

METODOLOGÍA DE PRONÓSTICO DE LA DEMANDA RESIDENCIAL PARA EL PLANEAMIENTO ENERGÉTICO DE LARGO PLAZO EN EL PERÚ

RESIDENTIAL DEMAND FORECASTING METHODOLOGY FOR LONG-TERM ENERGY PLANNING IN PERU

José Meza-Segura^{1*} 0000-0002-1743-8792

Jaime Luyo-Kuong¹ 0000-0002-1890-8127

¹Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Mecánica, Lima, Perú

***Autor de la correspondencia:** José Meza-Segura, E-mail: jose.meza.s@uni.pe

RESUMEN

A nivel mundial existen modelos de proyección de la demanda que sirven de base para el planeamiento energético. Sin embargo, como la mayoría de estos modelos pertenecen a países desarrollados dichos modelos deben ser evaluados, complementados y mejorados a fin de identificar la metodología que mejor se adapte a las particularidades de un país en vías de desarrollo como el Perú y a la vez cumplan con los retos que plantean los sistemas energéticos actuales como son: la aparición de tecnologías disruptivas y un contexto internacional de lucha contra el cambio climático. El objetivo del presente artículo es definir una metodología de proyección de la demanda del sector residencial integrando los modelos de uso final mediante rotación de stocks y el modelo de sustitución mediante evaluación multicriterio, para lo cual se han identificado los factores de valor presente neto, costo de inversión, calidad de presentación e impacto ambiental en el modelo a través de la evaluación multicriterio de modo que se obtengan los niveles de penetración y regresión por fuentes y tecnologías, para finalmente ser integrados en el software de modelamiento energético LEAP y así evaluar toda la matriz energética peruana en su conjunto. La metodología se aplicó para el estudio de caso del sector residencial en el Perú y se determinó tanto la evolución del parque de equipos de consumo energético; el nivel de sustitución por fuente y tecnología; así como, su comparación con los resultados obtenidos a través de modelos econométricos y de optimización del uso final.

Palabras Clave: demanda residencial, rotación de stock, sustitución, multicriterio, mitigación GEI

ABSTRACT

Worldwide there are demand projection models that serve as the basis for energy planning. However, as most of these models belong to developed countries, these models must be evaluated, complemented and improved in order to identify the methodology that best adapts to the particularities of a developing country such as Peru and at the same time complies with

the challenges posed by current energy systems such as: the emergence of disruptive technologies and an international context in the fight against climate change. The objective of this article is to define a methodology for projection of demand in the residential sector integrating end-use models through stock rotation and the substitution model through multicriteria evaluation, for which the factors of net present value, cost have been identified. of investment, quality of presentation and environmental impact in the model through the multicriteria evaluation so that the levels of penetration and regression are obtained by sources and technologies, to finally be integrated into the LEAP energy modeling software and thus evaluate all the Peruvian energy matrix as a whole. The methodology was applied to the case study of the residential sector in Peru and both the evolution of the park of energy consumption equipment was determined; the level of substitution by source and technology; as well as its comparison with the results obtained through econometric and end-use optimization models.

Keywords: *residential demand, stock turnover, substitution, multicriteria, GHG mitigation*

1. INTRODUCCIÓN

La comisión mundial para el medio ambiente y desarrollo [1], concluyó que un uso sostenible de la energía era fundamental para apoyar el crecimiento económico, la fiabilidad energética y el bienestar humano, Indicando que en los próximos cincuenta años las naciones tendrían la oportunidad de producir los mismos niveles de servicios energéticos con la mitad del suministro primario consumido en ese entonces. Dicho paradigma fue recogido en el objetivo número 7 en [2], donde se plantearon metas al año 2030 tanto en el lado de la demanda como de la oferta de energía.

En el contexto internacional de lucha contra el cambio climático, investigaciones en opciones de mitigación de GEI como las realizadas por McKensey en [3], H. Harvey [4] identificaron que las medidas de mitigación en el sector de la demanda de energía podrían llegar a representar el 30% de reducciones de GEI necesarias para mantener el incremento de la temperatura global por debajo de los 2°C. Mientras, que J. Rogelj et al [5] señalan que los diferentes sectores no son independientes entre sí, y hacer cambios en uno tiene implicaciones para otro, por ejemplo, si se tiene un elevado consumo de energía, esto podría significar menos flexibilidad en la elección de las opciones de mitigación disponibles. Asimismo, la dinámica de la demanda de energía está influenciada por la inercia de los stocks de equipos instalados en el mercado, lo que conduce a una flexibilidad limitada como señala Bhattacharyya en [6].

La presente investigación integra un modelo de uso final por rotación de stock y un modelo de sustitución de análisis multicriterio para proyectar la demanda anual de energía del sector residencial, forma parte del planteamiento metodológico presentado por J. Meza en [7]. Y fue aplicada en el estudio de caso peruano a fin de proyectar la demanda del sector residencial e integrarla al modelo LEAP.[8] y realizar una prospectiva energética de largo plazo, que corresponde a las necesidades y realidad energética del país, evitando la dependencia de iniciativas de escasa utilidad y coherencia en estudios encargados por el Estado a consultorías foráneas en las dos últimas décadas. El enfoque metodológico propuesto fue comparado con información estadística y los resultados de estudios de prospectiva disponibles, finalmente se ha definido un procedimiento estandarizado y replicable que permite su aplicación tanto a actores del sector energía como de la academia.

2. ANTECEDENTES

Una revisión de los enfoques de pronóstico de la demanda sugiere la existencia de una gran variedad de técnicas utilizadas por diferentes conjuntos de usuarios como se presentan en [9] y [10]; sin embargo, muchos de los enfoques son empleados para proyecciones de energéticos de forma agregadas, por ejemplo, el consumo de electricidad nacional. Mientras que los modelos de proyección de la demanda necesarios para realizar prospectiva de largo plazo, como Bhattacharyya señala en [11], han intentado capturar la dinámica de los sectores de demanda de energía de dos maneras: i) mediante el enfoque econométrico que trata de capturar el comportamiento de la demanda dentro de la teoría económica y ii) el enfoque de uso final que sigue los conceptos de ingeniería y critica las limitaciones del comportamiento optimizador y racional asumido en el análisis econométrico y en cambio, introducen las suposiciones de comportamiento, satisfacción, enfoque evolutivo para el cambio tecnológico y creencias.

2.1 MODELOS ECONOMÉTRICOS

El enfoque econométrico incorpora de manera implícita los cambios tecnológicos y la sustitución entre energéticos ocurridos en el periodo para los cuales existe data histórica. Para ello relaciona variables explicativas como el PBI de cada subsector, población, precios relativos de combustibles, parque automotriz y/o equipos de consumo entre otros; con los consumos energéticos registrados para el mismo periodo, basado en la relación entre estos parámetros observados en el pasado. Por lo tanto, las proyecciones econométricas asumen que las evoluciones históricas de las variables se mantienen en el tiempo y no incorporan la aparición de tecnologías nuevas.

