



Aerogenerador instalado en edificio multifamiliar: ¿Rentable o no? ¿Sostenible o no?

Wind turbine installed in multifamily building: Profitable or not? Sustainable or not?

Guillermo Linares; Raúl Siche*

Instituto Regional de Investigación Agroindustrial. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n, Trujillo, Perú.

Received October 29, 2015. Accepted March 18, 2016.

Resumen

El propósito de este estudio fue determinar la sustentabilidad económica y ambiental de un aerogenerador horizontal prototipo instalado en un edificio multifamiliar. La sustentabilidad económica se determinó por estudio económico clásico primario y la sustentabilidad ambiental utilizando el enfoque emergético. El análisis económico clásico indica que el proyecto no es rentable (VAN = -2971,05 dólares americanos) y el análisis ambiental (porcentaje de renovabilidad: 0,18; tasa de rendimiento de emergencia: 1,23); tasa de carga ambiental: 4,48; índice de sustentabilidad energética: 0,275; relación de inversión energética: 4,35 y tasa de intercambio emergético: 0,32) indica una elevada dependencia del sistema respecto a maquinarias importadas, eficiencia media respecto al aprovechamiento de recursos locales en beneficio de la sociedad, bajo impacto ambiental y un costo de producción medio respecto a otros procesos de producción de electricidad.

Palabras clave: Análisis económico; emergencia; aerogenerador; energía eólica.

Abstract

The purpose of this study was to determine the economic and environmental sustainability of a horizontal wind turbine prototype installed in a multifamily building. Economic sustainability was determined by primary classic economic study and environmental sustainability using the emergy approach. The classic economic analysis indicates that the project is not profitable (NPV = -2971.05 US dollars), and the environmental analysis (percentage of renewability: 0.18, emergy yield rate: 1.23; environmental load rate: 4.48; emergy sustainability index: 0.275; emergy investment ratio: 4.35 and emergy exchange rate: 0.32) indicates a high dependence of the system regarding imported machineries, an average efficiency regarding the use of local resources for the benefit of society, low environmental impact and an average production cost over other electricity production processes.

Keywords: Economic analysis; emergy; wind turbine; wind power.

1. Introducción

Desde la década de los 90's existen crecientes preocupaciones sobre la demanda en alza de energía y su relación con el cambio climático, el mundo está prestando mucha más atención a un futuro energético sostenible (Dincer, 2000). Académicos y responsables de legislar políticas públicas continúan debatiendo los beneficios y costos de fuentes de energía alternativas (Siche *et al.*, 2008, Siche y Agostinho, 2015). La energía eólica es considerada como rentable desde un punto

de vista medioambiental, es limpia y renovable, además de ser independiente (Engardio, 2007). Se calcula que entre el 1 y el 2% de la energía proveniente del sol se convierte en viento; por lo que, excluyendo las áreas de gran valor ambiental, se estima un potencial de energía eólica de 53 TW-h/año en el mundo, cinco veces más que el actual consumo eléctrico en todo el planeta (Mosquera, 2010).

La forma que el hombre ha encontrado para aprovechar esta energía eólica son los aerogeneradores. Pero grandes aerogene-

* Corresponding author
E-mail: rsiche@unitru.edu.pe (R. Siche).

radores pueden resultar inadecuados para determinados emplazamientos, en cambio, en zonas donde la red eléctrica es débil los pequeños aerogeneradores pueden ser mucho más interesantes. Los aerogeneradores de pequeña o mediana potencia se utilizan con muchos fines: generación de electricidad en lugares aislados de la red (casas, explotaciones agrarias, refugios de alta montaña, etc.), en pequeñas instalaciones industriales, para bombeo y riego, para alimentar repetidores aislados de telefonía o televisión, cargar baterías o faros, mover embarcaciones, en sistemas de alarma.

Por otro lado, en la evaluación de la sostenibilidad de un sistema, son por lo menos tres aspectos los que deben tenerse en cuenta: (a) costo económico, que determina la inversión, operación y el mantenimiento del sistema; (b) La eficiencia de entrada/salida que es esencial para la asignación de recursos escasos; y, (c) el costo ecológico, definido como el consumo total de la exergía de los recursos naturales en todos los procesos relativos que llevan al producto determinado (Chen, 2010).

El análisis económico clásico ha sido utilizado para analizar las inversiones en plantas eólicas de gran envergadura, por ejemplo, Welch (2009) reporta valores de Tasa Interna de Retorno (TIR) del 11,01% y Valor Actual Neto (VAN) de 46,59 millones de dólares y con periodos de recuperación de inversión de 5,87 años. Sin embargo, otros autores resaltan que el tema ambiental y económico deben ser conciliados (Florida y Davison, 2001; Welch, 2009; Ouammi *et al.*, 2010). De allí que hace falta profundizar el estudio en la evaluación de proyectos eólicos, pero considerando el aspecto ambiental, además del económico.

