

Priorización de Medidas de Eficiencia Energética aplicados al sector Residencial del Paraguay evaluando criterios técnicos, económicos y medioambientales

Álvaro Sánchez, Arnaldo Acosta, Diana Valdez, Félix Fernández

Facultad Politécnica - Universidad Nacional de Asunción

Paraguay

Resumen

La República del Paraguay se caracteriza por la producción de energía eléctrica renovable principalmente de origen hidroeléctrico. Considerando el desarrollo de la generación de energía hidroeléctrica y la casi total electrificación de los hogares de su territorio, además de las pérdidas en utilización presentadas en el Balance Nacional en Energía Útil 2011, que alcanzaban el 39,2% de la oferta interna bruta de energía y el notable crecimiento de la demanda de energía eléctrica en el sector residencial, alrededor del 15,7% según el Balance Energético Nacional 2020, es importante resaltar que fuentes con baja eficiencia energética y perjudiciales para el medio ambiente como la leña y carbón vegetal tienen una considerable participación dentro de este balance energético. En este contexto, el presente trabajo tiene como finalidad priorizar las medidas de eficiencia energética aplicados al sector residencial, para los distintos usos como iluminación, cocción, calentamiento de agua y demás, que logren facilitar la unificación de recursos y esfuerzos para el ahorro de energía y salvaguardar recursos económicos y ambientales. Por lo tanto, primeramente, se desarrolla un modelo integrado de energía *bottom-up* utilizando el software LEAP© (*Low Emissions Analysis Platform*), con el fin de evaluar el impacto de las medidas propuestas para cada uso, basadas en sustitución de fuentes o en reemplazo de tecnologías, que permitan satisfacer los requerimientos de consumo de energía, pero con mayor nivel de eficiencia. Luego, los resultados obtenidos de las simulaciones de los escenarios energéticos propuestos, son utilizados como insumo para la herramienta de análisis multicriterio llamada Proceso Analítico Jerárquico (AHP), que sirve de soporte para evaluar políticas o medidas de eficiencia energética teniendo en cuenta varios criterios de priorización. Esta parte del trabajo se basa en la estructuración de un árbol jerárquico, elaborado en el marco del planteamiento del problema, junto con las medidas de eficiencia propuestas, para un periodo de análisis comprendido entre los años 2020 al 2050. Con esto, se busca brindar una herramienta de análisis que permita analizar las medidas de eficiencia energética propuestas y colaborar en el proceso de toma de decisiones en el ámbito de la planificación energética del Paraguay.

Palabras clave

eficiencia energética, sector residencial, energía neta, energía útil, LEAP, AHP

1. INTRODUCCIÓN

La tendencia del consumo de energía en el Paraguay es determinada por la participación de la biomasa y el aumento sostenido de consumo de energía procedente de la electricidad y derivados del petróleo. Este comportamiento implica grandes desafíos en materia de planificación de políticas energéticas, para garantizar el abastecimiento de energía al mercado local y encontrar alternativas que promuevan el uso eficiente de la energía, que permitan atenuar el efecto económico, ambiental y social que involucra el consumo de productos energéticos importados, de baja eficiencia y perjudiciales para el medio ambiente.

En el Balance Energético Nacional en Energía Útil de la República del Paraguay (BNEU 2011), se puede observar el consumo de energía neta del país, fue de 4.324,61 ktep, con mayor participación el sector Transporte con 31,1%, seguido del sector Residencial con 28,5%, Industria 27%, Agropecuario y Forestal con

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO - CIGRE 23 y 24 de Junio 2022

7,5%, Comercial, Servicios y Público 5,5%, y con menor participación Minería y Construcción con 0,4%. El consumo de energía neta para el sector Residencial para el año 2011 fue de 1.234 ktep, las principales fuentes que participaron fueron la Leña y Carbón Vegetal con 71%, seguidos de Electricidad con 22%. Este estudio concluyó que los usos encontrados en el sector (Iluminación, Cocción, Calentamiento de Agua, Refrigeración de Ambientes, Conservación de Alimentos, Calefacción y otros), son prioritarios para la aplicación de medidas de eficiencia energética [1].