Una de las primeras aplicaciones de este enfoque se realizó en el año 1951 por Houthakker en [12], sobre la demanda de electricidad urbana en reino unido. A partir de ese hito, han sido muchas las aplicaciones de modelos econométricos en el sector residencial. La tabla 1, presenta los principales tipos de ajustes que se emplean y estudios donde se emplearon:

El ajuste logarítmico lineal se usa comúnmente para facilitar la estimación y la simplicidad. Sin embargo, la demanda de energía residencial depende del stock de equipos y otras variables económicas, en el corto plazo se espera que la demanda sea limitada por el stock existente, que a su vez influiría en la respuesta del consumidor a cualquier cambio en las variables económicas. Otro ajuste muy empleado en modelos econométricos es el translog cuyo uso se inició en 1970 para el modelamiento en dos etapas. Mientras que los modelos logit se hicieron bastante populares, a menudo como una alternativa a los modelos translog. La otra característica de estos estudios es su uso de microdatos de encuestas o fuentes similares, lo que inició una nueva tendencia en el modelado de la demanda.

TABLA I. Tipos Ajustes en Modelo Econométricos e investigaciones

Tipo de ajuste	Investigación
Logarítmico Lineal	[12]
Translog	[13]
Logit	[14]

Los estudios académicos más recientes se han basado en el enfoque de cointegración (y otros métodos econométricos avanzados) para el análisis de la demanda del sector residencial. La mayoría de estos estudios tienden a centrarse en la demanda agregada en el sector y están preocupados por identificar las relaciones de cointegración. Aunque existe una gran cantidad de estudios econométricos para los países desarrollados como el desarrollado por la IEA en [18], se ha dado un enfoque limitado a la demanda de energía residencial en los países en vías de desarrollo y especialmente en las zonas rurales. La principal dificultad a la que se enfrentan a menudo los sectores residencial y comercial para analizar la demanda energética es la disponibilidad de datos, especialmente de los desgloses de consumo final del consumo de energía. Además, como la eficiencia del uso final del uso tradicional de combustible es comparativamente baja, el consumo final de energía, incluidas las energías tradicionales, puede ocultar ciertos cambios que tienen lugar dentro del patrón de consumo de energía sectorial. El análisis econométrico convencional tiende a ignorar la transacción sin costo del uso de energía tradicional en las zonas rurales, especialmente debido a la falta de una serie temporal confiable. Sin embargo, tal omisión puede ser difícil de justificar dado que se espera que la población mundial con uso tradicional para cocinar de la biomasa sea de aun 1.5 billones de personas en el 2050 según [19].

2.2 MODELOS DE USO FINAL

Los cambios en la demanda de energía en el sector residencial están relacionados con el cambio en la cantidad de población y los cambios en la demanda per cápita. Medir la actividad es difícil ya que hay muchas actividades diferentes que usan energía que tienen lugar en los hogares. Por esa razón, la cantidad de hogares se utiliza como indicador de la actividad residencial. Asimismo, como existen diferentes usos finales (iluminación, cocción, calentamiento de agua, calefacción, ventilación, refrigeración de alimentos, entre otros) y diferentes electrodomésticos o aplicaciones dentro de los usos finales, la demanda total de energía se obtiene sumando todas las aplicaciones en un uso final y luego agregando la demanda de todos los usos finales.

El consumo total de energía para calefacción y aire acondicionado de un país para un año determinado está determinado por el consumo promedio de energía por hogar y por edificio para esos fines, y el número total de hogares y edificios para ese año. Del mismo modo, la demanda energética para cocinar está relacionada con la demanda unitaria por hogar y el número de hogares. Asimismo, el requerimiento de iluminación se expresa como una función de la cantidad de puntos de iluminación y el número de hogares. Como el patrón de demanda en los hogares varía con el nivel de ingresos y la ubicación geográfica (rural y urbana), se obtienen mejores resultados desglosando la demanda por nivel de ingresos y áreas rurales y urbanas. La demanda total en ese caso sería la suma de las demandas de todas las categorías y ubicaciones. Algunos de los principales estudios que utilizan este enfoque se presentan en [20]-[25].

Las interrelaciones entre el comportamiento del consumo y las opciones tecnológicas se capturan comúnmente en estos estudios. También cubren las energías tradicionales, así como las diferencias en la demanda por clase de ingresos. Además, el enfoque de uso final refleja la

transición del uso de energía en el sector residencial debido a los efectos inducidos por los ingresos y las políticas. En consecuencia, este enfoque se adapta mejor a las necesidades de los países en vías de desarrollo.

2.3 MODELOS EMPLEADOS EN EL PERÚ

En el contexto nacional, J. Meza en [7] presentó que los estudios de planeamiento energético llevados a cabo en el Perú en su mayoría han empleado modelos econométricos para modelar la demanda, en especial en el sector residencial.

3. METODOLOGÍA

Se ha estructurado una metodología que se presenta en la figura 1, la cual está compuesta de las siguientes etapas: i) recopilación de información, ya que un análisis de uso final de la demanda residencial requiere de información muy detallada; ii) un modelo de uso final por rotación de stock para realizar análisis del parque de equipos de consumo de energía, iii) Un modelo de sustitución, debido a que existen diferentes opciones de equipos para cubrir una misma necesidad energética. iv) finalmente se empleó el modelo LEAP para consolidar las variables modeladas en las etapas anteriores e integrarla al balance de energía nacional y calcular las emisiones de GEI.

3.1 RECOPILOCIÓN DE INFORMACIÓN

El objetivo principal de esta etapa es la de sistematizar, ordenar y suministrar la información necesaria a fin de modelar adecuadamente la demanda energética de acuerdo con la metodología propuesta. El apéndice B, presenta una tabla con el tipo de información y tipos de documentos a ser consultados.