Uno de los métodos más prometedores de la economía ecológica, el análisis emergético (Odum, 1983) se puede utilizar para evaluar la relación integrada entre el sistema económico y el medio ambiente. Odum (1996) define a la emergía como la suma de la energía disponible consumida

en transformaciones directa e indirectamente para hacer un producto o servicio. Para ello, el análisis de emergía puede servir como un enfoque válido y complementario para determinar la sostenibilidad ambiental de las tecnologías renovables (Zhou, 2009). El análisis emergético ha sido utilizado para el estudio de la sustentabilidad de diversos proyectos de producción de energías renovables como en parques eólicos (Yang, 2013; Ouammi *et al.*, 2010; Iribarren *et al.*, 2014), plantas solares (MeiMei *et al.*, 2012), mini plantas hidráulicas (Mingyue *et al.*, 2015), plantas térmicas (Sha y Markku, 2012), plantas geotérmicas (Buonocore *et al.*, 2015), producción de electricidad a partir de biogás (Xiaolong *et al.*, 2014); pero es necesario que este enfoque se analice también desde un punto de vista económico que permita tener mayor información para una mejor toma de decisiones.

Así, el propósito de este estudio fue determinar la sustentabilidad económica y ambiental de un aerogenerador horizontal prototipo instalado en un edificio multifamiliar.

2. Materiales y métodos

2.1. Descripción del caso

En la Tabla 1 se resumen las características de la mini planta eólica instalada. El emplazamiento del proyecto eólico se encuentra ubicado en el sector este de la ciudad de Trujillo (Latitud 8° 5'47" S Longitud 79° 1' 20" O, altitud 54 m.s.n.m.), Provincia de Trujillo Región La Libertad (Perú). La turbina es de un peso de 225 kg y está formado por tres componentes: rotores, góndola y torre. La góndola se sienta encima de la torre y alberga el generador, caja de cambios, eje motor y el sistema de orientación. El rotor está atornillado a la góndola y se compone de tres cuchillas, el cubo y el cono de la nariz. Cada cuchilla es de 1,58 m de largo, pesa 4,2 kg y está hecho de fibra de vidrio y material de resina. La torre es 100% hierro galvanizado. La torre de la turbina

eólica está conectada a una caja transformadora de 1,8 kW. La torre está instalada sobre un anclaje para postes móviles sujetado al techo de la construcción mediante soldadura con la estructura del edificio, este anclaje sujeta la torre sin que esta asiente en el piso del edificio, permitiendo un movimiento pivotante que facilita la instalación y desinstalación del mismo. El recurso viento en este emplazamiento se evaluó según datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2012).

Tabla 1

Características de la mini planta eólica

| Característica | Valor |
|---------------------------------------|-------------------------|
| Tipo de turbina | Tripala 1,8 kW |
| Diámetro de aspas | 3,25 m |
| Altura del cubo (sobre el suelo) | 16 m |
| Velocidad de viento promedio (a 16 m) | 5,66 m/s |
| Densidad energética promedio | 113,78 W/m ² |
| Velocidad de trabajo de turbina | 3 a 20 m/s |
| Tiempo de trabajo | 4745 h/año |
| Terreno ocupado | 16 m ² |
| Tiempo de operación | 25 años |
| Producción de electricidad | 2163,72 kW/h/año |
| Factor de Capacidad | 29% |

2.1. Evaluación económica

Instalado el equipo se procedió a la toma de muestras respecto a la potencia producida y consumida por el aerogenerador. Se mantuvo el equipo en carga durante 13 horas de trabajo continuo (10:00 a.m. a 11:00 p.m), luego se realizaba la conexión a través de una llave térmica colocada en el tablero de control y registrando el gasto en kW-h de consumo por medio de un controlador convencional (como los utilizados por las empresas abastecedoras de luz). El inversor de corriente conectado al sistema está equipado con un sistema de auto apagado, de tal manera que cuando las baterías disminuyen su voltaje por debajo del programado (21 V) a la entrada del inversor, éste corta la salida de corriente alterna a 220 V. La prueba se realizó semanalmente durante todo un año y semestralmente para los dos años siguientes.

Los ingresos anuales fueron estimados en base al precio de 1 kW-h establecido por la empresa Abastecedora del servicio en la Ciudad de Trujillo “Hidrandina” el cual fue de 0,146 dólares incluido el impuesto correspondiente (año 2012) y a los años subsiguientes (2013 y 2014) se le aplicó el promedio de inflación de 2% anual. Posteriormente se determinaron los costos directos e indirectos de instalación y funcionamiento. La metodología además incluye el cálculo de la depreciación de bienes tangibles y la amortización de intangibles.

La inversión total del proyecto asciende a 7614,57 dólares para las especificaciones del equipo ya mencionadas. Esta inversión aplicable al proyecto fue subvencionada por parte de una empresa constructora y ha sido considerada como aporte propio al 100% sin ninguna estructura de financiamiento. Se proyectaron los costos y se construyó el flujo de caja, para finalmente calcular los indicadores económicos: Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR).

