

Análisis sistémico y termodinámico del consumo de combustible en sistemas eléctricos aislados amazónicos de Loreto

Systemic and thermodynamic analysis of fuel consumption in isolated Amazonian electrical systems of Loreto

Gustavo Adolfo Malca Salas ^a 

✉ gustavo.malca@unapikitos.edu.pe

Luis Antonio Flores Flores ^b 

Kosseth Marianella Bardales Grández ^b 

Carlos Enrique Ríos Del Aguila ^b 

^a Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo, Perú

^b Universidad Nacional de la Amazonía Peruana. Iquitos, Perú

Palabras clave:

Biocombustibles; Centrales eléctricas; Eficiencia energética; Generación de energía; Recursos energéticos

Keywords:

Biofuels; Energy efficiency; Energy resources; Power generation; Power plants

Cómo citar:

Malca Salas GA, Flores Flores LA, Bardales Grández KM, Ríos Del Aguila CE. Análisis sistémico y termodinámico del consumo de combustible en sistemas eléctricos aislados amazónicos de Loreto. ALFA Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinarias. 2026; 10 (30). <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v10i30.500>



Resumen

Contexto: La Amazonía peruana, especialmente el departamento de Loreto, presenta una alta dependencia de sistemas eléctricos aislados abastecidos mediante grupos electrógenos diésel. Esta condición genera desafíos operativos, económicos y ambientales debido al aislamiento geográfico, la logística energética limitada y la necesidad de optimizar el rendimiento térmico de las centrales. **Objetivo:** Determinar y modelar la dinámica del consumo de Biodiesel B5 en las centrales térmicas de Loreto, analizando su relación con la demanda eléctrica e identificando las ineficiencias exergéticas que afectan el rendimiento energético durante el periodo 2015-2017. **Metodología:** Se desarrolló una investigación con diseño no experimental, longitudinal y enfoque analítico-inductivo-deductivo. Se analizaron registros mensuales y anuales de consumo volumétrico de Biodiesel B5 correspondientes a nueve centrales térmicas operadas por Electro Oriente S.A. Los datos fueron procesados mediante estadística descriptiva y análisis correlacional de series temporales para identificar tendencias y patrones estacionales. **Resultados:** El consumo regional aumentó de 1 917 229,78 galones en 2015 a 2 422 689,00 galones en 2017, representando un incremento del 26,36 %. La eficiencia energética promedio alcanzó 13,74 kWh/galón, valor inferior en 6,91 % al estándar regulatorio de 14,76 kWh/galón. Se identificó variabilidad estacional, con menor consumo en febrero y mayor demanda en octubre, además de ineficiencias asociadas a operación parcial, desfases tarifarios y degradación del biocombustible. **Conclusiones:** El consumo de Biodiesel B5 en las centrales térmicas aisladas de Loreto presenta limitaciones estructurales de eficiencia energética. La integración de sistemas híbridos solar-diésel constituye una alternativa potencial para optimizar el rendimiento termodinámico y mejorar la sostenibilidad energética regional.

Abstract

Context: The Peruvian Amazon, particularly the department of Loreto, is highly dependent on isolated power systems supplied by diesel-powered generator sets. This condition poses operational, economic, and environmental challenges due to geographical isolation, limited energy logistics, and the need to optimize the thermal performance of power plants. **Objective:** To determine and model the dynamics of Biodiesel B5 consumption in thermal power plants in Loreto, analyzing its relationship with electricity demand and identifying exergy inefficiencies affecting energy performance during the 2015-2017 period. **Methodology:** A non-experimental, longitudinal study was conducted using an analytical-inductive-deductive approach.

Monthly and annual records of Biodiesel B5 volumetric consumption from nine thermal power plants operated by Electro Oriente S.A. were analyzed. The data were processed using descriptive statistics and correlational time-series analysis to identify trends and seasonal patterns. **Results:** Regional consumption increased from 1,917,229.78 gallons in 2015 to 2,422,689.00 gallons in 2017, representing a 26.36% increase. Average energy efficiency reached 13.74 kWh/gallon, 6.91% below the regulatory standard of 14.76 kWh/gallon. Seasonal variability was identified, with lower consumption in February and higher demand in October, as well as inefficiencies associated with partial-load operation, tariff mismatches, and biofuel degradation. **Conclusions:** Biodiesel B5 consumption in Loreto's isolated thermal power plants is subject to structural energy-efficiency limitations. The integration of solar-diesel hybrid systems represents a potential alternative for optimizing thermodynamic performance and improving regional energy sustainability.

Introducción

La estrecha interdependencia entre el crecimiento socioeconómico, el desarrollo industrial y la demanda intensiva de recursos energéticos de origen fósil ha constituido un rasgo estructural definitorio de la modernidad ⁽¹⁾. A lo largo de la centuria pasada, la matriz global de generación y consumo energético se consolidó bajo una profunda dependencia del petróleo crudo y sus fracciones refinadas, asumiendo escenarios de disponibilidad física prácticamente ilimitada y bajos costos marginales de extracción ⁽²⁾. Esta configuración estructural condicionó las trayectorias tecnológicas de los sistemas eléctricos descentralizados, especialmente en regiones aisladas donde los grupos electrógenos diésel continúan siendo la única opción técnicamente viable para garantizar el suministro continuo de electricidad ^(3,4).

Por consiguiente, el paradigma de seguridad de suministro experimentó una disrupción histórica irreversible a raíz de la crisis del petróleo de 1973, desencadenada por el embargo comercial decretado por la Organización de Países Exportadores de Petróleo en el contexto del conflicto árabe-israelí ⁽⁵⁾. Dicho acontecimiento expuso la extrema vulnerabilidad macroeconómica de los países importadores frente a la volatilidad geopolítica del mercado de hidrocarburos y desató un ciclo inflacionario prolongado que obligó a replantear el diseño tecnológico de los sistemas de generación eléctrica ^(1,5). A partir de este hito, el esfuerzo científico internacional se orientó hacia tecnologías de conversión con mayor flexibilidad termodinámica, tales como turbinas de ciclo combinado y plantas de cogeneración ⁽⁶⁾.

En efecto, a pesar de la progresiva maduración de estas alternativas de alta eficiencia y menor consumo específico, el parque térmico convencional basado en motores diésel de encendido por compresión continuó siendo la única opción técnicamente viable y económicamente factible para garantizar el suministro continuo de electricidad en áreas geográficamente aisladas ^(3,7). Estos escenarios descentralizados se caracterizan por una baja densidad de carga y la ausencia de redes de transmisión eléctrica de alta tensión, lo que mantiene el costo de producción íntimamente ligado a la cotización internacional de los destilados medios y perpetúa asimetrías tarifarias considerables frente a los sistemas interconectados ^(8,9). La dependencia estructural de los combustibles fósiles en zonas remotas constituye, así, una limitación sistémica difícil de superar sin intervenciones tecnológicas integradas.