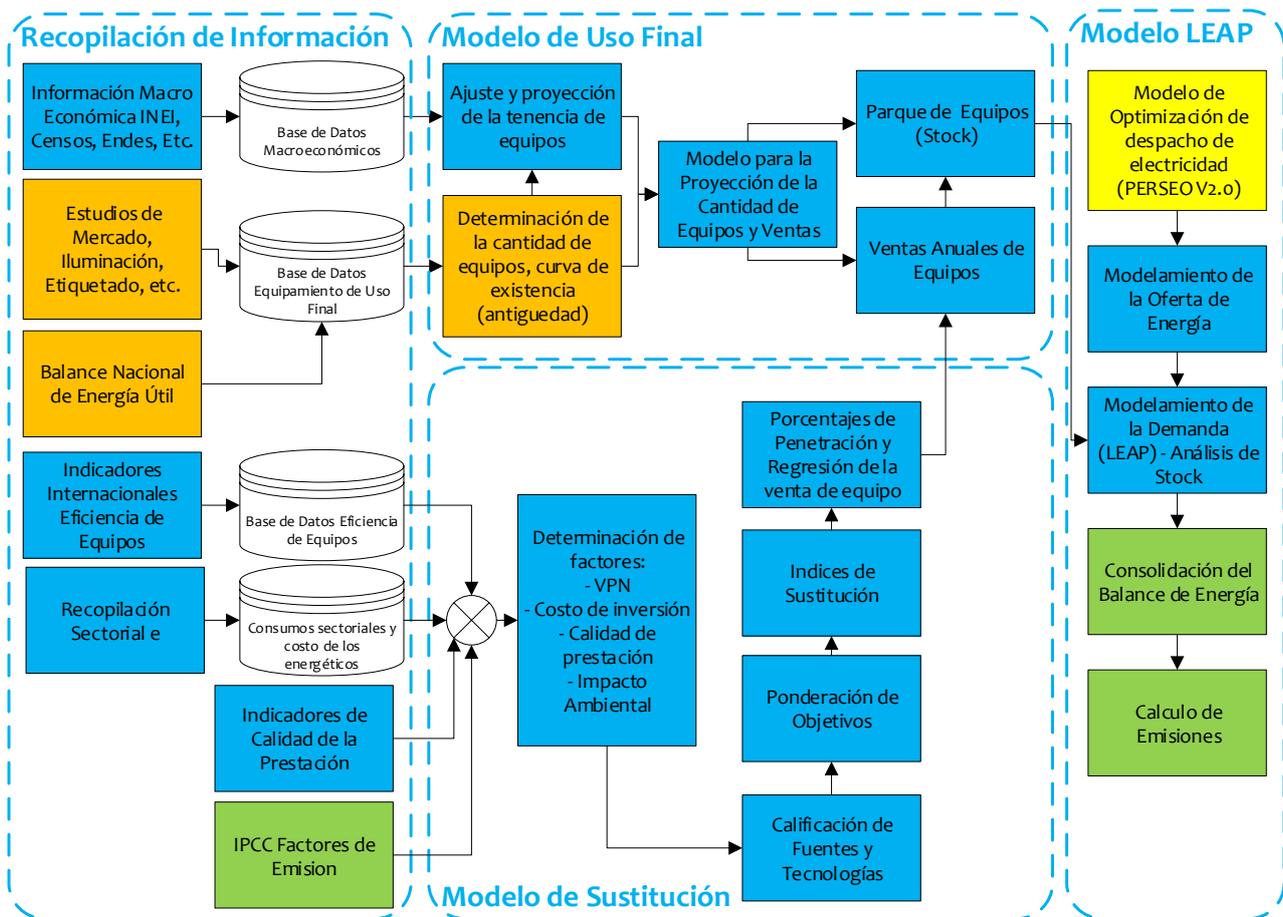


Fig. 1. Esquema Metodológico Propuesto.

3.2 MODELO DE USO FINAL POR ROTACIÓN DE STOCK

La componente de uso final emplea el modelamiento mediante rotación de stock, basada en los procedimientos descritos en [26] y [27], y se presenta en la figura 2, dicho enfoque contabiliza el parque de equipos de cada año como la suma del parque de equipos que se tenía el año anterior mas la venta de equipos que se realiza en el presente año. El parque de equipos (stock) de cada año se calcula de acuerdo con la ecuación (1).

$$S_{(t)} = T_{(t)} \times H_{(t)}, \quad (1)$$

Donde:

$S_{(t)}$: Stock de equipos en el año “t”

$T_{(t)}$: Tenencia de equipos por hogar en el año “t”

$H_{(t)}$: Cantidad de hogares en el año “t”

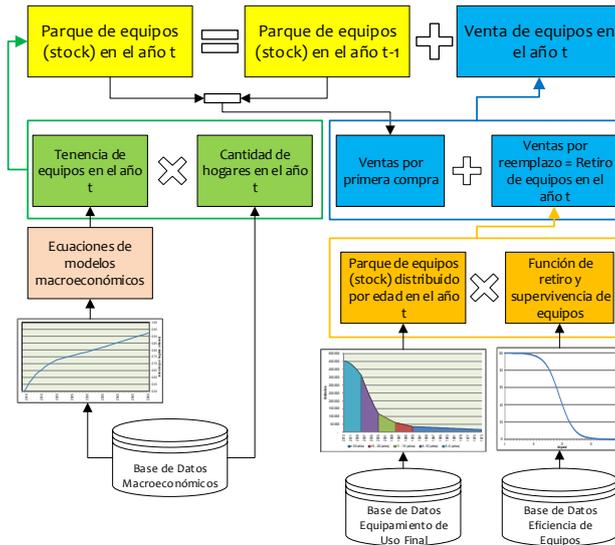


Fig. 2. Esquema del Modelo de Rotación de Stock.

Los porcentajes de tenencia de equipos se calculan aplicando las ecuaciones macroeconómicas descritas en [27] - [29], para el uso de iluminación en las zonas electrificadas se evalúa la cantidad de puntos de iluminación con los que cuenta un hogar y para el uso de cocción la tenencia es mayor al 100% debido a que existen hogares que emplean más de un equipo y una fuente de energía para la cocción de alimentos.

La venta de equipos en cada año se calcula de acuerdo con la ecuación (2)

$$V_{(t)} = S_{(t)} - S_{(t-1)} + \sum_{i=0}^n Ret_{(i)} \times Ant_{(i,t)}, (2)$$

Donde:

$V_{(t)}$: Venta de equipos en el año “t”

$S_{(t)}$: Stock de equipos en el año “t”

$S_{(t-1)}$: Stock de equipos en el año “t-1”

$Ret_{(i)}$: Retiro de equipos con antigüedad “i”

$Ant_{(i,t)}$: Equipos con antigüedad “i” en el año “t”

n : edad máxima de equipos

Esta venta de equipos está compuesta por: i) la venta que va destinada a cubrir la necesidad de hogares que no contaban con el equipo (primera compra) que se calcula como la variación de stock en un año y ii) la venta que va destinada a los hogares que ya contaban con el equipo y lo tienen que reemplazar por obsolescencia o por falla, y se calcula como el producto de la función de retiro anual y la distribución del parque de equipos por antigüedad.

La función de retiros por antigüedad se calcula de acuerdo con la ecuación (3) y es función directa de la función de supervivencia anual.

$$Ret_{(i)} = \frac{Sup_i - Sup_{i-1}}{1 - Sup_{i-1}}, (3)$$

Donde:

$Ret_{(i)}$: Retiro de equipos con antigüedad “i”

Sup_i : Tenencia de equipos por hogar en el año “t”

Sup_{i-1} : Cantidad de hogares en el año “t”

3.3 MODELO DE SUSTITUCIÓN POR ANÁLISIS MULTICRITERIO

Cuando existen varias opciones de equipos y fuentes para cubrir una necesidad energética se deben aplicar unos criterios de sustitución. En la presente investigación se propone el análisis multicriterio basado en [30] - [32] a través de la implementación del modelo presentado en la figura 3. Se comienza con la evaluación de factores económicos y sociales que inciden en la elección de fuentes y tecnologías del consumo de energía. Los 4 factores seleccionados son: el valor presente neto, el costo de inversión, la calidad de la prestación y el impacto ambiental.

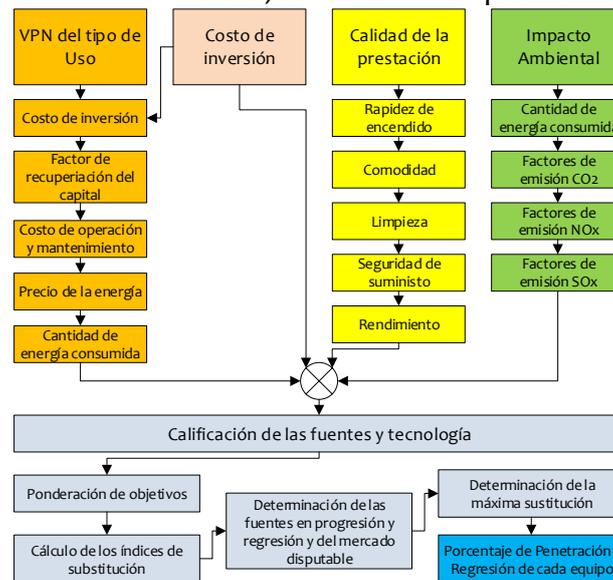


Fig. 3. Esquema del Modelo de Sustitución.