2.2. Evaluación ecológica

La evaluación se inicia con una diagramación general para identificar recursos y salidas en las redes interactivas de un sistema, utilizando el lenguaje emergético (Odum, 1983). Ya que un sistema eólico contiene ecosistemas naturales, así como obras de ingeniería asociados con insumos renovables y no renovables de energía y recursos, toda esta energía y materiales se pueden clasificar y dividir (Figura 1). Luego se construyó una tabla de evaluación emergética que lista todos los flujos que son considerados en el sistema. Los flujos incluyen no sólo el material inicial y la inversión de capital para la instalación del sistema y las entradas continuas de operación y mantenimiento, sino también factores como mano de obra y servicios. Los valores de los flujos se multiplican por sus transformidades para convertirlos en energía solar (Odum, 1988b). La transformidad se define como “la energía

de un tipo necesaria para hacer una unidad de energía de otro tipo” (Odum, 1996), teniendo como unidad los emjoles solares por joule (abreviado seJ/J). En este trabajo se han considerado transformidades de Ortega y Anami (2002), Siche y Ortega (2007) y Siche (2007). El paso final es calcular índices de emergía, útiles para el análisis de la sostenibilidad y fomentar un patrón sostenible para sistemas dominados por el hombre (Ugliati, 1998).

Todas las entradas del sistema son clasificados en tres tipos: recursos locales renovables (R), como la luz del sol, el viento y la lluvia; recursos no renovables locales (N), se refiere a los disponibles en limitada cantidad dentro de los límites del sistema, tales como la erosión del suelo y agua subterránea, etc.; importación de bienes y servicios (F), que incluye a aquellos recursos comprados por la economía, como la electricidad, la maquinaria y la mano de obra, etc. El grupo F a veces se divide en entradas renovables (FR) y entradas no renovables (FN). El uso total de emergía (U) es igual a la suma de las entradas de emergía (N + R + F), que determina el coste total de emergía que conduce el sistema. Sobre la base de las características anteriores de los flujos de emergía, varios índices emergéticos fueron propuestos para investigar la eficacia y la sostenibilidad de diferentes sistemas (Ugliati, 1998; Brown, 1997; Yang, 2013).

Porcentaje de uso de Energía Renovable (PR): indica el porcentaje del total de emergía utilizable que proviene de recursos renovables. Un sistema que utiliza una elevada fracción de recursos renovables es considerado más sustentable a largo plazo (Siche y Ortega, 2005a).

Razón de Rendimiento Emergético (EYR): mide la eficiencia del proceso al incorporar insumos adquiridos de la economía para explotar recursos locales. Cuanto mayor sea mayor será la contribución a la economía por unidad de emergía invertida.

Carga Ambiental (ELR): mide la relación entre los recursos no renovables (N) y la fracción no renovable de los insumos adquiridos por la economía ($F_N + S_N$) con

los recursos renovables empleados en el sistema ($R + F_R + S_R$), esto incluye la fracción renovable de los insumos importados. Este valor indica el potencial impacto ambiental y estrés del ecosistema debido al proceso de transformación. En la medida que ELR aumenta el sistema es menos sustentable.

Razón de Inversión Emergética (EIR): ratio de inversión de recursos importados fuera del sistema respecto de los recursos locales; relaciona la emergía procedente de la economía con la que procede del medio ambiente. A mayor valor mayor dependencia de la economía y menos de los recursos internos. Este indicador evalúa si el sistema es un usuario de recursos de la economía en comparación a otras alternativas. Por lo tanto, un sistema con una relación menor tiene más probabilidades de prosperar en el mercado.

Índice Emergético de Sustentabilidad (ESI): Índice de sostenibilidad energética que mide la contribución potencial de un proceso por unidad de carga ambiental. Este índice refleja la sostenibilidad general de un proceso de producción, lo que representa tanto la compatibilidad económica y ecológica (Siche y Ortega, 2005b).

Tasa de Intercambio Emergético (EER): Es la relación existente entre el flujo de emergía total utilizado en el proceso respecto al flujo de emergía útil producida transformada en seJ. Indica la cantidad de emergía entregada y recibida en el intercambio entre productor y usuario.

2.3. Análisis de Sostenibilidad

En esta etapa se utilizaron los indicadores de cada método realizando una descripción y caracterización del bien en aspectos, económicos y ambientales.

3. Resultados y discusión

3.1. Evaluación Económica

Con datos de potencia producida y consumida por el aerogenerador se proyectó la producción de energía eléctrica para 25 años de proyecto (Tabla 2).