Adicionalmente, en el Perú la configuración física e institucional del sector eléctrico reproduce esta dualidad de manera pronunciada ⁽¹⁰⁾. El Sistema Interconectado Nacional abastece a los principales centros urbanos e industriales de la costa y la sierra mediante un portafolio integrado, sustentado predominantemente en recursos hídricos convencionales y plantas de ciclo combinado alimentadas por gas natural proveniente del yacimiento de Camisea, considerado el vector clave de la transición energética nacional ^(10,11). Por otro lado, la vasta región amazónica, y específicamente el departamento de Loreto, subsiste en una condición de aislamiento eléctrico

casi absoluto respecto a la red de transmisión nacional, dado que su llanura aluvial fragmentada por el sistema hidrográfico torna prohibitiva la construcción de líneas interconectadas ⁽¹²⁾.

No obstante, esta insalvable restricción física determina que el suministro eléctrico regional se estructure a través de los denominados Sistemas Eléctricos Aislados ⁽⁸⁾. A excepción del sistema mayor de Iquitos, la provisión del servicio público en las capitales de provincia y comunidades fronterizas de Loreto recae sobre sistemas aislados menores operados por la empresa estatal Electro Oriente S.A., donde la generación se produce exclusivamente mediante centrales térmicas convencionales equipadas con grupos electrógenos diésel de pequeña y mediana escala ⁽¹²⁾. Para atenuar la dependencia de combustibles fósiles puros en ecosistemas de alta biodiversidad, el Estado peruano estableció la sustitución obligatoria del Diésel 2 por Biodiesel B5, imponiendo desafíos termodinámicos derivados de las diferencias en el poder calorífico neto del biocombustible ^(13,14).

En este sentido, el modelamiento de la eficiencia de conversión y la optimización de los consumos de combustible en un grupo electrógeno que opera en un sistema aislado está gobernado por el análisis de pérdidas térmicas, mecánicas y por fricción, así como por las leyes de la termodinámica del ciclo real de combustión interna ⁽¹⁵⁾. El rendimiento térmico de un motor diésel alcanza su punto óptimo únicamente cuando opera en régimen estacionario cercano a su capacidad nominal, situado típicamente entre el 85 % y el 100 % de su potencia efectiva de placa ^(16,17). Bajo estas condiciones, los procesos de inyección, atomización y turbulencia se sincronizan de forma óptima, permitiendo una combustión prácticamente completa que minimiza las pérdidas por incombustión química o calor sensible en los gases de escape ^(15,18).

Por otra parte, en el contexto real de los Sistemas Eléctricos Aislados de Loreto, el perfil de demanda eléctrica es eminentemente residencial, sin un componente industrial que estabilice la carga ⁽¹⁰⁾. Esta curva se caracteriza por un factor de carga sumamente bajo y un pico extraordinariamente pronunciado durante las horas punta nocturnas, impulsado por el encendido simultáneo de iluminación domiciliaria, alumbrado público y acondicionamiento ambiental ⁽⁸⁾. Fuera de este breve intervalo, la demanda colapsa hacia niveles mínimos diurnos, lo que obliga al concesionario a sobredimensionar la capacidad instalada en función de la máxima demanda de hora punta ^(8,16). Este sobredimensionamiento condena a los grupos electrógenos a operar gran parte del día en regímenes de carga parcial inferiores al 40 % de su potencia nominal, degradando severamente la eficiencia de conversión ^(16,19).

Cabe destacar que la operación prolongada a carga parcial degrada la eficiencia mecánica del ciclo real diésel al disminuir la masa de combustible inyectado manteniendo constante el volumen de aire aspirado ^(15,18). La relación aire-combustible se desvía hacia valores excesivamente pobres, reduciendo la temperatura media de combustión, disminuyendo el trabajo indicado por ciclo y aumentando relativamente las pérdidas por fricción, bombeo e inercia, que permanecen constantes respecto a la velocidad de rotación ^(17,19). En consecuencia, el consumo específico de combustible se incrementa de forma no lineal según la relación recíproca entre la eficiencia térmica efectiva y el poder calorífico inferior del combustible ⁽¹⁵⁾. A este factor micro-operativo se suma el desclasamiento térmico ambiental provocado por las temperaturas superiores a 35 °C y humedades relativas cercanas al 95 % características de la llanura amazónica, que reducen la densidad del aire comburente ^(16,20).

En particular, el marco regulatorio peruano establece que el suministro eléctrico en sistemas no interconectados debe remunerarse según criterios de eficiencia económica, materializados en el concepto de Empresa Modelo Eficiente ^(10,21). Bajo este esquema abstracto, el organismo regulador fija estándares de rendimiento térmico expresados en kilovatios-hora generados por galón consumido, asumiendo condiciones ideales de operación ^(21,22). Sin embargo, las condiciones de aislamiento geográfico imponen asimetrías severas en el acceso a recursos logísticos, limitando la aplicación práctica de los supuestos del modelo económico y generando distorsiones financieras para el operador público ^(12,22). La Ley de Promoción de la Eficiencia Energética complementa este marco, otorgando a la eficiencia en sistemas aislados un rol de supervivencia económica y operativa, dado que cada galón ahorrado disminuye la presión sobre la costosa cadena de transporte fluvial ^(8,23).

En este marco, la Refinería Iquitos operada por Petroperú S.A., con una capacidad teórica de 12 000 barriles diarios, constituye la única fuente de procesamiento y despacho del Biodiesel B5 empleado por las centrales de Loreto ⁽¹²⁾. El traslado hasta los tanques de almacenamiento se realiza mediante barcazas fluviales a lo largo de miles de millas náuticas por los ríos Ucayali, Amazonas, Putumayo y afluentes secundarios, vía altamente sensible a los ciclos de estiaje o vaciante entre julio y octubre ^(12,22). Durante la temporada extrema, el caudal desciende drásticamente, exponiendo bancos de arena y reduciendo el calado navegable, lo que bloquea el tránsito de barcazas cisterna y obliga a compras anticipadas masivas con un periodo de almacenamiento preventivo obligatorio de 25 días reconocido por la regulación ^(21,22).

Consecuentemente, el almacenamiento prolongado del Biodiesel B5 bajo temperaturas y humedades extremas impone severas penalidades sobre la eficiencia de combustión ^(15,24). El biocombustible, altamente higroscópico, absorbe humedad por condensación cíclica en los tanques, desatando reacciones hidrolíticas de degradación ácida de los ésteres metílicos que producen ácidos grasos libres e incrementan la viscosidad cinemática ^(14,24). Esta degradación fisicoquímica propicia el desarrollo de microorganismos anaerobios y lodos biológicos, provoca la colmatación de filtros y la corrosión de bombas de alta presión, y reduce el poder calorífico inferior del combustible ^(14,18). Los grupos generadores deben entonces consumir un volumen físicamente mayor de galones para mantener el torque síncrono del alternador, elevando artificialmente el consumo neto anual y deprimiendo el factor de eficiencia regulatorio ^(16,19).