Atendiendo a que las Medidas de Eficiencia Energética (MEE), son métodos que buscan promover el uso eficiente de la energía, es sabido que son efectivas para evitar el desperdicio de recursos tanto económicos como energéticos. Por lo tanto, en el presente trabajo se ha realizado una priorización de las MEE aplicadas al sector Residencial del Paraguay, basados en múltiples criterios, para el periodo 2020-2050.

Se ha tomado como estudio base al BNEU 2011, elaborado por la Fundación Parque Tecnológico de Itaipu - Paraguay (FPTI-PY) en conjunto con la Fundación Bariloche (FB). Además, se ha tomado el Balance Energético Nacional 2020 del Viceministerio de Minas y Energías [2]. Para las proyecciones se utilizaron datos de la Prospectiva Energética de la República del Paraguay 2018-2050 [3]. Posteriormente se desarrolló un modelo energético residencial elaborado con el software LEAP© (*Low Emissions Analysis Platform*). El modelo ayuda a reflejar los cambios en los sistemas energéticos con la implementación de las MEE, con el fin de evaluar los impactos de estas. Seguidamente se realizaron cálculos teóricos tomando como base las proyecciones, para luego determinar las inversiones, el ahorro energético y las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) evitados, para cada medida. Finalmente, se recurre a un análisis de toma de decisión multicriterio, utilizando el *Analytic Hierarchy Process* (AHP), para analizar las diferentes alternativas bajo ciertos criterios de evaluación [4], de tal manera a priorizar las medidas más favorables.

2. OBJETIVO

El presente trabajo tiene como objetivo priorizar las medidas de eficiencia energética considerando criterios técnicos, económicos y ambientales, en el sector residencial de la República del Paraguay.

3. METODOLOGÍA PROPUESTA

3.1. Software LEAP

Como parte de la metodología se ha utilizado el software LEAP, el mismo fue desarrollado por el *Stockholm Environment Institute* (SEI, US). Se trata de una herramienta capaz de modelar escenarios energéticos y ambientales. Sus escenarios se basan en balances integrales sobre la forma en que se consume, transforma y produce energía en una región o economía determinada, según una gama de hipótesis de población, desarrollo económico, tecnología, precios y otras características [5]. La lógica que utiliza el modelo es clara, lo que hace que sea transparente, esto posibilita al usuario representar el sistema energético a analizar y visualizar su funcionamiento. Permite identificar las implicancias de los escenarios que pueden ser propuestos, así como los impactos derivados de cambios estructurales. Posee una estructura de manejo flexible de datos y definición de procesos, lo que permite un análisis amplio en cuanto a especificaciones tecnológicas y detalles de demanda energética. Permite representar un recuento elaborado sobre una estructura de balance energético, hasta el desarrollo de sofisticados sistemas de simulación [6].

3.2. Análisis de toma de decisión multicriterio

La metodología denominada Análisis de Toma de Decisión Multicriterio (MCDMA, por sus siglas en inglés), es ampliamente utilizada en sistemas energéticos. La ventaja de este método radica en la utilización de múltiples criterios para obtener una decisión priorizada.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

Generalmente, la metodología involucra m alternativas evaluadas bajo n criterios. La matriz de decisión agrupada puede expresarse como sigue:

$$\begin{array}{rcc}
 \text{Criterios} & C_1 & \dots & C_n \\
 \text{Ponderación} & w_1 & \dots & w_n \\
 \text{Alternativas} & A_1 & \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_m & x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} & (1)
 \end{array}$$

Donde el elemento x_{ij} representa el desempeño de la i -ésima alternativa para el j -ésimo criterio de evaluación, m es la cantidad de alternativas y n la cantidad de criterios [4].

El paso preliminar de esta metodología consiste en formular las alternativas y normalizar los datos para cada criterio. Seguidamente se pondera la importancia de cada criterio, luego de conformar la matriz de decisión (1), las alternativas se encuentran evaluadas y el proceso finalmente concluye.

2.2.1. Analytic Hierarchy Process (AHP)

El método ayuda a descomponer una decisión compleja en una jerarquía con la meta (objetivo) en la cima de un árbol jerárquico, los criterios y subcriterios en los niveles y subniveles de la jerarquía, y las alternativas de decisión en la parte inferior de dicho árbol. Se trata de una metodología de análisis de decisión que calcula la importancia de las alternativas mediante la comparación por pares de los criterios y las alternativas.

$$M_{C_i} = \begin{bmatrix} A_{11} & \dots & A_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1} & \dots & A_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

La ecuación anterior representa una matriz de comparación par a par, la misma se conforma comparando las n -alternativas en pares y asignándole una calificación según el orden de importancia relativa para cada criterio de evaluación [4].