El Valor presente neto se calcula mediante la ecuación (4).

$$VPN = Inv * FRC + CO\&M + PE * QE, \quad (4)$$

Donde:

Inv : Costo de Inversión del equipo

FRC : Factor de recuperación de la inversión

$CO\&M$: Costo de operación y mantenimiento

PE : Precio de la energía

QE : Consumo de energía

El factor de recuperación se calcula mediante la ecuación (5).

$$FRC = \frac{(1+r)^{n*r}}{(1+r)^n - 1}, \quad (5)$$

Donde:

r : tasa de descuento

n : vida útil del equipo

La calidad de la prestación es calculada a partir de la evaluación de las características de, rapidez de encendido, comodidad, limpieza, seguridad de suministro y rendimiento, donde cada una se valora del 1 al 10 y posteriormente dichas evaluaciones se ponderan teniendo en cuenta un mismo peso inicial del 20% del indicador total. La subjetividad en la asignación de valores y pesos puede reducirse recurriendo a las opiniones de expertos independientes o eventualmente a la realización de encuestas. El impacto ambiental se calcula como el producto de la energía consumida por el equipo o fuente evaluada y los factores de emisión determinados en [33].

Una vez identificados los factores que inciden en la penetración y regresión de las fuentes, por los cuales el consumidor orienta su elección de la tecnología y la fuente, se calcula un índice de participación, si el objetivo del factor es un mínimo mediante la ecuación (6) y si el objetivo del factor es un máximo mediante la ecuación (7).

$$Ip_{ij} = \frac{Cmin_j}{Cij} \times 10, \quad (6)$$

$$Ip_{ij} = \frac{Cij}{Cmax_j} \times 10, \quad (7)$$

Donde:

Ip_{ij} : Índice de participación del equipo “i” en el objetivo “j”

Cij : Valor del factor del equipo “i” en el objetivo “j”

$Cmin_j$: Valor mínimo del factor en el objetivo “j”

$Cmax_j$: Valor máximo del factor en el objetivo “j”

Una vez se calculan los índices de participación se deben ponderar los objetivos tratando de realizarlo con la menor subjetividad posible, recurriendo a la opinión de expertos. A continuación, se calculan los índices de sustitución para cada equipo que tiene en cuenta todos los factores y objetivos considerados, para ello se emplea la ecuación (8).

$$Is_i = \frac{\sum_0^j Ip_{ij} * p_j}{10}, \quad (8)$$

Donde:

Is_i : Índice de sustitución del equipo “i”

p_j : Peso del objetivo “j”

A fin de determinar si un equipo aumentara su participación, es decir está en “progresión” o si la disminuirá y está en “regresión”, para ello comparamos cada índice de sustitución con el promedio de los índices de sustitución, es decir los equipos cuyos índices de sustitución sean mayores al índice estarán en “progresión” y cuando sean menores estarán en “Regresión”, siendo la sumatoria de los equipos en regresión el mercado disputable a sustituir.

A continuación, se determina la máxima porcentaje del mercado disputable que será sustituido, para ello se debe considerar la opinión de expertos en cuanto al máximo grado de avance que pueden tomar los procesos de sustitución, este porcentaje se determina sobre la

base de la evolución histórica de los consumos de energía neta por fuente. Finalmente, se calculan los máximos porcentajes de penetración y regresión de cada equipo.

3.4 MODELO LEAP

El modelo LEAP [26] nos permite analizar en detalle la demanda por uso final de energía por tipo de usuario, fuente y tecnología. Asimismo, incluye el modelamiento de las diferencias estadísticas, los centros de transformación, las variaciones de stock y los recursos siguiendo el diagrama de flujo que se presenta en la figura 4, un ejemplo de aplicación reciente lo tenemos en [34].

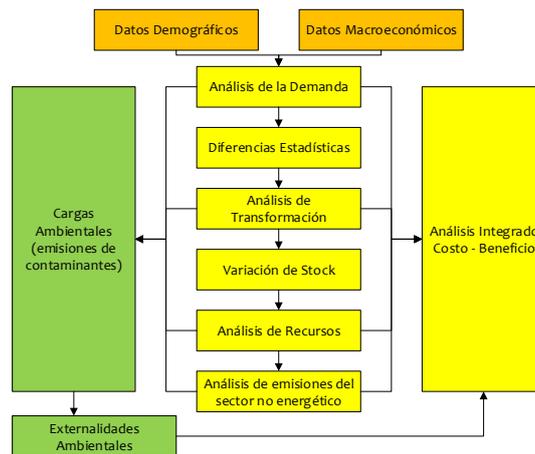


Fig. 4. Diagrama de Flujo del modelo LEAP. [27]

Asimismo, se ha incluido una componente de optimización que utiliza el modelo PERSEO 2 [35] el cual nos permite optimizar el despacho de energía eléctrica a mínimo costo y determinar los costos marginales. Con esta finalidad, sigue la secuencia que se presenta en la figura 5. Inicia con la lectura de los archivos de datos, los cuales contienen toda la información relevante del sistema eléctrico. Seguidamente, efectúa la formulación matemática, para ello se han implementado, en GAMS, un conjunto de rutinas que traducen los datos ingresados en las ecuaciones matemáticas correspondientes. A continuación, se realiza la llamada a la herramienta de optimización que, en este caso, corresponde al optimizador CPLEX®. Este optimizador, se encarga de obtener la solución óptima de mínimo costo para cada una de las secuencias hidrológicas evaluadas, para ello dispone de varias técnicas de optimización lineal. Finalmente, se generan los reportes con un formato compatible con el EXCEL y son importados al LEAP para realizar la consolidación del balance nacional de energía.

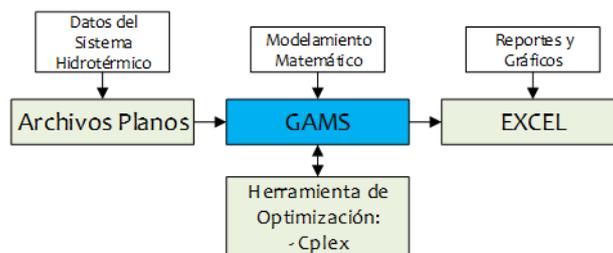


Fig. 5. Esquema Funcional del Modelo PERSEO 2. Manual de Usuario PERSEO 2. [35].

Sobre la base de los resultados de la proyección de la demanda, y la proyección de la oferta de los centros de transformación (necesaria para cubrir la demanda) que incluye el despacho de electricidad resultante de la componente de optimización, y se procede con la consolidación de los balances de energía.

El cálculo de emisiones se realiza sobre los resultados de los balances de energía, para ello, se hace uso de los factores de emisión por tipo de sector definidos en [33].

3.5 VENTAJAS DEL MODELO

La metodología permite realizar un análisis detallado de la demanda de energía en el sector residencial a fin de identificar la evolución del parque de equipos de consumo de energía, el efecto del cambio tecnológico y la mejora de la eficiencia energética

El uso de la componente de optimización del despacho de electricidad nos permite determinar los costos marginales de la energía eléctrica con lo cual podemos calcular el impacto tarifario que tendrán los escenarios de medidas de mitigación evaluados.