A partir de lo anterior, el Mecanismo de Compensación para Sistemas Aislados, establecido por el artículo 30 de la Ley N° 28832, constituye el instrumento financiero que soporta la sostenibilidad de la matriz térmica regional mediante un esquema de subsidio cruzado nacional. Todos los usuarios del sistema interconectado pagan mensualmente un recargo que permite compensar hasta el 50 % del costo de generación exergética, nivelando las tarifas rurales con las del resto del país ^(10,25). No obstante, desde la economía de la regulación, este mecanismo opera como un desincentivo estructural para la transición energética, al garantizar el reembolso sistemático de los costos reales de combustible diésel y devaluar artificialmente la competitividad de alternativas como la solar fotovoltaica distribuida ^(10,26,27).

En consecuencia, el objetivo del presente estudio consistió en determinar y modelar la dinámica sistémica del consumo de combustible Biodiesel B5 en las nueve centrales térmicas que abastecen a los Sistemas Eléctricos Aislados menores del departamento de Loreto durante el trienio 2015-2017, caracterizando las ineficiencias exergéticas, micro-operativas y logísticas que condicionan el rendimiento térmico global, contrastando los resultados con el estándar de la Empresa Modelo Eficiente del organismo regulador y proponiendo lineamientos de hibridación solar-diésel como vector de optimización termodinámica para la región amazónica peruana.

Materiales y métodos

Se desarrolló una investigación científica aplicada de enfoque cuantitativo, sustentada en la observación sistemática, el análisis longitudinal y la modelación termodinámica de series operativas reales ^(10,12). El estudio se enmarcó en la modalidad de investigación tecnológica explicativa, en tanto buscó establecer las relaciones causales entre el perfil de carga eléctrica, las condiciones ambientales amazónicas y la dinámica del consumo volumétrico de Biodiesel B5 en las centrales térmicas evaluadas, sin introducir manipulaciones artificiales sobre las variables. El alcance explicativo permitió derivar inferencias generalizables sobre el comportamiento exergético de los grupos electrógenos diésel que operan bajo condiciones extremas de aislamiento geográfico y estrés térmico ambiental en la llanura amazónica peruana.

Consecuentemente, se adoptó un diseño no experimental de tipo longitudinal con horizonte temporal de tres años (2015-2017), caracterizado por el seguimiento continuo de las series temporales de consumo de combustible y generación eléctrica en las nueve centrales bajo estudio. El diseño longitudinal facilitó la

identificación de tendencias interanuales, patrones de estacionalidad mensual y dinámicas micro-operativas sin alterar las condiciones reales de operación¹⁰¹⁶. La estructura analítica combinó procedimientos inductivos, para derivar regularidades empíricas a partir de los registros de campo, y deductivos, para contrastar los hallazgos con los fundamentos teóricos del ciclo diésel real y los estándares regulatorios de la Empresa Modelo Eficiente¹⁵²¹.

En este orden de ideas, la población de estudio estuvo integrada por la totalidad de las centrales térmicas convencionales basadas en motores diésel de combustión interna encargadas del suministro público de electricidad en los Sistemas Eléctricos Aislados del departamento de Loreto. Para garantizar exhaustividad técnica y consistencia metodológica, se aplicó un muestreo de tipo censal, evaluando a la población en su totalidad. La muestra quedó constituida por las nueve centrales menores operadas por Electro Oriente S.A.: Caballococha, El Estrecho, Contamana, Orellana, Indiana, Nauta, Requena, Tamshiyacu y Gran Perú, distribuidas en las provincias de Mariscal Ramón Castilla, Putumayo, Ucayali, Loreto, Requena y Maynas, respectivamente.

Criterios de inclusión y exclusión

Adicionalmente, se establecieron criterios de inclusión que consideraron centrales térmicas operadas por Electro Oriente S.A. con registro continuo de consumo y generación durante el trienio completo, ubicadas en sistemas aislados menores del departamento de Loreto y abastecidas exclusivamente con Biodiesel B5 conforme a la regulación nacional. Los criterios de exclusión descartaron el sistema aislado mayor de Iquitos, dada su escala y configuración técnica heterogénea, así como las microcentrales comunales operadas por entidades distintas al concesionario público y aquellas con registros incompletos o interrumpidos durante el periodo de estudio. La aplicación rigurosa de estos criterios aseguró la comparabilidad técnica entre las unidades de análisis y la consistencia estadística de los resultados longitudinales obtenidos.

Instrumentos y técnicas de recolección

Por consiguiente, los datos de consumo mensual y anual de combustible correspondientes al trienio 2015-2017 se obtuvieron directamente de las fichas de registro técnico diario y bitácoras operativas consolidadas por el área de generación de Electro Oriente S.A. en Iquitos. La consistencia física de la información se verificó mediante el análisis del factor de eficiencia volumétrica de cada central, contrastando el consumo volumétrico de los tanques diarios frente a la generación bruta medida en bornes de generador. Se utilizó una matriz de validación cruzada que integró los reportes de despacho económico, los partes de operación y los informes mensuales consolidados, garantizando trazabilidad documental y reproducibilidad metodológica del proceso de compilación de datos operativos secundarios.

Análisis estadístico

En este sentido, el procesamiento estadístico se desarrolló mediante análisis descriptivo de tendencias central y dispersión, complementado con análisis longitudinal de series temporales para evaluar la estacionalidad mensual y la trayectoria interanual del consumo. Se calcularon indicadores derivados: consumo volumétrico mensual (V_m , en galones), consumo volumétrico anual (V_a), consumo específico de combustible (SFC, en L/kWh) y factor de eficiencia (FE, en kWh/gal), este último definido como el cociente entre la energía eléctrica bruta mensual generada (E_g) y el volumen de combustible consumido (V_c). Adicionalmente, se realizó un análisis comparativo entre la eficiencia real obtenida en campo y el estándar regulatorio de la Empresa Modelo Eficiente (14,76 kWh/gal), cuantificando el desfase exergético porcentual para cada central evaluada.