3. CASO DE ESTUDIO

3.1. Sector Residencial

El sector utilizado como caso de estudio es el Residencial del Paraguay. La desagregación propuesta para el sector fue en Urbano y Rural. Estos a su vez, se dividen según el nivel económico de los hogares en altos, medios y bajos. Cada módulo homogéneo se compone de los usos que emplean energía del sector (iluminación, cocción, calentamiento de agua, conservación de alimentos, calefacción, climatización de ambientes, bombeo de agua, otros usos). La unidad de análisis de consumo de energía para el sector es la cantidad de hogares.

La proyección de hogares se elaboró en base a datos históricos de la Encuesta Permanente de Hogares, elaborado por la Dirección General de Estadística, Encuestas y Censos [7]. Por lo tanto, el consumo de energía está directamente relacionado con el número de hogares, estos a su vez, determinan el parque total de artefactos para el sector estudiado.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE 23 y 24 de Junio 2022

La proyección de consumo de energía del sector Residencial, para el periodo de análisis, se ha complementado con los datos del parque de artefactos para el año base, asumiendo la hipótesis¹ de que la proporción se mantiene. Por lo tanto, se puede estimar la proyección del parque de artefactos del sector para el periodo 2020-2050. Este análisis posibilita formar una referencia, al contrastar el escenario tendencial con los escenarios alternativos. Esto facilita una visión de posibilidades e impactos (energéticos, sociales, económicos y ambientales), en cuales se puede aplicar medidas de eficiencia energética.

3.2. Modelo energético para el Sector Residencial

La metodología empleada se basa en la observación del estado actual del consumo de energía para el Sector Residencial del Paraguay. Para ello se han recolectado datos oficiales de instituciones involucradas al sector energético nacional, además de censos. Cabe mencionar que la precisión del estudio depende de la cantidad y calidad de los datos disponibles.

La información recopilada ha sido utilizada para el modelo energético residencial, utilizando el software LEAP©, de manera a obtener proyecciones de consumo de energía y demás variables relacionadas con el uso de la energía, para el sector en estudio. Para el análisis se ha adoptado como año base al año 2020. Asimismo, como primer año de implementación de medidas de eficiencia ha sido el año 2021. Finalmente, el horizonte de las proyecciones va hasta el año 2050.

3.3. Método para el cálculo del Potencial de Ahorro Energético

Con los datos extraídos de las proyecciones de consumo de energía, se realizaron los cálculos teóricos con el fin de estimar el crecimiento del parque de artefactos para cada año, para luego aplicar medidas que promuevan el uso eficiente de la energía, atendiendo a las características de los usos, para los que son abastecidos exclusivamente por un tipo de energía (usos cautivos) y aquellos donde participan varias fuentes de energía (usos disputables). La metodología para el cálculo de este Potencial de Ahorro Energético, así como los costos de implementación asociados a cada medida de eficiencia, se presentan a continuación.

3.3.1. Sustitución tecnológica

Esta medida se adopta para usos en donde la Electricidad abastece de energía casi totalmente, no hay participación mayor de otras fuentes. Consiste en el reemplazo de artefactos ineficientes por artefactos con mejor desempeño (categorías de eficiencia A, A+, A++). Los usos elegidos para este tipo de medida son iluminación, refrigeración de ambientes y conservación de alimentos.

El ahorro energético se determina con la siguiente ecuación:

$$\Delta \text{ Consumo energético} = \text{ Consumo tendencial} - \text{ Consumo alternativo} \quad (3)$$

Para calcular los costos de implementación de las medidas, se tienen en cuenta la inversión necesaria para el reemplazo del equipo, así como los gastos de promoción y seguimiento de la medida.