Tabla 2

Producción de energía eléctrica estimada para los 25 años del proyecto

| Periodo | Año | kW-h/año producidos | Costo unitario dólares/kW-h | Ingresos dólares/año |
|---------|------|---------------------|-----------------------------|----------------------|
| 1 | 2012 | 2163,72 | 0,146 | 315,28 |
| 2 | 2013 | 2077,17 | 0,149 | 308,61 |
| 3 | 2014 | 1994,08 | 0,151 | 301,96 |
| 4 | 2015 | 1914,32 | 0,154 | 295,35 |
| 5 | 2016 | 2163,72 | 0,157 | 340,01 |
| 6 | 2017 | 2077,17 | 0,160 | 332,35 |
| 7 | 2018 | 1994,08 | 0,163 | 324,75 |
| 8 | 2019 | 1914,32 | 0,169 | 322,7 |
| 9 | 2020 | 1837,74 | 0,171 | 315,04 |
| 10 | 2021 | 2163,72 | 0,174 | 377,11 |
| 11 | 2022 | 2077,17 | 0,177 | 367,96 |
| 12 | 2023 | 1994,08 | 0,180 | 358,93 |
| 13 | 2024 | 1914,32 | 0,186 | 355,52 |
| 14 | 2025 | 1837,74 | 0,189 | 346,55 |
| 15 | 2026 | 2163,72 | 0,191 | 414,2 |
| 16 | 2027 | 2077,17 | 0,197 | 409,5 |
| 17 | 2028 | 1994,08 | 0,200 | 398,82 |
| 18 | 2029 | 1914,32 | 0,203 | 388,33 |
| 19 | 2030 | 1837,74 | 0,209 | 383,3 |
| 20 | 2031 | 2163,72 | 0,211 | 457,47 |
| 21 | 2032 | 2077,17 | 0,217 | 451,04 |
| 22 | 2033 | 1994,08 | 0,220 | 438,7 |
| 23 | 2034 | 1914,32 | 0,226 | 432,09 |
| 24 | 2035 | 1837,74 | 0,229 | 420,05 |
| 25 | 2036 | 1764,23 | 0,234 | 413,33 |

En el análisis clásico, el viento (como materia prima) no tiene valor económico. No se consideraron materiales indirectos, pero sí servicios: (a) mantenimiento general y de sistemas de control (14,29 dólares/año); y (b) mantenimiento de baterías (17,14 dólares/año). La inversión en obras de civiles de construcción representó un monto de 171,43 dólares; mientras que el espacio ocupado (5 m² en la azotea de un edificio) fue valorizado en 28,57 dólares por metro cuadrado. Maquinaria y equipos representaron un monto total de 7014,57 dólares. Asimismo, la depreciación de bienes tangibles fue de 261,73 dólares/año (Tabla 3) y la amortización de intangibles de 11,43 dólares/año.

La inversión aplicable al proyecto fue subvencionada por una empresa constructora y ha sido considerada como aporte propio al 100% sin ninguna estructura de financiamiento.

Según el costo de fabricación y la cantidad de producción en kW-h, se obtuvo un costo de fabricación unitario de 0,168 dólares, considerando 10% de utilidad operativa y

18% de impuesto general a las ventas, se obtiene un precio de venta de 0,218 dólares por kW-h, valor superior al valor de venta de la empresa abastecedora de electricidad en Trujillo, Perú (0,146 dólares / kW-h).

Tabla 3

Depreciación y amortizaciones aplicadas para el proyecto (dólares)

| Descripción | Periodo 1 a 25 |
|---|----------------|
| Obras civiles | 5,19 |
| Maquinaria y equipo | |
| Turbina (rotor, góndola y torre), inversor de corriente y controlador | 170,4 |
| De servicio y auxiliar (baterías, repisas y herramientas) | 86,14 |
| Gastos de organización y constitución | - |
| Estudios | 11,43 |
| Total | 273,16 |

Del flujo de caja elaborado (Tabla 4), en la mayoría de años se obtienen saldos positivos; sin embargo, el Valor actual Neto (VAN) del proyecto es de -2971,05 dólares. De acuerdo con el criterio formal de evaluación a través de este indicador (Muñante, 1995), el proyecto no es rentable, es decir, el proyecto no es viable económicamente. Por otro lado, la Tasa Interna de Retorno (TIR) fue de -0,99%, lo que significa que, durante la vida útil del proyecto no se recuperará la inversión y se obtendrá una pérdida 0,99%. Para que el proyecto no signifique pérdida económica, el precio del kW-h debe ser igual o superior a 0,218 dólares, valor con el que se obtendría un VAN de 3,89 y un TIR de 2% equivalente a la tasa de descuento económica tomada para el presente proyecto.

3.1. Evaluación ecológica

En la Figura 1 se muestra el diagrama energético del sistema evaluado. Las líneas punteadas muestran el ingreso de dinero producido por la venta de la electricidad (o dinero ahorrado del consumo de la red pública) y la salida del mismo para la obtención de bienes y servicios. Los flujos de energía detallados se presentan en la Tabla 2, que incorpora diferentes categorías de recursos como mano de obra, materiales e inversión en equipos.