Modelo termodinámico de referencia

Las ecuaciones fundamentales que gobiernan el rendimiento térmico y el consumo específico de combustible en los grupos electrógenos diésel analizados se presentan a continuación como marco analítico de referencia.

$$\eta_{th} = 1 - (1 / r^{\gamma} - 1) \cdot [(p^{\gamma} - 1) / (\gamma \cdot (p - 1))] \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} - \dot{W}_{net} - \dot{Q}_{loss} = 0 \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{in} = \dot{m}_f \cdot LHV_f \quad (3)$$

$$\eta_e = \dot{W}_{net} / (\dot{m}_f \cdot LHV_f) \quad (4)$$

$$SFC = \dot{m}_f / P_e \quad (5)$$

$$FE = E_g / V_c \quad (6)$$

$$P_i = P_e + P_f \quad (7)$$

$$\eta_m = P_e / P_i = P_e / (P_e + P_f) \quad (8)$$

$$SFC = 1 / (\eta_e \cdot LHV_f) \quad (9)$$



Donde η_{th} es la eficiencia termodinámica ideal del ciclo Diésel; r , la relación de compresión volumétrica; p , la relación de corte; γ , el coeficiente de expansión adiabática; $\dot{Q}_{in}$ y $\dot{Q}_{out}$, las tasas de calor added y rechazado; $\dot{W}_{net}$, la potencia neta indicada; $\dot{m}_f$, el flujo másico de combustible; LHV_f , el poder calorífico inferior; η_e , la eficiencia térmica efectiva; SFC , el consumo específico de combustible; P_e , la potencia eléctrica en bornes; FE , el factor de eficiencia volumétrica regulatorio; E_g , la energía eléctrica bruta generada; V_c , el volumen de combustible consumido; P_i , la potencia indicada; P_f , la potencia de fricción; y η_m , la eficiencia mecánica del motor.

Consideraciones éticas

Finalmente, la naturaleza del estudio, basado en el análisis documental de datos operativos secundarios anonimizados provistos por la empresa concesionaria, no requirió certificación ética específica ni consentimiento informado de individuos, conforme a los principios de la Declaración de Singapur sobre integridad de la investigación científica ⁽²⁸⁾. Los datos compilados corresponden exclusivamente a variables técnicas operativas de generación y consumo de combustible, sin involucrar información personal de usuarios finales ni datos sensibles de la población. La investigación se desarrolló siguiendo los principios de transparencia metodológica, reproducibilidad analítica y trazabilidad documental, garantizando la confidencialidad de la información comercial de la empresa operadora y el cumplimiento de los lineamientos institucionales de las universidades participantes.

Resultados

El procesamiento mensual de los datos operativos de consumo de combustible suministrados por Electro Oriente S.A. para el año base 2017 permitió estructurar la distribución mensualizada que se presenta en la Tabla 1. Los registros evidencian una concentración del consumo en las centrales de mayor demanda, con Requena, Nauta y Caballococha aportando conjuntamente el 62,13 % del volumen departamental, mientras que Gran Perú, El Estrecho y Orellana operaron como micro-centrales de baja escala con consumos marginales. La distribución mensual revela además un patrón estacional marcadamente simétrico en todas las centrales, sugiriendo la influencia de factores climáticos comunes sobre la demanda y el rendimiento de los grupos generadores.

Tabla 1. Consumo mensual de Biodiesel B5 en las centrales térmicas de Loreto durante 2017 (galones).

Central térmica	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total anual
Caballococha	33 124	31 250	38 920	39 601	42 045	40 431	43 124	42 229	43 621	46 011	45 392	41 185	486 933
El Estrecho	4 690	4 320	4 792	4 815	4 970	5 451	5 312	5 354	5 182	5 671	5 320	5 751	61 628
Contamana	37 791	34 260	38 620	38 442	40 792	39 991	39 481	41 041	42 120	43 261	39 431	41 244	476 473
Orellana	4 322	4 054	4 924	4 982	5 821	5 712	6 242	6 254	6 645	6 781	6 321	6 576	68 634
Indiana	16 071	15 020	16 720	16 271	16 971	16 420	16 931	15 932	15 821	17 611	16 411	16 711	196 872
Nauta	43 921	37 821	40 841	41 512	42 941	38 981	41 291	40 412	40 681	43 912	41 721	41 855	495 890
Requena	41 341	38 421	43 812	42 351	44 651	41 881	43 791	44 642	44 451	47 402	44 651	45 106	522 506
Tamshiyacu	8 351	7 603	9 198	9 077	9 680	9 440	9 284	9 637	10 033	10 018	0	0	92 321
Gran Perú	120	102	126	115	121	112	115	126	120	129	129	152	1 467
TOTAL LORETO	189 731	172 851	198 154	197 212	208 033	198 031	205 391	204 606	208 674	220 827	199 398	198 781	2 422 689

Nota: Elaboración propia a partir de datos históricos de Electro Oriente S.A.

Por su parte, la compilación longitudinal del trienio 2015-2017, resumida en la Tabla 2, confirma una tendencia incremental sostenida en el consumo regional de Biodiesel B5. El volumen total escaló de 1 917 229,78 galones en 2015 a 2 422 689,00 galones en 2017, consolidando un incremento neto acumulado del 26,36 % en apenas tres años de operación continua. La central Indiana exhibió el crecimiento porcentual más acelerado (182,92 %), asociado a la ampliación de redes secundarias de electrificación rural, mientras que Tamshiyacu registró una contracción del -5,74 % por reducción técnica de horas de operación para priorizar mantenimientos correctivos. Esta heterogeneidad refleja dinámicas territoriales diferenciadas en la expansión del servicio eléctrico amazónico.

Tabla 2. Consumo anual de Biodiesel B5 en las centrales térmicas de Loreto (2015-2017) y variación interanual.

Central térmica	Consumo 2015	Consumo 2016	Consumo 2017	Variación neta (gal)	Crecimiento %
Caballococha	400 896,00	425 428,00	486 933,00	86 037,00	21,46
El Estrecho	53 684,00	58 911,50	61 628,00	7 944,00	14,80
Contamana	395 477,00	451 861,00	476 473,00	80 996,00	20,48
Orellana	39 106,00	56 416,50	68 634,00	29 528,00	75,51
Indiana	69 585,78	174 742,86	196 872,00	127 286,22	182,92
Nauta	393 957,00	456 760,00	495 890,00	101 933,00	25,87
Requena	465 480,00	513 040,00	522 506,00	57 026,00	12,25
Tamshiyacu	97 946,00	108 539,00	92 321,00	-5 625,00	-5,74
Gran Perú	1 098,00	1 163,00	1 467,00	369,00	33,61
TOTAL LORETO	1 917 229,78	2 246 861,86	2 422 689,00	505 459,22	26,36

Nota: Elaboración propia a partir de registros consolidados de Electro Oriente S.A.