3.3.2. Sustitución de fuentes energéticas

En esta rama de medidas, varias fuentes de energía tienen participación. La sustitución está asociada a aumentar la participación de fuentes con mejor desempeño energético. Atendiendo a que la decisión de los

¹ Con la hipótesis asumida se tiende a sobrevalorar los valores de ahorro, ya que se considera que la proporción se altere de forma tendencial con el avance de tecnologías más eficientes. Teniendo en cuenta que este estudio pretende estimar un potencial de ahorro energético, utilizando este método para la finalidad del trabajo.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE 23 y 24 de Junio 2022

consumidores para optar por una determinada fuente responde a una situación multiobjetivo, donde se tienen en cuenta los siguientes factores:

- Precio de las fuentes que compiten.
- Costos de inversión para las diferentes tecnologías.
- Calidad de la prestación.
- Impacto ambiental.

Para esta parte del método se ha utilizado el Modelo de Sustituciones (MoSus) de Fundación Bariloche [8], como herramienta que permita modelar los procesos de sustitución de fuentes.

Igual a la sustitución anterior, el cálculo de ahorro energético se realiza con la ecuación (1). Para los costos se tienen las mismas consideraciones. Se debe tener en cuenta que, para este tipo de medidas los GEI evitados al sustituir fuentes con emisiones de GEI por fuentes sin emisiones, esta está determinada por la siguiente ecuación:

$$\Delta \text{GEI evitados} = \text{Emisiones GEI tendencial} - \text{Emisiones GEI alternativo} \quad (4)$$

3.3.3. Buenas Prácticas

Esta medida de eficiencia energética involucra mejorar los hábitos en el uso de energía de los consumidores, mediante programas de concientización e información, de modo a reducir el desaprovechamiento de energía durante la operación de equipos. Los usos de refrigeración de ambientes y otros, fueron considerados para este tipo de medida.

3.4. Aplicación del AHP al Sector Residencial

3.4.1. Criterios

Es común que los criterios sigan una serie de principios con los que se pretende garantizar la relevancia de los mismos. Para la selección de los criterios se hace uso del método Delphi, el cual, en conjunto con un panel independiente de expertos, se realizan debates y charlas que de manera sistemática e interactiva se seleccionan y evalúan los criterios de evaluación para el análisis [4]. Los criterios seleccionados fueron los siguientes:

- 1) Eficiencia (C1): el coeficiente de eficiencia representa la relación entre la energía útil y la energía neta. El criterio evalúa la variación de eficiencia que se obtiene con cada alternativa.
- 2) Potencial de Ahorro Energético (C2): total de energía que se deja de utilizar al implementar las MEE. Este cálculo se realiza según la ecuación (1).
- 3) Impacto en el consumo de energía eléctrica (C3): el abastecimiento de energía eléctrica resulta de gran importancia para el sector estudiado. Se introduce este criterio con la finalidad de evaluar los cambios posibles en el consumo de energía eléctrica en los escenarios que plantean promover el uso de esta fuente.
- 4) Inversión (C4): este criterio fue introducido con el propósito de evaluar el volumen estimado de dinero que requiere la implementación de cada MEE, considerando el punto de vista de Costo Total de Recursos (TRC).
- 5) Valor Actual Neto - VAN (C5): se utilizó este método para comparar las rentabilidades entre las medidas, adoptando un punto de vista de una entidad administradora del programa (considerando así los costos y beneficios asociados a la implementación de las medidas). La tasa de descuento utilizada en los cálculos fue de 5%.
- 6) Índice de Costo Beneficio - ICB (C6): este criterio evalúa qué MEE obtiene menor costo por unidad energética ahorrada.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

- 7) Reducción en uso de biomasa (C7): este criterio evalúa en qué grado las MEE logran sustituir el uso de fuentes de biomasa, leña y carbón vegetal en comparación con el escenario tendencial.
- 8) Potencial de ahorro en emisiones de GEI (C8): este criterio determina las medidas con mayor potencial de ahorro en cuanto a las emisiones de GEI.
- 9) Factor de Implementación (C9): para el cálculo de este criterio se busca abarcar de manera sistemática los aspectos subjetivos de la implementación de las MEE, para determinar la calificación de las barreras (tecnológicas, informativas, y culturales). Se ha utilizado el mismo método para la selección y calificación de los criterios.

