el efecto población representa un impulsor en el consumo de energía para todos los subsectores, ya que son todos valores con signo positivos y en gran medida el transporte y el sector industrial son grandes impulsores de consumo.

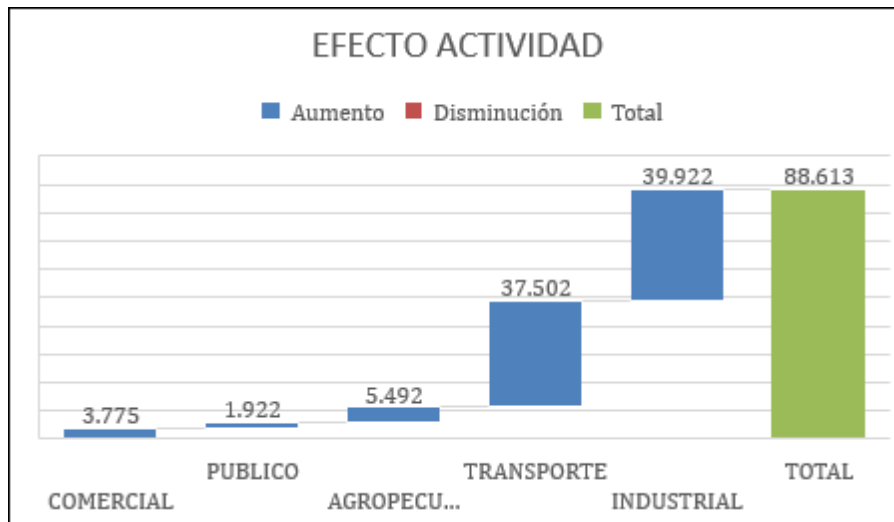


Fig. 3. Efecto Actividad en Ktep

En la Fig. 3 se muestra el efecto actividad económica. Este efecto es también impulsor al consumo de energía, como es de esperar en este efecto, en gran medida en el transporte y en el sector industrial.

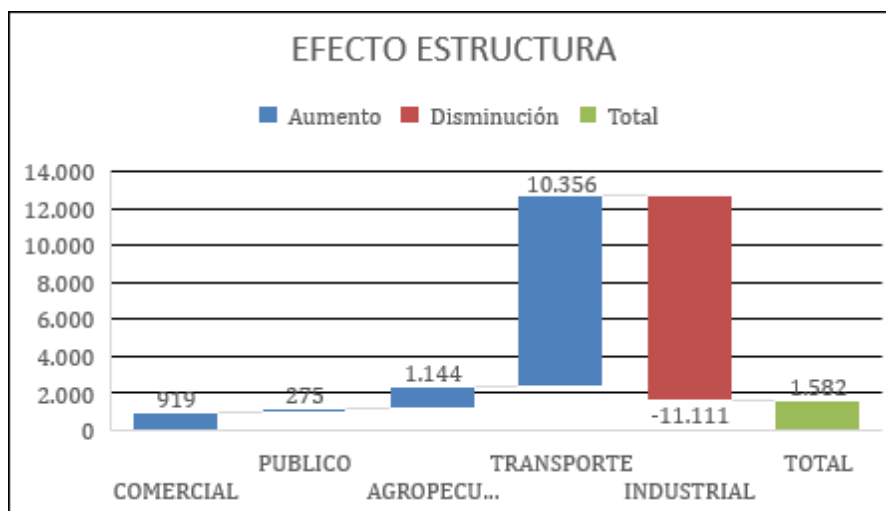


Fig. 4. Efecto Estructura en Ktep

En cuanto al efecto estructura en la Fig. 4 se observa que el subsector industrial es un inhibidor en el consumo de energía y comparando en valor absoluto es representativo respecto al transporte. Esto quiere decir que en el ámbito industrial se observa un trabajo que tiende a disminuir el consumo energético.