3.6 DIFICULTADES EN EL USO DEL MODELO

EL modelo requiere de un volumen importante de información por lo que requiere de una gestión de base de datos eficiente, Por otro lado, la evaluación multicriterio es altamente dependiente del criterio de expertos para la determinación de tendencias y formulación de supuestos.

3.7 INVESTIGACIONES FUTURAS

En futuros trabajos se tratará el modelamiento de la demanda de los otros sectores de consumo de energía, Asimismo, los resultados se pueden integrar a un modelo de equilibrio general de la economía, para determinar los impactos de planes de eficiencia energética y medidas de mitigación en el desarrollo del sector económico. Los modelos de equilibrio general incorporan los shocks esperados para la economía en el periodo de análisis. Con ello se puede hacer un análisis de la compatibilidad entre los supuestos realizados para el sector energético para el LEAP (por ejemplo, tasas de crecimiento) y los que se obtengan del modelo de equilibrio para la economía.

Por otro lado, la metodología adoptada permite que la componente por uso final se vaya enriqueciendo y paulatinamente se logre más información sobre el parque de equipos de consumos de energía, esto siempre y cuando el balance de energía útil del país sea actualizado y/o se realicen encuestas del parque de consumo a nivel nacional.

4. RESULTADOS: ESTUDIO DE CASO PERÚ

Con la finalidad de probar el desenvolvimiento del modelo se ha desarrollado el estudio de caso de la proyección de la demanda del sector residencial de Perú y posteriormente se ha integrado con el resto del sistema energético peruano modelado en LEAP. La Tabla B1, presenta la información recopilada y los documentos consultados. La Tabla B2 presenta los

datos macroeconómicos empleados y las Tabla B3 y B4, presentan los consumos de energía neta por fuentes y usos identificados en [45], que sirvieron de base para la estructuración del parque de equipos. Luego de aplicar las ecuaciones macroeconómicas descritas en [27] se obtiene la proyección de los porcentajes de tenencia de los equipos de consumo energético, como ejemplo la figura 6 presenta la curva de tenencia resultante para las refrigeradoras y congeladoras en el sector residencial urbano.

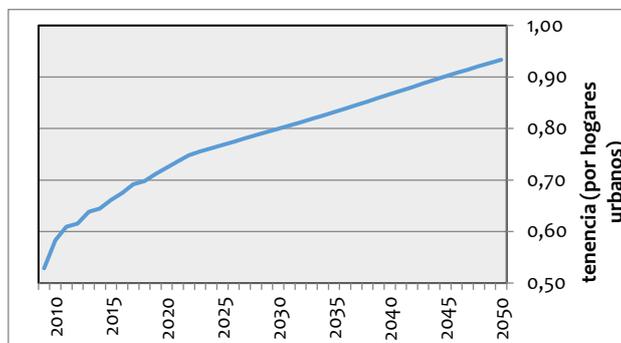


Fig. 6. Tenencia de refrigeradoras en el sector residencial urbano.

Asimismo, como resultado de aplicar el modelo de sustitución por análisis multiobjetivo, se obtienen la proyección de la participación de cada equipo en las ventas anuales. La Figura 7, a modo de ejemplo presenta los resultados del análisis realizado para el uso: cocción de alimentos en el sector residencial rural, donde se observa que tanto la participación de las cocinas a carbón vegetal, y la bosta y yareta están en regresión mientras que la participación de las cocinas a GLP se encuentra en progresión.

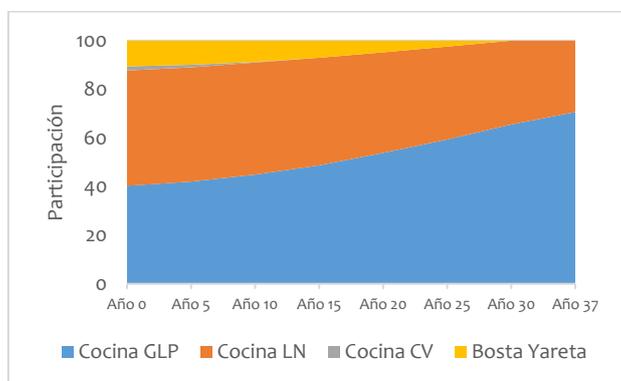


Fig. 7. Evolución de la Participación en las ventas de equipos de cocción.

La Tabla II y la Tabla III presentan los resultados de la proyección de tenencia y participación de equipos de consumo del sector residencial para las zonas urbana y rural, respectivamente.

TABLA II. Proyección de tenencia y participación de equipos de consumo energético en el Sector Residencial – Zona Urbana

Uso	Equipo	Fuente	Año 2017		Año 2030		Año 2050	
			Tenencia	%	Tenencia	%	Tenencia	%
Iluminación	Incandescentes	EE	100	6.37	100	-	100	-

	Fluorescentes	EE		6.58		2.98		-	
	CFL	EE		78.99		83.92		71.46	
	Dicroicos	EE		7.79		-		-	
	LED	EE		0.27		13.10		28.54	
Cocción	Cocina	GLP	100	71.48	100	73.43	100	77.02	
		GD		5.38		7.32		11.69	
		LNA		16.91		14.71		6.38	
		EE		0.77		2.02		4.90	
		CV		4.61		2.52		-	
		BY		0.85		-		-	
Calentamiento de Agua	Duchas	EE	25.25	75.55	40.04	77.32	50.98	78.56	
		Instantáneo		10.95		11.22		11.46	
		Tanque		8.7		5.26		1.81	
		Instantáneo	GD		0.47		1.03		1.53
		Tanque	GD		0.7		0.68		0.67
		Instantáneo	GLP		0.33		0.62		0.88
		Tanque	GLP		0.85		-		-
Calefacción	Calefactor	EE	0.59	96.5	3.10	90.5	21.22	83.8	
		Estufa	GD		4.5		9.5		16.2
		Ventilador	EE	19.10	99.44	21.57	98.85	24.80	98.43
		Aire	Acondicionado	EE		0.56		1.15	
Refrigeración de Alimentos	Refrigeradoras	EE	69.20	100	79.90	100	93.35	100	
Artefactos Diversos	Lavadora	EE	41.85	100	52.55	100	53.03	100	
	Secadora	EE	1.19	100	9.05	100	42.01	100	
	Televisores	EE	100	100	100	100	100	100	

Nota: ver apéndice A: tabla de acrónimos, Valores año 2017 [45] - [48].

TABLA III. Proyección de tenencia y participación de equipos de consumo energético en el Sector Residencial – Zona Rural

Uso	Equipo	Fuente	Año 2017		Año 2030		Año 2050	
			Tenencia	%	Tenencia	%	Tenencia	%
Iluminación	Incandescentes	EE	100	14.28	100	6.98	100	-
	Fluorescentes	EE		9.24		2.98		-
	CFL	EE		76.18		83.92		89.56

	Dicroicos	EE		0.26		-		-
	LED	EE		0.04		6.12		10.44
Cocción	Cocina	GLP	100	40.29	100	47.42	100	67.82
		LNA		47.45		44.92		32.18
		CV		1.66		0.01		-
		BY		10.60		7.65		-
Calefacción	Calefactor	EE	0.05	100	0.52	100	1.25	100
Ventilación y refrigeración ambiental	Ventilador	EE	1.77	100	6.15	100	18.40	100
Refrigeración de Alimentos	Refrigeradoras	EE	20.70	100	31.38	100	31.55	100
Artefactos Diversos	Lavadora	EE	1.42	100	5.42	100	12.42	100
	Secadora	EE	0.07	100	2.32	100	5.12	100
	Televisores	EE	72.99	100	78.58	100	88.40	100

Nota: ver apéndice A: tabla de acrónimos. Valores año 2017 [45] - [48]

El siguiente paso es ingresar los datos obtenidos al modelo LEAP donde se realiza el cálculo de la rotación de stock y las ventas anuales de equipos. La figura 8 y la figura 9 presentan la proyección del stock de equipos y las ventas anuales de equipos, respectivamente. En ambas figuras se aprecia la gran participación en cantidad de unidades que tienen los equipos de iluminación.