3.4.2. Alternativas

Las alternativas consideradas para el caso de estudio se detallan a continuación:

- 1) Iluminación LED (A1): consiste en la sustitución total de artefactos de iluminación en los hogares, para todos los módulos homogéneos. Se plantean lámparas LED categoría A++ para el análisis.
- 2) Cocinas a Inducción (A2): se trata de la sustitución de fuentes energía en los usos de cocción, la cocina eléctrica a inducción es el artefacto propuesto en esta medida. El nivel de sustitución para cada módulo homogéneo se obtiene considerando el análisis propuesto en el apartado 3.1.
- 3) Cocinas a Resistencia (A3): igual que la alternativa anterior, esta MEE plantea la sustitución de fuentes en el uso cocción mediante el empleo de cocinas eléctricas a resistencia.
- 4) Cocinas Ecofogones (A4): esta alternativa propone el uso del Ecofogones como MEE, orientado a la sustitución de tecnologías en los módulos homogéneos medios y bajos de los sectores urbano y rural.
- 5) Refrigeración Eficiente (A5): para esta alternativa se propone la sustitución de artefactos ineficientes con categorías C, B por artefactos con categorías A+, A++, en el uso refrigeración de ambientes.
- 6) Conservación Eficiente (A6): esta alternativa propone la sustitución de artefactos ineficientes con categorías C, B por artefactos con categorías A+, A++, en el uso conservación de alimentos.
- 7) Termo calefón Solar (A7): esta MEE está orientada en el aprovechamiento de la energía solar para el calentamiento de agua como soporte o complemento a los artefactos eléctricos tradicionales.
- 8) Buenas Prácticas (A8): esta alternativa sugiere la adopción de prácticas ahorradoras de energía mediante una campaña concienciadora. Los usos considerados fueron refrigeración de ambientes y otros usos.

3. RESULTADOS

Por un lado, se ha desarrollado un modelo energético para el sector Residencial de la República del Paraguay, para el periodo 2020-2050. Los escenarios propuestos fueron el tendencial (sin MEE) y el escenario alternativo, en el que se promueven las MEE presentadas anteriormente. En la siguiente Fig. 1 se pueden observar las proyecciones de consumo para ambos escenarios propuestos.

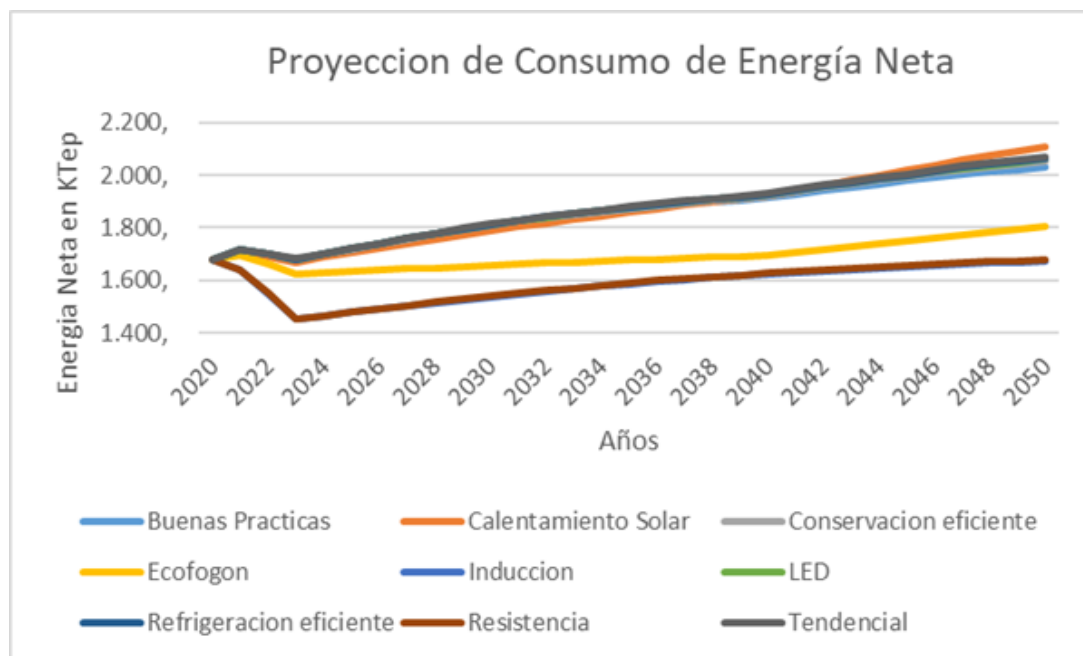
XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO - CIGRE
 23 y 24 de Junio 2022


Figura 1. Proyecciones de consumo de Energía Neta en ktep para el escenario tendencial y el alternativo

Por otra parte, se ha desarrollado una herramienta de decisión que ayudó a analizar las diferentes alternativas o medidas propuestas, bajo múltiples criterios de evaluación. A continuación, en la Tabla I, se observan los resultados de los cálculos realizados para cada alternativa propuesta.