Tabla 4

Flujo de Caja del Proyecto (en dólares americanos)

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|------------------------------------|-----------|----------|--------|--------|---------|----------|--------|--------|--------|--------|----------|--------|----------|
| INGRESOS | | | | | | | | | | | | | |
| Ingresos por ventas | | 315,29 | 308,73 | 302,31 | 296,02 | 341,27 | 334,18 | 327,23 | 320,42 | 313,75 | 376,79 | 368,96 | 361,28 |
| Ingresos financieros | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Otros ingresos | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Total ingresos | | 315,29 | 308,73 | 302,31 | 296,02 | 341,27 | 334,18 | 327,23 | 320,42 | 313,75 | 376,79 | 368,96 | 361,28 |
| EGRESOS | | | | | | | | | | | | | |
| Costos de producción | | 538,57 | 45,00 | 37,16 | 47,90 | 544,37 | 39,43 | 50,22 | 41,03 | 41,85 | 558,40 | 43,53 | 44,41 |
| Gastos de administración y ventas | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Depreciación y amortización | | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 |
| Total egresos | | 811,73 | 318,16 | 310,32 | 321,06 | 817,53 | 312,59 | 323,38 | 314,19 | 315,01 | 831,56 | 316,70 | 31756,86 |
| UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS | | (496,45) | (9,43) | (8,01) | (25,05) | (476,26) | 21,58 | 3,84 | 6,23 | (1,25) | (454,76) | 52,26 | 43,71 |
| (+) Depreciación y amortización | | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 |
| (-) Inversión en el proyecto | 7614,57 | | | | | | | | | | | | |
| (+) Valor residual | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| FLUJO DE CAJA ECONOMICO | (7614,57) | (223,29) | 263,73 | 265,15 | 248,12 | (203,10) | 294,75 | 277,01 | 279,39 | 271,91 | (181,60) | 325,42 | 316,88 |

| | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
|------------------------------------|--------|--------|----------|--------|--------|--------|--------|----------|--------|--------|--------|--------|---------|
| INGRESOS | | | | | | | | | | | | | |
| Ingresos por ventas | 353,77 | 346,41 | 416,01 | 407,36 | 398,89 | 390,59 | 382,47 | 459,31 | 449,76 | 440,40 | 431,24 | 422,27 | 413,49 |
| Ingresos financieros | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Otros ingresos | | | | | | | | | | | | | |
| Total ingresos | 353,77 | 346,41 | 416,01 | 407,36 | 398,89 | 390,59 | 382,47 | 459,31 | 449,76 | 440,40 | 431,24 | 422,27 | 413,49 |
| EGRESOS | | | | | | | | | | | | | |
| Costos de producción | 59,58 | 46,20 | 549,98 | 62,35 | 49,03 | 50,01 | 65,29 | 554,89 | 53,07 | 69,85 | 55,21 | 56,32 | 60,30 |
| Gastos de administración y ventas | | | | | | | | | | | | | |
| Depreciación y amortización | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 |
| Total egresos | 332,74 | 319,36 | 823,14 | 335,51 | 322,19 | 323,17 | 338,46 | 828,05 | 326,23 | 343,01 | 328,37 | 329,48 | 333,46 |
| UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS | 21,03 | 27,05 | (407,13) | 71,85 | 76,70 | 67,42 | 44,01 | (368,74) | 123,53 | 97,39 | 102,87 | 92,79 | 80,03 |
| (+) Depreciación y amortización | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 | 273,16 |
| (-) Inversión en el proyecto | | | | | | | | | | | | | |
| (+) Valor residual | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 904,40 |
| FLUJO DE CAJA ECONOMICO | 294,19 | 300,21 | (133,97) | 345,01 | 349,86 | 340,58 | 317,17 | (95,57) | 396,69 | 370,56 | 376,03 | 365,95 | 1257,59 |