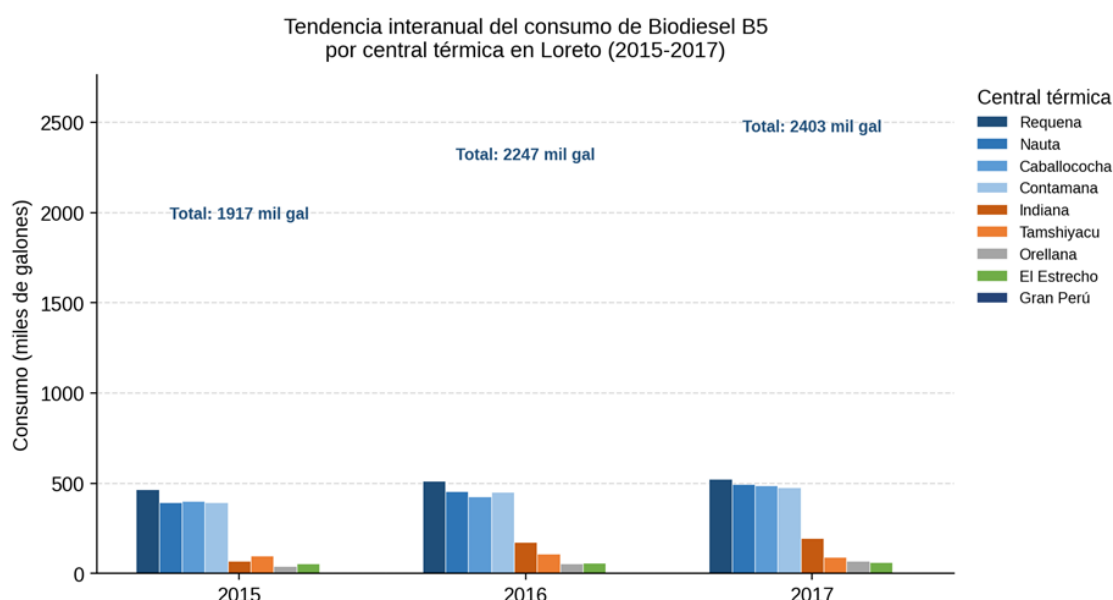
Adicionalmente, la caracterización operativa y termodinámica del parque térmico censado, sintetizada en la Tabla 3, evidencia restricciones físicas severas que condicionan el rendimiento exergético regional. Requena y Caballococha operaron con margen de reserva nulo del 0 %, forzando un funcionamiento ininterrumpido bajo estrés térmico que devaluó la eficiencia volumétrica y limitó las paradas para mantenimiento preventivo recomendadas por el fabricante. Contamana reportó la mayor tasa de fallas mecánicas del departamento, con 83,13 horas anuales de interrupciones atribuibles al parque generador, mientras que El Estrecho experimentó oscilaciones de frecuencia de hasta 2 Hz asociadas a la baja inercia de su micro-red aislada. Estos hallazgos confirman la fragilidad operativa estructural del sistema.

Tabla 3. Caracterización operativa y termodinámica del parque térmico censado en Loreto (2017).

Central térmica	Potencia efectiva (kW)	Demanda máxima (kW)	Margen de reserva (%)	Horas de interrupción (h/año)	Crecimiento 2015-2017 (%)
Requena	1 600	1 679	0	32,40	12,25
Caballococha	870	1 322	0	28,15	21,46
Nauta	1 540	1 285	16,5	21,80	25,87
Contamana	1 320	1 140	13,6	83,13	20,48
Indiana	780	565	27,6	18,72	182,92
Tamshiyacu	520	348	33,1	12,40	-5,74
Orellana	240	172	28,3	9,80	75,51
El Estrecho	180	142	21,1	11,25	14,80
Gran Perú	60	32	46,7	5,40	33,61

Nota: Elaboración propia a partir de reportes operativos de Electro Oriente S.A.

En particular, la Figura 1 ilustra gráficamente la trayectoria interanual del consumo por central térmica durante el trienio. Se observa que las centrales de mayor escala (Requena, Nauta, Caballococha y Contamana) mantienen pendientes ascendentes similares, explicadas por el crecimiento demográfico sostenido y la incorporación progresiva de nuevos abonados en las capitales de provincia. El salto abrupto de Indiana entre 2015 y 2016 corresponde a la entrada en operación de proyectos estatales de ampliación de redes rurales, que conectaron comunidades periféricas con un consumo diurno prácticamente nulo, forzando operación a factor de carga extremadamente bajo. La trayectoria divergente de Gran Perú, con consumos marginales inferiores a 1 500 galones anuales, evidencia la ineficiencia exergética de las micro-centrales fronterizas.


Figura 1. Tendencia interanual del consumo de Biodiesel B5 por central térmica en Loreto (2015-2017).

Por el contrario, la Figura 2 expone la marcada estacionalidad mensual del consumo regional durante 2017. El mes de febrero registró el mínimo histórico con 172 851 galones, explicado por la combinación del menor número de días calendario y la coincidencia estacional con la temporada de precipitaciones y la llegada de masas de aire frío australes conocidas localmente como friajes amazónicos. Estas bajas relativas de temperatura deprimen el uso de ventiladores y sistemas de climatización, reduciendo automáticamente la carga neta solicitada. El

máximo estacional se alcanzó en octubre con 220 827 galones, periodo de mayor radiación solar, sequía y altas temperaturas en el llano amazónico, que dispara exponencialmente el uso de equipos de acondicionamiento ambiental residencial y comercial.

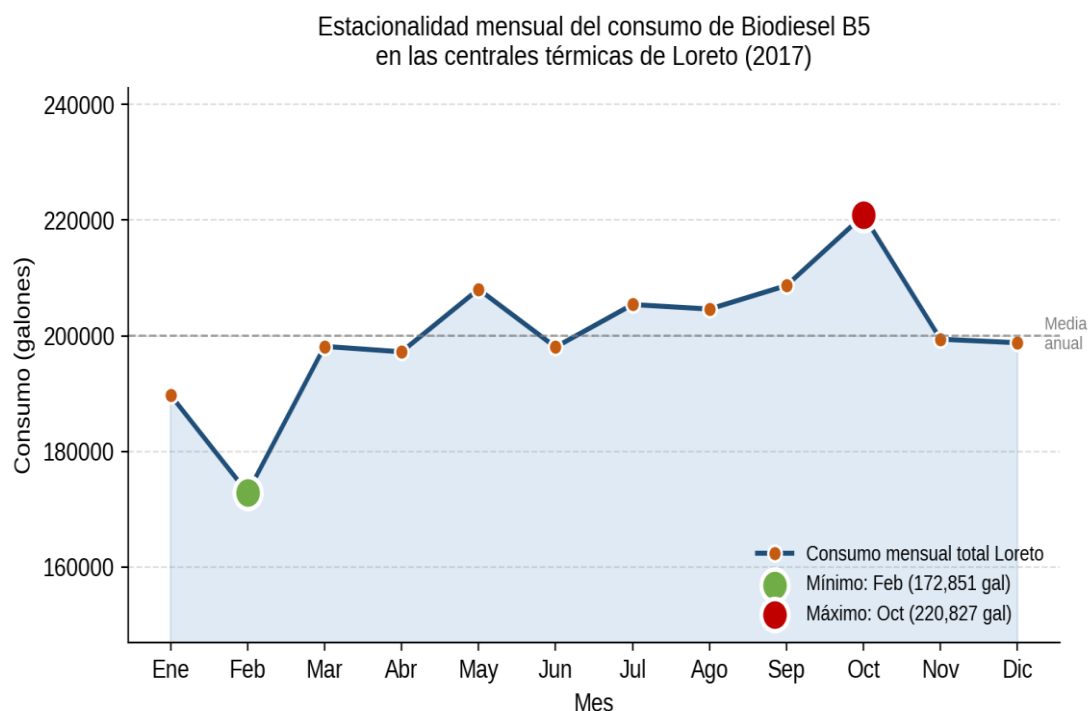


Figura 2. Estacionalidad mensual del consumo de Biodiesel B5 en las centrales térmicas de Loreto (2017).