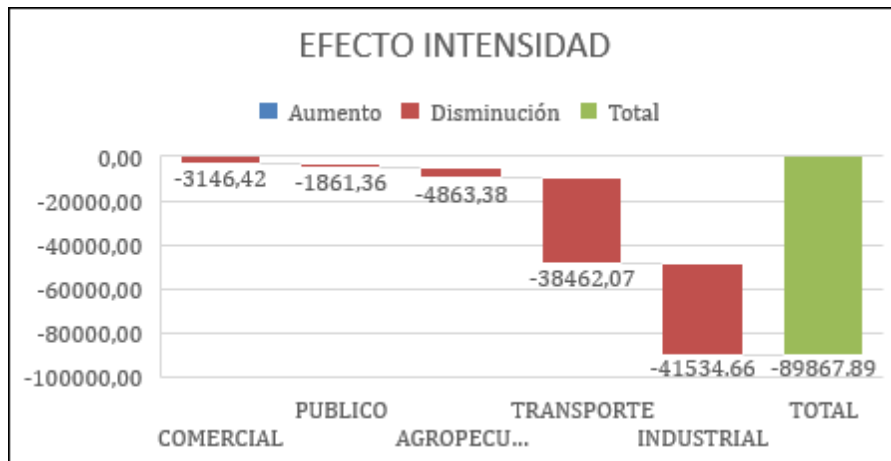


Fig. 5. Efecto Intensidad en Ktep

En la Fig. 5 se observa que todos los efectos son inhibidores de consumo en la intensidad energética, destacando que en el caso del transporte y del sector industrial son los más importantes en cuanto al aumento de la eficiencia energética. Un aspecto que llama la atención es en el sector comercial y público el efecto de la intensidad es muy pequeño, es decir prácticamente es indiferente en el concepto de eficiencia energética.

4. Conclusiones

En este trabajo se presentó la descripción y aplicación de una herramienta para medir la eficiencia energética en un sistema. Mediante un caso particular se observó que puede analizarse la eficiencia energética en el uso de la energía a través de la aplicación del método LMDI, descomponiendo los factores que intervienen en el caso de estudio. Además, el método permite ver la interacción entre los efectos considerados y los subsectores que intervienen en el consumo de energía.

Esta herramienta puede aplicarse a cualquier caso de análisis de acuerdo al cumplimiento de la identidad de KAYA, permitiendo aplicar el análisis de evolución entre dos períodos de variables que se interrelacionan, sin conocer el grado de esa relación. Una vez fijada la variable dependiente en estudio, como ser energía eléctrica de consumo se determinan los factores intervinientes como así también los subsectores a considerar para cada factor. A través de la aplicación del método se analizó su evolución de manera aislada llegando a determinar si es impulsor o inhibidor de consumo sobre la variable dependiente. En futuros trabajos, se pretende utilizar el LMDI en sectores que utilizan la energía como uso final, como es el caso de las instituciones de educación superior y determinar la evolución de consumo en las variables intervinientes.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido llevado a cabo en el marco del proyecto denominado Procedimiento metodológico para auditoría energética en instalaciones de educación tecnológica con propuestas de mejoras en ahorro energético, Cód. 16/I1226-PI acreditado por la UNaM.

Referencias

- [1] Paula Fernandez Gonzales, “Técnicas de descomposición basadas en índices de divisia. Algunas aplicaciones medio ambientales” Economía aplicada, Universidad de Oviedo., España, 1912.
- [2] Roman-Collado, Colinet M.J. “Is energy efficiency a driver or an anhibitor of energy consumption change in Spain. Two descomposition approaches. Energy policy.115.09-417. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.01.026>
- [3] Wikipedia contributors, “Divisia index”, Wikipedia, The free Encyclopeida. 10 june 2023.00:04 UTC. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Divisia_index
- [4] Verónica Gutman, Angel Gutman, “Emisiones energéticas e Identidad de Kaya,” Fundación Torcuato Ditella, Bs As, Argentina, mayo 2017. [Online]. Available: <http://ftdt.cc/descarbonizacion-profunda-2/>
- [5] Ang, B. W. (2015). LMDI decomposition approach: a guide for implementation. *Energy Policy*, 86, 233-238. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.07.007>
- [6] IBGE. Instituto Brasileiro de Geografía e Estatística. Contas-Nacionais, Valor Adicionado, 2020. [Online]. Available, <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9052-sistema-de-contas-nacionais-brasil.html?=&t=resultados>
- [7] EPE. Empresa de Pesquisa Energética, Consumo de energía eléctrica, Históricas Completas, 2020, [Online], Available, <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/BEN-Series>
- [8] DatosMacro.com. Epanion, Socio-Demografía, Población, Brasil, 2021. [Online]. Available. <https://datosmacro.expansion.com/demografia/poblacion/brasil>