VAN = -2971,05 dólares

TIR = -0,99%

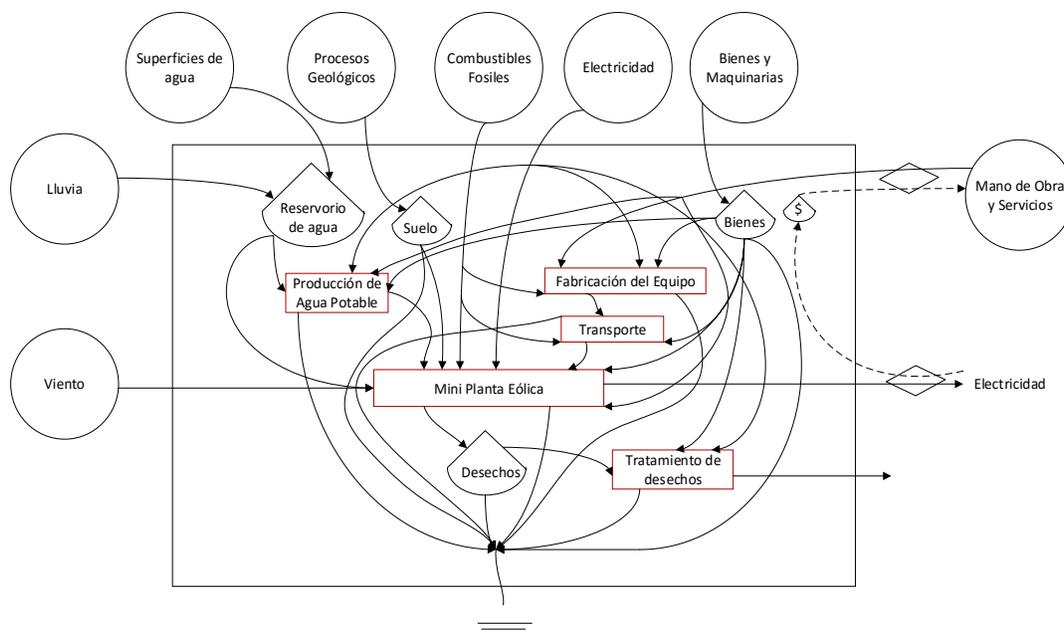


Figura 1. Diagrama del sistema energético de la mini planta eólica en estudio.

El uso total de energía (U) del parque eólico, durante 25 años de vida, fue de $3,56E+15$ seJ. La electricidad bruta producida por la mini planta eólica es de $6,01E+02$ J (Tabla 5). Por lo tanto, la transformidad de la electricidad producida por el viento en este proyecto es de $5,93E+12$ seJ/J, es decir, la energía eólica requiere de $5,93E+12$ seJ para generar 1 J de electricidad. La mayor entrada de energía pueden atribuirse a los recursos de la economía (81% de la entrada total de energía), principalmente a la importación de maquinaria (Turbina, inversor, sistema de control, baterías). La entrada total de energía importada (F) fue de $3,44E+15$ seJ (96,8% de la energía total). Las baterías (33,41%) y la turbina de viento (27,29%) son los dos mayores contribuyentes a las entradas de energía. La entrada de energía renovable ($R + FR$) alcanza un total de $6,497E+14$ seJ (18,3%) producto del uso de la energía del viento y de las renovabilidades parciales principalmente atribuidos a la mano de obra (60% FR) (Agostinho *et al.*, 2008). Del total de entradas de energía renovable, el 15,1% se

debe a la energía del viento (recurso local) y el 84,9% restante representan las renovabilidades parciales de recursos importados, principalmente mano de obra y servicios.

3.3. Índices energéticos de la mini planta eólica

De la Tabla 5 se calcularon los componentes, y luego los índices de sustentabilidad (Tabla 6).

El precio justo o precio sistémico se calculó como la relación entre los dólares energéticos consumidos anualmente en el proyecto (352,25 Emdólares) y la exergía (2163,72 kW-h) obtenida durante el funcionamiento de la mini planta eólica (Tabla 6).

La transformidad es un parámetro muy importante, que puede ser utilizado para medir la eficiencia de transformación de los sistemas de producción desde el un punto de vista medio ambiental. La transformidad de la electricidad de modernos plantas eólicas es mucho menor que los típicos sistemas de producción de energía eléctrica (Yang, 2013).