En términos termodinámicos, el doble impacto adverso del mes de octubre sobre el consumo de combustible operó simultáneamente sobre dos frentes: incrementó la demanda de potencia activa útil en bornes de generador y disminuyó físicamente la densidad del aire comburente aspirado por el turbocargador del motor diésel. De acuerdo con la ley de los gases reales, a mayor temperatura del aire de admisión, menor masa neta de oxígeno disponible en la cámara de combustión por carrera del pistón, lo que altera la relación estequiométrica aire-combustible de diseño y devalúa el rendimiento térmico volumétrico. Para contrarrestar la caída del torque e impedir variaciones de voltaje en la micro-red, los generadores operaron bajo mezclas más ricas, inyectando mayor volumen de Biodiesel B5 por kilovatio-hora útil generado. Este mecanismo exergético explica el marcado pico mensual registrado en octubre.

Discusión

El análisis crítico de los resultados de consumo de combustible en las centrales térmicas de Loreto devela una profunda desconexión estructural entre el modelo tarifario económico diseñado por el organismo regulador y las leyes inalterables de la termodinámica aplicada que rigen los procesos reales de generación eléctrica diésel en la Amazonía ^(21,22). El concepto regulatorio de Empresa Modelo Eficiente asume condiciones ideales de operación con curvas de carga optimizadas, Contrastando con la realidad operativa regional donde la eficiencia real promedio alcanzó apenas 13,74 kWh/galón, 6,91 % por debajo del estándar tarifario de 14,76 kWh/galón ⁽²¹⁾. Esta brecha exergética coincide con hallazgos reportados para sistemas aislados africanos por Barros y Wanke ⁽¹⁶⁾, evidenciando la universalidad del fenómeno.

En efecto, la desviación del rendimiento no deviene de ineficiencias administrativas, sino que responde a tres factores físicos insalvables descritos en este estudio: la penalidad termodinámica de la operación a carga parcial, el desclasamiento climático por humedad y alta temperatura, y la degradación por desgaste físico asociada al

aislamiento geográfico ^(15,16,19). Estos hallazgos convergen con lo reportado por Sarkar ⁽¹⁵⁾, para centrales térmicas tropicales y con las observaciones de Forero-Núñez et al. ⁽⁶⁾, sobre sistemas diésel operando fuera de condiciones nominales. La penalización por carga parcial se manifiesta de manera consistente en la literatura técnica ^(16,18), confirmando que los perfiles de demanda residencial con bajos factores de carga constituyen un determinante crítico del rendimiento exergetico en microrredes aisladas amazónicas.

Adicionalmente, la comprensión de la dinámica del consumo exige considerar la compleja cadena logística fluvial que opera en la llanura amazónica ⁽¹²⁾. Loreto carece por completo de conectividad vial terrestre, lo que convierte a la red de hidro vías en la única autopista logística para el transporte de combustible ^(12,22). La extrema sensibilidad de esta vía a los ciclos de vaciante obliga a compras anticipadas masivas y a un almacenamiento preventivo de 25 días reconocido por la regulación ^(21,22). Estas restricciones logísticas se alinean con las documentadas por OLADE ⁽⁸⁾ para sistemas aislados latinoamericanos, aunque en Loreto alcanzan una severidad inédita por la conjunción de aislamiento geográfico, extremos climáticos y dependencia monopuertaria de la Refinería Iquitos.

No obstante, el almacenamiento prolongado del Biodiesel B5 bajo temperaturas y humedades extremas impone penalidades adicionales sobre la eficiencia de combustión ^(15,24). El carácter higroscópico del biocombustible cataliza reacciones hidrolíticas que producen ácidos grasos libres, incrementan la viscosidad y reducen el poder calorífico inferior ^(14,24). Esta degradación fisicoquímica, documentada por Mittelbach y Remschmidt ⁽¹⁴⁾ y por Hoekman et al. ⁽²⁹⁾, para biocombustibles almacenados en climas tropicales, obliga a inyectar mayor volumen de combustible para mantener el torque síncrono del alternador. Los resultados obtenidos en las centrales de Loreto son consistentes con los reportes de Atabani et al. ⁽³⁰⁾, sobre la degradación acelerada del biodiesel en condiciones de alta humedad ambiental, evidenciando una vulnerabilidad estructural del combustible.

Por otra parte, el Mecanismo de Compensación para Sistemas Aislados constituye una herramienta con profundo carácter contradictorio, actuando como barrera invisible y desincentivo estructural para la transición energética ^(10,25). Al garantizar el Estado el reembolso casi automático de los costos reales de adquisición de combustible, la empresa distribuidora carece de incentivos financieros para arriesgar capital propio en la sustitución de la generación térmica por tecnologías renovables ^(10,26). Esta dinámica coincide con las observaciones de IRENA ⁽²⁷⁾, sobre los subsidios perversos al diésel en sistemas aislados latinoamericanos, que perpetúan la quema ineficiente de hidrocarburos. El subsidio al consumo fósil devalúa artificialmente la competitividad exergetica de proyectos alternativos como la solar fotovoltaica distribuida, postergando indefinidamente la transición energética regional.

En este sentido, los resultados cuantitativos expuestos demuestran la insostenibilidad física de mantener la generación eléctrica aislada de Loreto sustentada exclusivamente en centrales termoeléctricas convencionales ^(12,16). La reconversión hacia Sistemas Híbridos de Generación de Energía basados en microrredes inteligentes se perfila como alternativa técnica ineludible ^(26,27). Un diseño óptimo contempla integración de campos solares fotovoltaicos, bancos de baterías de ion-litio y retención estratégica de los grupos diésel como reserva dinámica. Esta arquitectura, validada por Wang et al. ⁽²⁶⁾ y por IRENA ⁽²⁷⁾, para comunidades aisladas, permite desplazar la carga parcial diurna ineficiente, mitigar pérdidas transitorias y operar los motores únicamente en su régimen nominal óptimo de máxima eficiencia termodinámica.