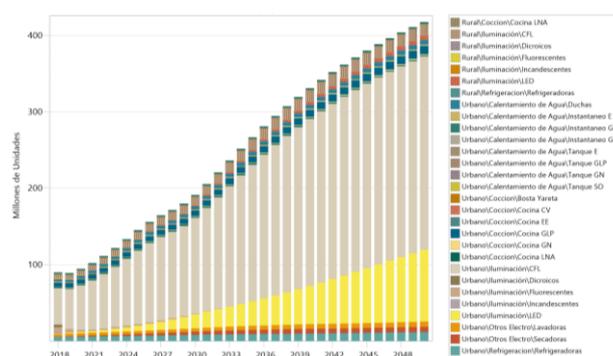


Fig. 8. Proyección del parque de equipos de consumo.

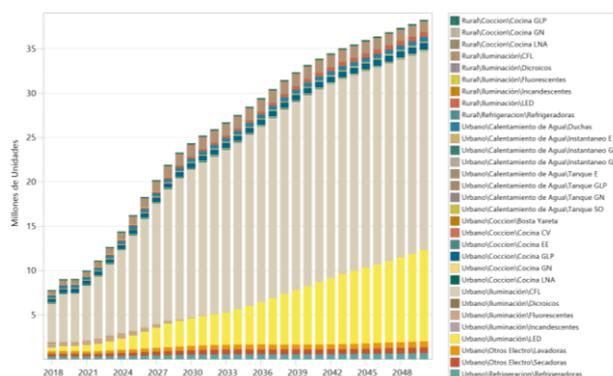


Fig. 9. Proyección de la venta de equipos de consumo.

Finalmente, se aplican los consumos unitarios de energía del parque instalado y de las nuevas unidades que ingresaran, y se obtiene la proyección de la demanda de energía agregada de todo el sector residencial, La figura 10, presenta la proyección de la demanda de energía del escenario BAU.

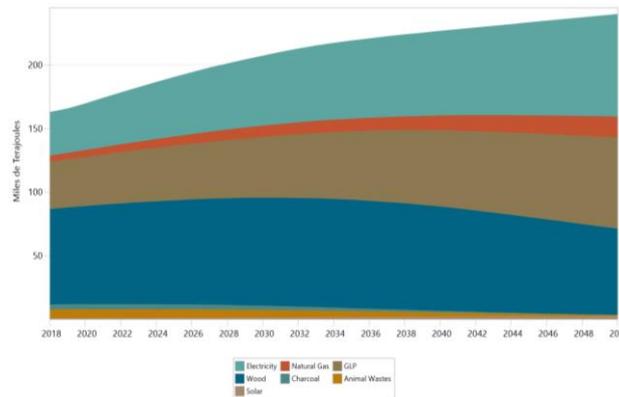


Fig. 10. Proyección de la demanda de energía - Sector Residencial

De los resultados de la proyección de la demanda se deduce que si bien es cierto habrá una sustitución importante de la leña y bosta y yareta, esta no se realizara de forma inmediata ya que se tiene que romper la inercia del parque instalado de equipos de baja calidad con los que se cuenta. Asimismo, se observa que este efecto de sustitución contribuirá a que el crecimiento de la demanda no sea ilimitado, sino que se comienza a distinguir una saturación en el crecimiento de la demanda a partir del año 2035.

La figura 11, presenta la comparación de la demanda proyectada a través del método propuesto, el modelo econométrico y un modelo de uso final de optimización empleado en [52]. Donde se observa que el modelo econométrico tiene poca respuesta a los cambios estructurales que sufre la demanda debido a la compra de equipos nuevos y a reemplazar equipos antiguos por unos con mayor eficiencia. En el caso de la proyección que emplea un algoritmo de optimización, solo se cuenta con dos puntos al año 2017 y 2040, los cuales indican que existe una reasignación óptima de tecnologías eficientes con lo cual la demanda de energía en el sector residencial se reduce en cada año de análisis.

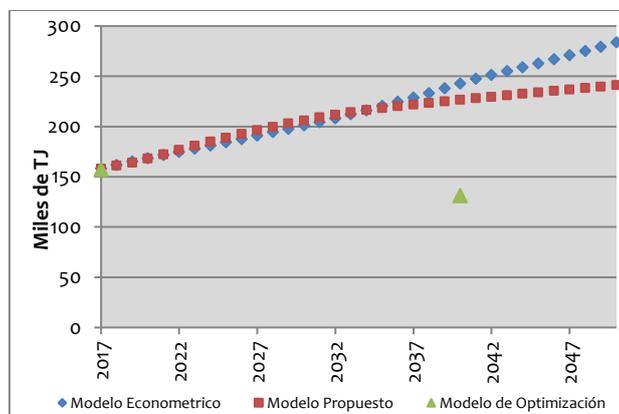


Fig. 11. Comparación de la demanda resultante con otros métodos de proyección.

CONCLUSIONES

- Existe un número significativo de equipos de calentamiento de agua que usan electricidad instalados en el Perú, por lo que el consumo de este energético habría sido subestimado en [46].
- Debido a que existe un stock de equipos instalados actualmente, el cambio tecnológico se dará de forma paulatina a medida que los equipos de mayor edad salgan del mercado, serán substituidos por equipos más eficiente y este efecto será captado en el largo plazo
- En modelo planteado corrobora que la evolución de la demanda de energía en el sector residencial no obedece a un modelo de crecimiento económico infinito, sino que existe un punto de desacople con el crecimiento económico el cual es explicado por la saturación en la tenencia de equipos y por la mejora en la eficiencia de estos.
- El modelo planteado involucra criterios de razonabilidad en la substitución ya que esta se realiza sobre la base de supuestos basados en criterios de expertos y no en una optimización que busca el suministro y uso de energía a menor costo.
- El modelo propuesto al estar integrado en un modelo energético integral evita la doble contabilidad de la mitigación de GEI.
- En el Perú no existe un modelo de proyección de la demanda estandarizado que sirva de base para los estudios de prospectiva. El modelo presentado es una primera iniciativa centrada en las características propias del sector energía nacional.

AGRADECIMIENTOS

Los autores brindan un agradecimiento especial al Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica (Convenio n ° 207-2015-FONDECYT) por la beca de doctorado en ciencias con mención en energética.