Tabla 5
Cálculo energético de la mini planta eólica y flujos agregados

| Ítem | Renovabilidad parcial | Flujo | Componentes | Monto Bruto | Unidad | Transformidad solar (seJ/Unidad) | Referencia | Energía solar (seJ) |
|---|-----------------------|--------------------------------------|---|-------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|------------|---------------------|
| Recursos locales | | | | | | | | |
| 1 | 100%R | Viento (energía cinética) | | 1,58E+10 | J | 6,2E+03 | a | 9,28E+13 |
| 2 | 90%FN | Rotor | Tres palas, cubo y cono o nariz | 1,38E+01 | dólares | 1,01E+13 | b | 1,39E+14 |
| 3 | 90%FN | Góndola | Generador, eje principal, sistema de guía | 6,19E+01 | dólares | 1,01E+13 | b | 6,25E+14 |
| 4 | 90%FN | Torre | Hierro fundido | 2,06E+01 | dólares | 1,01E+13 | b | 2,08E+14 |
| Subestación | | | | | | | | |
| 5 | 90%FN | Inversor DC/AC | Sílice, cobre, acero | 3,95E+01 | dólares | 1,01E+13 | b | 3,99E+14 |
| 6 | 90%FN | Sistema de control | Rectificador | 1,27E+01 | dólares | 1,01E+13 | b | 1,28E+14 |
| 7 | 90%FN | Sistema de almacenamiento de energía | Computadora | 2,06E+01 | dólares | 1,01E+13 | b | 2,08E+14 |
| | | | Baterías | 1,17E+02 | dólares | | | 1,19E+15 |
| Materiales de construcción e instalación | | | | | | | | |
| 8 | 90%FN | Caseta | Cemento | 5,05E-01 | dólares | 1,01E+13 | b | 5,10E+12 |
| | | | Ladrillo | 1,01E+00 | dólares | | | 1,02E+13 |
| | | | Arena | 2,02E-01 | dólares | | | 2,04E+12 |
| 9 | 90%FN | Instalación | Rodamientos | 2,75E+00 | dólares | 1,01E+13 | b | 2,78E+13 |
| | | | Cables | 2,75E+00 | dólares | | | 2,78E+13 |
| | | | Juntas | 4,43E+00 | dólares | | | 4,47E+13 |
| | | | Engrasadores | 1,37E+00 | dólares | | | 1,39E+13 |
| | | | Otros | 2,41E+00 | dólares | | | 2,43E+13 |
| Mano de obra y servicios | | | | | | | | |
| 10 | 40%FN | Mantenimiento | Baterías/equipos | 3,67E+01 | dólares | 1,01E+13 | b | 3,70E+14 |
| 11 | 40%FN | Obras civiles | Caseta y otros | 4,04E+00 | dólares | | | 4,08E+13 |
| Producción de Electricidad | | | | | | | | |
| 12 | Prod. 1 año | Electricidad | | 6,01E+02 | J | | c | |
| EMERGÍA TOTAL UTILIZADA | | | | | seJ | | c | 3,56E+15 |
| TRANSFORMIDAD DE ENERGÍA EÓLICA | | | | 5,93E+12 | seJ | | c | |
| FLUJOS AGREGADOS | | | | | | | | |
| Recursos | | Renovabilidad | Flujo de energía Renovable (seJ) | Flujo de energía no renovable (seJ) | Flujo de energía Total (seJ) | | | |
| Recursos Renovables | | | 9,82E+13 | 0,00E+00 | 9,82E+13 | | | |
| Viento | | 1 | 9,82E+13 | 0,00E+00 | 9,82E+13 | | | |
| Recursos dentro del Sistema | | | 1,73E+12 | 1,56E+13 | 1,73E+13 | | | |
| Depreciación edificaciones | | 0,10 | 1,73E+12 | 1,56E+13 | 1,73E+13 | | | |
| Recursos de economía | | | 5,50E+14 | 2,89E+15 | 3,44E+15 | | | |
| Depreciación maquinaria | | 0,10 | 3,03E+14 | 2,73E+15 | 3,03E+15 | | | |
| Mantenimiento de baterías y equipos | | 0,60 | 2,22E+14 | 1,48E+14 | 3,70E+14 | | | |
| Construcción de caseta | | 0,60 | 2,45E+13 | 1,63E+13 | 4,08E+13 | | | |
| Energía total | | | 6,497E+14 | | 3,56E+15 | | | |

^a Ortega y Anami (2002); ^b Siche y Ortega (2007); ^c Este estudio.

Tabla 6
Componentes e índices de sustentabilidad energética

| COMPONENTES | | |
|---------------------------------|--|-----------|
| Flujo | Valor | Unidad |
| Renovables (R) | 6,497E+14 | seJ |
| Recursos no renovables (N) | 1,56E+13 | seJ |
| Recursos económicos (F) | 2,89E+15 | seJ |
| Energía total (U) | 3,56E+15 | seJ |
| Dólares emergéticos (Emdólares) | 352,25 | Emdólares |
| Exergía de los productos (Ep) | 2163,72 | kW-h |
| ÍNDICES EMERGÉTICOS | | |
| Índice | Cálculo | Valor |
| Renovabilidad | $PR = (R + F_R + S_R / U)$ | 0,18 |
| Tasa de rendimiento de energía | $EYR = U / (F_N + S_N)$ | 1,23 |
| Tasa de carga ambiental | $ELR = (N + F_N + S_N) / (R + F_R + S_R)$ | 4,48 |
| Tasa de inversión de energía | $EIR = (F_N + S_N) / (R + F_R + S_R + N)$ | 4,35 |
| Índice de Sustentabilidad | $ESI = EYR / ELR$ | 0,275 |
| Tasa de intercambio energético | $EER = U / (\text{dólares} * (\text{SEJ} / \text{dólares}))$ | 0,32 |
| Precio Justo/kW-h (Ambiental) | Emdólares/kW-h | 0,16 |

La Transformidad para plantas eólicas de 2,5MW es de $6,21E+04$ (Brown y Ugliati, 2002), para plantas eólicas de 30 MW construidas en 1996 fue reportado un valor de $1,74E+04$ (Yang, 2013), lo que demuestra que mientras más grande es la capacidad de la planta eólica menores serán los costos emergéticos, además que estos valores dan cuenta de la magnitud del avance de la tecnología en las últimas décadas. Transformidades reportadas para sistemas fotovoltaicos son de $8,92E+04$ (Paoli, 2008), para una planta de concentración solar de $6,39E+04$ (Zhang y Jiang, 2012), para una planta térmica (combustibles fósiles) de $1,71E+05$ (Yang, 2013). La transformidad encontrada en este estudio fue de $5,93E+12$, valor mucho mayor a todos los sistemas existentes. Esto podría deberse al tamaño de la planta, ya que proyectos de mayor envergadura se reducen los costos de fabricación y mantenimiento y mejora la eficiencia de utilización del viento al encontrarse en emplazamientos desérticos con velocidades de viento promedio que superan los 7,22 m/s (Yang, 2013). A pesar de tener una alta transformidad, los índices emergéticos pueden brindar una explicación más clara de la utilización de la energía de un sistema y proveer efectivamente información acerca de la sostenibilidad ambiental individual de cada proyecto.