Tabla I. Resultados de ahorros, impactos e inversiones asociados a las alternativas

Criterio	Unidad	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
C1	%	0,45%	23,78%	23,36%	14,67%	0,34%	0,83%	-0,95%	-1,35%
C2	ktep	125	8780	8680	5543	92	229	1183	410
C3	%	-0,84%	8,42%	8,78%	0,00%	-	-1,54%	-2,96%	-3,65%
C4	MUSD	108	1686	542	206	761	2151	363	1
C5	MUSD	0,17	4,45	100,54	96,74	-27,10	-131,39	0,19	23,02
C6	MUSD /ktep	1,35	0,68	0,04	0,14	15,85	17,99	0,14	0,01
C7	%	0,00%	-52,45%	-52,42%	-33,14%	0,00%	0,00%	-1,24%	0,00%
C8	tnCO ₂ eq	-	8.206.307	8.209.662	2.334.549	-	-	359.145	-
C9		3,55	8,94	10,05	9,56	0,00	0,00	8,69	5,50

Finalmente, a continuación, en la Tabla II se presentan las alternativas priorizadas de acuerdo a la posición que le corresponde a cada una de ellas. Se puede observar que la alternativa A3 ha resultado ser la mejor para su implementación, correspondiendo esta a las Cocinas a Resistencia.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

Tabla II. Resultado de la priorización de MEE

Alternativa	Posicion
A3	1
A2	2
A4	3
A8	4
A7	5
A1	6
A6	7
A5	8

4. CONCLUSIONES

El presente trabajo ha determinado un ranking de las mejores alternativas de las MEE propuestas para el sector Residencial del Paraguay en el periodo analizado. Para lograr esto se han considerado criterios técnicos, económicos y ambientales. Con esto se pretende brindar una herramienta de planificación energética integral que provea un soporte fundamentado a los tomadores de decisión. Este tipo de herramientas ayuda al diseño de planes o programas de eficiencia energética a nivel nacional, debido a que la metodología tiene un enfoque multicriterio y sistemático, favoreciendo el proceso de decisión y planificación. Se ha determinado claramente que las MEE orientadas a la sustitución de fuentes como la leña y el carbón vegetal obtuvieron las mejores calificaciones en el ranking, en comparación con los demás tipos de medidas. Esto demuestra que para el planteamiento de una transición para la implementación de MEE en el Paraguay, sería conveniente seguir el siguiente orden: Sustitución de Fuentes, Buenas Prácticas, Sustitución de Tecnologías.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Balance Energético Nacional en Energía Útil de la República del Paraguay. Itaipu Binacional, Fundación Parque Tecnológico Itaipú, Paraguay, 2014, páginas 4-10.
- [2] Balance Energético Nacional 2020. Viceministerio de Minas y Energías, Paraguay, 2021, páginas 2-12
- [3] Prospectiva Energética de la República del Paraguay 2018-2050. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Paraguay, 2021, páginas 19-29
- [4] Renewable and Sustainable Energy Reviews. “Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making”, vol. 13, no. 9, Dec. 2009, páginas 2263-2278
- [5] C. Heaps, *Manual del Usuario para la versión 2004 de LEAP*. Fundación Bariloche, Stockholm Environment Institute. Boston, Stockholm Environment Institute, 2004
- [6] N. Di Sbroiavacca, *El Modelo LEAP, principales características y especificación para la prospectiva energética*. San Carlos de Bariloche, Fundación Bariloche, 2014.
- [7] Encuesta Permanente de Hogares Continua. Instituto Nacional de Estadísticas, Paraguay, 2020.
- [8] Modelo de Sustituciones entre Fuentes Energéticas en el Consumo Final: 14° Seminario-taller: Política Energética para el Desarrollo Sustentable y el Modelo LEAP. Fundación Bariloche, Argentina, 2014, páginas 2-10