REFERENCIAS

- [1] World commission on environment and development, “Our common future”, United Nation, Technical Report, Oslo, Norway, Aug 1987.
- [2] Asamblea General de las Naciones Unidas, “Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible”, United Nation, Resolución A/RES/70/1, Nueva York, USA, Oct 2015.
- [3] McKensey y Company, “Pathways to a Low-Carbon Economy: Version 2 of the global greenhouse gas abatement cost curve”, McKensey & Company, Technical report, Washington, USA, Sep 2013.
- [4] H. Harvey, Designing Climate Solutions. Washington, United States: Island Press, 2018.
- [5] J. Rogelj, D. Shindell, K. Jiang, S. Fifita, P. Forster, V. Ginzburg, C. Handa, H. Khesghi, S. Kobayashi, E. Kriegler, L. Mundaca, R. Séférian, y M.V. Vilariño, “Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development”, en Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty, Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield, Ed. Rijeka, Croatia: In Press, 2018, pp. 93–163. [Online]. Available: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15_Chapter2_Low_Res.pdf
- [6] S.C. Bhattacharyya, *Energy Economics* 2nd ed. Leicester, Leicestershire, UK: Springer, 2019.

- [7] J. Meza y J. E. Luyo, “Modelos de planeamiento energético aplicados en Perú: una revisión y propuesta metodológica”, *Revista ECIPerú*, vol. 17, no. 1, pp. 11–19, feb. 2020.
- [8] C.G. Heaps, (2020), LEAP: The Low Emissions Analysis Platform. [Version software: 2020.1.19] Stockholm Environment Institute. Somerville, MA, USA. Available: <https://leap.sei.org>
- [9] L. Suganthi y A. Samuel, “Energy models for demand forecasting - A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 2, pp. 1223–1240, feb. 2012.
- [10] K. B. Debnath y M. Mourshed, “Forecasting methods in energy planning models”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 88, pp. 297–325, mar. 2018.
- [11] S. C. Bhattacharyya y G.R. Timilsina, “Energy Demand Models for Policy Formulation: A comparative Study of Energy Demand Models”, World Bank Policy Research Working Paper WPS4866, mar. 2009.
- [12] H. S. Houthakker, “Some Calculations on Electricity Consumption in Great Britain”, *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*, vol. 114, no. 3, pp. 359–371, 1951.
- [13] R. S. Pindyck, *The structure of world energy demand*, Cambridge, Massachusetts, USA: The MIT Press, 1979.
- [14] D. L. Mcfadden, “Conditional logit analysis in quantitative choice behaviour”, *Frontiers of Econometrics*, P. Zarembka, Ed. New York, USA: Academic Press, 1973, pp. 105–142.
- [15] M. P. Clements and R. Madlener, “Seasonality, cointegration and forecasting UK residential energy demand”, *Scottish J. of Political Economy*, vol. 46, no. 2, pp. 185–206, 1999.
- [16] E. Ziramba, “The demand for residential electricity in South Africa”, *Energy Policy*, vol. 36, no. 9, pp. 3460–3466, 2008.
- [17] F. Halicoglu, “Residential electricity demand dynamics in Turkey”, *Energy Economics*, vol. 29, no. 9, pp. 199–210, 2007.
- [18] International Energy Agency. Methodology for Energy Access Analysis, WEO Model Documentation. 2019 Version [En línea]. Available: <http://www.worldenergyoutlook.org/weomodel/documentation>
- [19] International Energy Agency, “Energy and the Sustainable Development Goals”, en *World Energy Outlook 2019*, pp. 81–132.
- [20] W. McAleer, “A regional end use energy demand model”, *Omega*, vol. 10, no. 6, pp. 629–639, 1982.
- [21] H. Farahbakhsh, V. I. Ugursal y A. S. Fung, “A Residential End-Use Energy Consumption Model for Canada”, *International Journal of Energy Research*, vol. 22, no. 13, pp. 1133–1143, 1998.
- [22] S. Tanatvanit, B. Limmeechokchai y S. Chungpaibulpatana, “Sustainable energy development strategies: implications of energy demand management and renewable energy in Thailand”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 7, no. 5, pp. 367–395, 2003.
- [23] H. C. Liao y T. F. Chang, “Space-heating and water-heating energy demands of the aged in the US”, *Energy Economics*, vol. 24, no. 3, pp. 267–284, 2002.
- [24] T. Ekholm, V. Krey, S. Pachauri, y K. Riahi, “Determinants of household energy consumption in India”, *Energy Policy*, vol. 38, no. 10, pp. 5696–5707, 2010.
- [25] S. Pachauri, B. van Ruijven, Y. Nagai, K. Riahi, D. van Vuuren, A. Brew-Hammond y N. Nakicenovic, “Pathways to achieve universal household access to modern energy by 2030”, *Environmental Research Letters*, vol. 8, no. 2, pp. 1–7, 2013.
- [26] Stockholm Environment Institute. Version web: LEAP Help, Updated for LEAP2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.energycommunity.org/Help/leap.htm#t=Concepts%2FIntroduction.html>
- [27] M. A. McNeil, V. E. Letschert, S. de la Rue du Can y J. Ke, “Bottom-Up Energy Analysis System (BUENAS) - an international appliance efficiency policy tool”, *Energy Efficiency*, vol. 6, pp. 191–217, 2013.

- [28] V. E. Letschert, N. Bojda, J. Ke y M. A. McNeil, "Estimate of Cost-Effective Potential for Minimum Efficiency Performance Standards in 13 Major World Economies Energy Savings, Environmental and Financial Impacts", Reporte técnico LBNL-5723E, United States, Jul 2012.
- [29] V. E. Letschert, M. A. McNeil y W. F. Luts, "Design of Standards and Labeling programs in Chile: Techno-Economic Analysis for Refrigerators ", Reporte técnico LBNL-6295E, United States, May 2013
- [30] Fundación Bariloche, "Modelo de Sustituciones entre Fuentes Energéticas", Technical Report, San Carlos de Bariloche, Argentina, Jun 2014.
- [31] D. Rios, *Sensitivity Analysis in Multiobjective Decision Making*. Heidelberg, Berlin, Germany: Springer, 1990.
- [32] Z. Xu, *Uncertain Multi-Attribute Decision Making: Methods and Application*. Heidelberg, Berlin, Germany: Springer, 2015.
- [33] Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático, 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, IGES, Japón, 2019.
- [34] J. A. Nieves, A. J. Aristizabal, I. Dyner, O. Baez y D. H. Ospina, "Energy demand and greenhouse gas emissions analysis in Colombia: A LEAP model application", *Energy*, vol. 169, pp. 380–397, 2019.
- [35] Gerencia de Regulación Tarifaria, Modelo PERSEO 2.0, Perú, 2018 [En línea]. Disponible en: <https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/institucional/regulacion-tarifaria/informacion-tecnica/modelo-perseo2>
- [36] Instituto Nacional de Estadística e Informática, "Estimaciones y Proyecciones de Población Total, por Años Calendario y Edades Simples 1950-2050", Lima, Perú, Boletín Especial N°17, 2009. [En línea]. Disponible e: <https://n9.cl/iqxs>
- [37] Instituto Nacional de Estadística e Informática, "Perú: Estimaciones y Proyecciones de Población, 1950-2050, Urbana – Rural 1970-2025", Lima, Perú, Boletín de Análisis Demográfico N°35, 2001. . [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/33jAQEb>
- [38] Instituto Nacional de Estadística e Informática, "Perú: Perfil Sociodemográfico Informe Nacional, Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas", Lima, Perú, Lib1539, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/37cHdKI>
- [39] Instituto Nacional de Estadística e Informática, Series Nacionales [En línea]. Disponible en: <http://webapp.inei.gob.pe:8080/sirtod-series/>
- [40] Banco Mundial BIRF-AIF, Datos [En línea]. Disponible en: <https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.PCAP.PP.KD?locations=PE>
- [41] Ministerio de Economía y Finanzas, "Marco Macroeconómico Multianual 2020", Lima, Perú, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/2JasUhq>
- [42] Banco Central de Reserva del Perú, "Reporte de Inflación diciembre 2019: Panorama actual y proyecciones macroeconómicas 2019 – 2021", Lima, Perú, ISSN 1816-4412, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3q484kC>
- [43] Ministerio de Energía y Minas, "Plan Nacional de Electrificación Rural (PNER) Periodo 2016 – 2025", Lima, Perú, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/36ahGIN>
- [44] Instituto Nacional de Estadística e Informática, "Perú: Encuesta Demográfica y de Salud Familiar – ENDES 2019", Lima, Perú, ENDES2019, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Endes2019/
- [45] Ministerio de Energía y Minas, "Balance Nacional de Energía Útil 2013", Lima, Perú, 2016. [En línea]. Disponible en: http://www.minem.gob.pe/_publicacion.php?idSector=12&idPublicacion=540