Consecuentemente, el contraste entre los resultados de Loreto y la literatura internacional revela patrones consistentes con experiencias reportadas por Park y Lesourd ⁽³¹⁾, para sistemas aislados asiáticos y por Catalão et al. ⁽³²⁾, para la planificación térmica con restricciones ambientales. La brecha exergetica del 6,91 % registrada en Loreto se sitúa en el rango medio de las desviaciones reportadas por Chen et al. ⁽³³⁾, para centrales termoeléctricas operando fuera de condiciones nominales. No obstante, la conjunción singular de aislamiento fluvial, degradación del biocombustible tropical y sobredimensionamiento regulatorio configura un escenario más complejo que el documentado en otras geografías, lo que justifica la especificidad del diagnóstico territorial realizado en el presente estudio.

Cabe destacar que las limitaciones del estudio se asocian principalmente al horizonte temporal de tres años y a la disponibilidad de datos operativos secundarios provistos por un único concesionario ⁽¹²⁾. Estudios futuros deberían incorporar series más extensas, mediciones directas de poder calorífico del biocombustible almacenado y modelación dinámica de la micro-red para cuantificar el potencial de hibridación ^(26,27). Asimismo, resulta pertinente extender el análisis al sistema aislado mayor de Iquitos y a micro-centrales comunales operadas por entidades distintas al concesionario público, con el fin de obtener una visión integrada del sector eléctrico regional. Estas extensiones permitirían afinar las recomendaciones de política energética y cuantificar el impacto económico de las alternativas de reconversión tecnológica propuestas para la Amazonía peruana.

A partir de lo anterior, el aporte original de esta investigación radica en la cuantificación empírica del desfase exergético entre el modelo tarifario abstracto del regulador y la realidad termodinámica de campo, integrando dimensiones técnicas, logísticas y regulatorias en un mismo marco analítico ^(10,21,22). A diferencia de los estudios precedentes que abordan aisladamente la eficiencia diésel ^(16,19) o la degradación del biocombustible ^(14,29), este trabajo articula simultáneamente la termodinámica del ciclo real, la logística fluvial amazónica, la degradación fisicoquímica y la economía política de los subsidios energéticos. La evidencia generada constituye un insumo fundamentado para el diseño de políticas de transición energética territorialmente pertinentes y para la priorización de inversiones en hibridación solar-diésel en la región ^(26,27).

Conclusiones

La dinámica sistémica del consumo de combustible Biodiesel B5 en los sistemas eléctricos aislados amazónicos de Loreto evidencia una trayectoria de crecimiento sostenido que refleja la expansión del servicio eléctrico rural y el incremento demográfico regional, pero también la persistencia de ineficiencias exergéticas estructurales asociadas a la operación de grupos electrógenos bajo cargas parciales, en condiciones climáticas extremas y con combustible sometido a degradación fisicoquímica durante el almacenamiento prolongado. La brecha entre el rendimiento real y el estándar regulatorio revela la desconexión entre el modelo tarifario abstracto y la termodinámica de campo, configurando un escenario insostenible que demanda intervención tecnológica y reformulación de los criterios de fijación tarifaria para sistemas aislados en la Amazonía peruana.

Por consiguiente, los hallazgos sugieren que la sostenibilidad energética de la región requiere superar el paradigma de la generación térmica convencional mediante la incorporación gradual de sistemas híbridos solar-diésel con almacenamiento electroquímico, capaces de desplazar el consumo ineficiente diurno, estabilizar la micro-red y operar los motores únicamente en su régimen nominal de máxima eficiencia. La transición hacia estas arquitecturas tecnológicas no solo optimizaría la conversión exergética y reduciría la dependencia de la frágil logística fluvial, sino que también mitigaría las emisiones contaminantes en un ecosistema de altísima biodiversidad, alineando la matriz energética regional con los compromisos nacionales de cambio climático y con los principios de la transición justa.

En definitiva, el estudio aporta evidencia empírica territorializada que debe orientar el rediseño del marco regulatorio peruano para sistemas aislados, incorporando criterios de eficiencia realista que reconozcan las condiciones climáticas, logísticas y operativas de la Amazonía. Asimismo, invita a replantear el rol del Mecanismo de Compensación para Sistemas Aislados, transformándolo de subsidio pasivo al consumo de combustibles fósiles en incentivo activo para la inversión en tecnologías renovables distribuidas. Solo mediante esta integración coordinada de innovación tecnológica, reforma regulatoria y reorientación financiera será posible quebrar la trayectoria incremental del consumo y construir un sistema energético resiliente, equitativo y ambientalmente sostenible para las poblaciones vulnerables del llano amazónico peruano.

Acerca de

Financiamiento: La presente investigación fue autofinanciada por los autores. No se recibió financiación externa de agencias públicas, privadas o sin fines de lucro para el desarrollo del estudio, la recolección de datos, el análisis o la redacción del manuscrito.

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de interés de naturaleza financiera, personal, académica o política que puedan influir en los resultados, interpretaciones o conclusiones presentados en este artículo científico.

Contribuciones de autoría: Kosseth M. Bardales Grández: conceptualización, investigación, análisis formal, redacción del borrador original. Luis A. Flores Flores: metodología, validación, supervisión. Carlos E. Ríos Del Aguila: curación de datos, análisis formal, visualización. Gustavo A. Malca Salas: investigación, redacción revisión y edición, supervisión. Todos los autores leyeron y aprobaron la versión final del manuscrito.

Consideraciones éticas: Dada la naturaleza documental del estudio, basado en el análisis secundario de registros operativos técnicos anonimizados provistos por la empresa concesionaria Electro Oriente S.A. y sin intervención sobre seres humanos o animales, la investigación no requirió aprobación de comité de ética institucional, conforme a la Declaración de Singapur sobre integridad de la investigación científica.

Historia del artículo: Artículo recibido 01 de junio 2026 | Aceptado 26 de junio 2026 | Publicado 09 de septiembre 2026