- [46] Ministerio de Energía y Minas, “Etiquetado de Eficiencia Energética: Parque y Tenencia de Equipos”, Lima, Perú, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://etiquetaenergetica.minem.gob.pe/>
- [47] Ministerio de Energía y Minas, “Estudio de Mercado de Iluminación en el Perú”, Lima, Perú, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/2Jiggww>
- [48] Ministerio de Energía y Minas, “Balance Nacional de Energía 2018”, Lima, Perú, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://sinia.minam.gob.pe/download/file/fid/66509>
- [49] Comité de Operación Económica del Sistema, “Anuario Estadístico de Operación 2019”, Lima, Perú, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.coes.org.pe/Portal/publicaciones/estadisticas/estadistica2019#>
- [50] Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería, “Reporte de Información comercial año 2019”, Lima, Perú, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://www2.osinerg.gob.pe/Publicaciones/pdf/InfoComercial/IC2019T4.pdf>
- [51] Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería, “Reporte Semestral de Monitoreo del Mercado de Gas Natural”, Lima, Perú, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/366CtXw>
- [52] Ministerio de Energía y Minas, “Programa para la gestión eficiente y sostenible de recursos energéticos del Perú, Presentación Sistema de Planificación Energética”, Lima, Perú, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/2KB3l42>

APENDICE A: TABLA DE ACRONIMOS

TABLA A1. Acrónimos

Acrónimo	Descripción
BAU	Business as Usual
BCRP	Banco Central de Reserva del Perú
BY	Basta y Yareta
CFL	Compact Fluorescent Light
COES	Comité de Operación Económica del Sistema
CO ₂	Dióxido de carbono
CV	Carbón Vegetal
DGEE	Dirección General de Eficiencia Energética
EE	Energía Eléctrica
GAMS	General Algebraic Modeling System
GD	Gas Distribuido
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GLP	Gas Licuado de Petróleo
H	Energía Hidráulica
IEA	International Energy Agency

INEI	Instituto Nacional de Estadística e Informática
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LEAP	Long-range Energy Alternatives Planning
LED	Light emitting diode
LNA	Leña
MEF	Ministerio de Economía y Finanzas
MINAM	Ministerio del Ambiente
MINEM	Ministerio de Energía y Minas
OSINERGMIN	Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería
OLADE	Organización Latinoamericana de Energía
PBI	Producto Bruto Interno
PERSEO 2.0	Modelo para la optimización del despacho hidrotérmico en los procesos regulatorios
SEIN	Sistema Eléctrico Interconectado Nacional
SO	Energía Solar
TJ	Tera joule

Nota: acrónimos empleados a lo largo del documento

APENDICE B: INFORMACIÓN RECOLECTADA

TABLA B1. Información recolectada

Información	Fuente
Cantidad de población urbana y rural y proyección al 2050	[36], [37]
Cantidad de hogares zona urbana y rural	[38]
PBI nacional valores constantes	[39]
PIB per cápita, PPA (\$ a precios internacionales constantes de 2011)	[40]
Proyecciones de crecimiento de PBI	[41], [42]

Coeficiente de electrificación urbana y rural	[43], [44]
Parque de equipos de consumo de energía	[44] - [47]
Distribución de antigüedad del parque de consumo	[46], [47]
Consumo energético por sector	[48]
Consumo de electricidad	[48] - [50]
Consumo de gas distribuido	[50], [51]
Plan de expansión de suministros con gas natural	[51], [52]

Nota: ver documentos en la referencia

TABLA B2. Datos Macroeconómicos empleados

Variable	2017	2030	2050
Miembros x hogar	3.86	3.46	2.97
PBI x10 ⁹ S/. de 2007	514	824	1574
Electrificación urbana (%)	95.2	99.9	99.9
Electrificación rural (%)	83.5	99.8	99.8

Nota: Valores año 2017 [39] - [44]

TABLA B3. Consumo de Energía Neta por Fuentes y Usos Año 2013 – Sector Residencial Urbano (TJ)

Usos / Fuente	EE	GD	GLP	LNA	CV	SO	BY	H	Total
Iluminación	4 464	-	-	-	-	-	-	-	4 464
Cocción	1 106	1 046	28 038	17 946	3 314	-	-	-	51 451
Calentamiento de Agua	0	28	546	2 659	138	613	-	-	3 983
Calefacción	7	14	20	15	-	-	-	-	56
Ventilación y refrigeración ambiental	93	-	-	-	-	-	-	-	93
Refrigeración de Alimentos	7 184	-	-	-	-	-	-	-	7 184
Artefactos Diversos	16 578	-	-	-	-	-	-	-	16 578
Bombeo de Agua	70	-	-	-	-	-	-	0.7	71

Otros Usos	-	-	-	-	-	-	369	-	369
Total	29	1 089	28	20	3 452	613	369	0.7	84
	503		604	619					249

Nota: ver apéndice A: tabla de acrónimos. [46].

TABLA B4. Consumo de Energía Neta por Fuentes y Usos – Sector Residencial Rural (TJ)

Usos / Fuente	EE	GD	GLP	LNA	CV	SO	BY	H	Total
Iluminación	349	-	-	-	-	-	-	-	349
Cocción	10	0	4 362	57	534	-	-	-	62
				985					893
Calentamiento de Agua	0	0	55	4 151	3	2	-	-	4 210
Calefacción	1	-	-	1 195	-	-	-	-	1 195
Ventilación y refrigeración ambiental	1	-	-	-	-	-	-	-	1
Refrigeración de Alimentos	428	-	-	-	-	-	-	-	428
Artefactos Diversos	1 228	-	-	-	-	-	-	-	1 228
Bombeo de Agua	3	-	-	-	-	-	-	0.3	3
Otros Usos	-	-	-	-	-	-	6	-	6
							406		406
Total	2 020	0	4 417	63	537	2	6	0.3	76
				331			406		713

Nota: ver apéndice A: tabla de acrónimos. [46].

Recibido (Received): 29/02/2020

Aceptado (Accepted): 03/10/2020