Referencias

1. Enríquez G. Tecnologías de generación de energía eléctrica. México: Editorial Limusa; 2009. <https://books.google.es/books?id=BUINAgAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>
2. Lorca J. El impacto de la crisis del petróleo de 1973 en el contexto económico español. *Espac Tiempo Forma Ser V Hist Contemp*. 2014;27:165-80. <https://doi.org/10.5944/etfv.27.2015.11414>
3. López C, Sánchez M. Diagnóstico de las centrales termoeléctricas en Colombia y evaluación de alternativas tecnológicas para el cumplimiento de la norma de emisión de fuentes fijas. [Bogotá]: Universidad de La Salle; 2007. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1/
4. Heywood J. Internal combustion engine fundamentals. 2nd, editor. New York: McGraw-Hill Education; 2018. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781260116106>
5. Yergin D. The prize: the epic quest for oil, money, and power. New York: Free Press; 2008. <https://www.iwp.edu/wp-content/uploads/2020/06/The-Prize-The-Epic-Quest-for-Oil-Money-and-Power-by-Daniel-Yergin.pdf>
6. Forero-Núñez C, Eduardo-Arango J, Sierra-Vargas F. Evaluación energética de un sistema de generación de 400 kWe en modo dual Diesel-GLP en Colombia. *Ing Mecánica*. 2014;17(3):205-15. https://www.researchgate.net/publication/268746389_Evaluacion_energetica_de_un_sistema_de_generacion_electrica_de_400kWe_operado_en_modos_dual_Diesel-GLP_en_Colombia
7. Cárcamo F, Cisternas M, Marín V, González C, Rivas M. Crónica de un conflicto anunciado: tres centrales termoeléctricas a carbón en un hotspot de biodiversidad de importancia mundial. *Rev Chil Hist Nat*. 2011;84(2):171-80. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2011000200005>
8. Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). Anuario de estadísticas energéticas 2017. Quito: OLADE/BID; 2017. <https://www.olade.org/publicaciones/anuario-de-estad%EF%BF%BDsticas-energeticas-2017/>

9. Pastén C. Chile, energía y desarrollo. *Obras Proy.* 2012;(11):28-39. <https://doi.org/10.4067/S0718-28132012000100004>
10. Luyo J. Hacia la definición de una política energética para el desarrollo sostenible en Perú. *Obs Econ Latinoam.* 2010;(131):12-25. <https://www.eumed.net/cursecon/ecolat/pe/2010/jel.htm>
11. Catalão J, Mariano S, Mendes V, Ferreira L. Planificación de la operación de corto plazo de sistemas de energía termoeléctrica con restricciones ambientales. *Inf Tecnológica.* 2007;18(1):79-86. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642007000100010>
12. Gobierno Regional de Loreto (GORE Loreto). Estimación de emisiones de gases de efecto invernadero para el departamento de Loreto 2005-2014. Iquitos: GORE Loreto; 2016. <https://dar.org.pe/gore-loreto-presento-resultados-sobre-gei-en-la-region/>
13. Ministerio del Ambiente (MINAM). Tercera comunicación nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático [Internet]. Lima: MINAM; 2016. <https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/306219-tercera-comunicacion-nacional-del-peru-a-la-convencion-marco-de-las-naciones-unidas-sobre-cambio-climatico>
14. Mittelbach M, Renschmidt C. Biodiesel: the comprehensive handbook. Graz: Mittelbach Publisher; 2004. <https://search.worldcat.org/es/title/biodiesel-the-comprehensive-handbook/oclc/57564284>
15. Sarkar D. Thermal power plant: design and operation. London: Elsevier; 2015. https://www.researchgate.net/publication/285430440_Thermal_Power_Plant_Design_and_Operation
16. Barros C, Wanke P. Efficiency in Angolan thermal power plants: evidence from cost structure and pollutant emissions. *Energy.* 2017;130:129-43. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.080>
17. Çengel Y, Boles M. Termodinámica. 9a, editor. México: McGraw-Hill Interamericana; 2015. <https://archive.org/details/cengel-yunus-boles-michael-termodinamica-spanish-edition-mc-graw-hill-interameri/page/247/mode/1up>
18. Blanco J, Peña F. Incremento de la eficiencia en centrales termoeléctricas por aprovechamiento de los gases de la combustión. *Inf Tecnológica.* 2011;22(4):15-22. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642011000400003>
19. Bastidas M, Bermúdez R, Jaramillo G, Chejne F. Optimización termoeconómica y ambiental usando algoritmos genéticos multiobjetivo. *Inf Tecnológica.* 2010;21(4):35-44. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642010000400005>
20. Blanco J, Peña F. Obtención del valor real de las pérdidas de difícil evaluación aplicables al cálculo de rendimiento de calderas. *Inf Tecnológica.* 2006;17(3):123-8. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642006000300013>
21. Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (Osinermin). Informe técnico de prepublicación de tarifas en barra. Lima: Gerencia de Regulación de Tarifas, Osinermin; 2017. https://www.osinermin.gob.pe/Resoluciones/pdf/2017/R_OSINERGMIN_No.033-2017-OS-CD.pdf
22. Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (Osinermin). Resolución de Consejo Directivo N° 056-2014-OS/CD: tarifas en barra para sistemas aislados. Lima: Osinermin; 2014. <https://www.osinermin.gob.pe/Resoluciones/pdf/2014/OSINERGMIN%20No.056-2014-OS-CD.pdf>
23. Chen M, Lund H, Rosendahl L, Condra T. Energy efficiency analysis and impact evaluation of the application of thermoelectric power cycle to today's CHP systems. *Appl Energy.* 2010;87(4):1231-8. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.032>
24. Hoekman S, Broch A, Robbins C, Cenicerros E, Natarajan M. Review of biodiesel composition, properties, and specifications. *Renew Sustain Energy Rev.* 2012;16(1):143-69. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.143>

25. Guerrero F, Carazo A. Localización de centrales de generación de energía eléctrica a partir de biomasa procedente del olivar. *Rev Estud Reg.* 2005;(74):153-75. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1377905>
26. Wang Y, Kavadias S, Yang Z, Liu Y. Review on design optimization of hybrid renewable energy systems. *Energy Convers Manag.* 2018;171:1573-86. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.063>
27. International Renewable Energy Agency (IRENA). Policies and regulations for renewable energy mini-grids. Abu Dhabi: IRENA; 2018. <https://www.irena.org/publications/2018/Oct/Policies-and-regulations-for-renewable-energy-mini-grids>
28. Declaración de Singapur sobre integridad de la investigación científica [Internet]. 2010. <https://wcrif.org/guidance/singapore-statement>
29. Atabani A, Silitonga A, Badruddin I, Mahlia T, Masjuki H, Mekhilef S. A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource. *Renew Sustain Energy Rev.* 2012;16(4):2070-93. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.003>
30. Park S, Lesourd J. The efficiency of conventional fuel power plants in South Korea: a comparison of parametric and non-parametric approaches. *Int J Prod Econ.* 2000;63(1):59-67. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925527398002527>
31. Inche J. Gestión de la calidad del aire: causas, efectos y soluciones. Lima: Instituto de Investigación de Ingeniería Industrial, UNMSM; 2004. https://eventosindustrial.unmsm.edu.pe/upg_old/es/libros.php
32. Economopoulos A. Evaluación de fuentes de contaminación del aire [Internet]. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Organización Panamericana de la Salud; 2002. <https://iris.paho.org/handle/10665.2/3186>
33. Organización Panamericana de la Salud (OPS). Evaluación de los efectos de la contaminación del aire en la salud de América Latina y el Caribe. Washington D.C.: OPS; 2005. <https://iris.paho.org/handle/10665.2/3186>

Este artículo está bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0).