Estos índices emergéticos son posibles de definir (Tabla 6) gracias a la separación de las entradas en fuentes renovables y no renovables (Brown *et al.*, 2012). Yang (2013) reporta que la energía eólica tiene los niveles más altos de renovabilidad (0,2) en comparación con la energía solar térmica (0,15) y fotovoltaica (0,02); similar al obtenido en el presente estudio (0,18). Los sistemas con un alto porcentaje de energía renovable tienen mayor probabilidad de ser más sostenibles y prevalecer, es decir, tienen más capacidad de sobrevivir a un estrés económico, que aquellos que usan una gran cantidad de energía no renovable (Cohen *et al.*, 2006; Rydberg y Haden, 2006).

La tasa de rendimiento de energía (EYR) de la energía eólica obtenida en el presente estudio es de 1,23 valor muy próximo al encontrado por Yang (2013) (1,25) para el mismo sistema y representa una tasa de rendimiento medio respecto a los sistemas de producción de electricidad tradicionales (1,06 – 1,51) (Caruso *et al.*, 2001). Esto demuestra que la miniplanta eólica instalada en el presente estudio es relativamente eficiente (respecto a otros sistemas para producción de electricidad) en el aprovechamiento de recursos locales para generar un beneficio a la sociedad. Sin embargo, no hay contribución significativa de recursos locales y el sistema está asociado a procesos casi completamente manufacturados (Brown, 2012), bajo beneficio económico y una competencia de mercado débil (Zhou *et al.*, 2010), es decir, el sistema eólico analizado no se utiliza de manera correcta los recursos locales (Castellini *et al.*, 2006), probablemente debido a la baja capacidad del proceso de explotar los recursos locales (renovables y no renovables) mediante la inversión económica de recursos provenientes del exterior (Zhang *et al.*, 2010).

La tasa de carga ambiental (ELR) mide el impacto ambiental potencial del sistema, permitiendo una mejor comprensión y análisis en conjunto con el EYR. El valor de ELR de una planta fotovoltaica (48,93) es mucho mayor que el de la energía eólica (4,0 según Yang (2013) y 4,48 en este estudio), energía solar térmica (5,54) y los sistemas de producción de biocombustibles (0,52 - 7,84). Se puede inferir que la energía eólica, en comparación con una planta fotovoltaica, produce menos estrés ambiental para generar la misma cantidad de electricidad. El ELR (Environmental Loading Ratio) de 4,48 indica que los procesos tienen un bajo impacto ambiental o cuentan con un área muy grande para diluir el impacto ambiental. Cuando el ELR se encuentra entre 3 y 10, el impacto es considerado moderado, con entradas no renovables moderadas y así mismo con moderadas emisiones al ambiente (Cao y Feng, 2007).

ESI (Emergy Sustainable Indices) es una medida que relaciona EYR y ELR para tener en cuenta tanto la compatibilidad económica (energética) y ecológica. ESI menor a 1 (0,31 según Yang (2013) y 0,275 de este estudio) el proceso no es sostenible a largo plazo (Cao, 2007).

Los combustibles derivados de biomasa, especialmente el biogás obtenido por digestión anaerobia, muestran un mejor desempeño ecológico y una mejor sostenibilidad ambiental respecto a las tecnologías eólicas y solares (Tabla 6). Se puede notar que los valores de EIR son semejantes tanto para sistemas de producción eólico, solar y biodiesel. La razón es que estos sistemas tienen una utilización insignificante de recursos no renovables locales (N), que se puede derivar de las fórmulas de cálculo respectivas (Tabla 6). Zhang *et al.* (2007) refiere que cuanto menor sea este índice, más bajo es el costo económico del proceso. Un valor de EIR = 4,35 indica que el costo económico del proceso es medio. Se calculó la Tasa de Intercambio Emergético (EER) (Tabla 5) alcanzando un valor de 0,32 (menor a 1), lo que indica que se el productor recibió más emergía de la que fue utilizada para producir el bien (Agostinho *et al.*, 2008).

Al comparar diferentes categorías de sistemas utilizando los índices emergéticos, encontramos ciertas limitaciones al contrastar los valores obtenidos. De hecho,

la variación está intrínsecamente arraigado en sus fracciones características de entradas de emergía y son diferentes para cada sistema. Esto remarca la necesidad de una perspectiva más amplia para evaluar la sostenibilidad de los sistemas de producción. Sin embargo, para el mismo sistema de producción, también se puede encontrar discrepancias de índices de emergía. Por ejemplo, los índices de emergía para la producción de bioetanol y biodiesel (Tabla 7), muestran cierta variación. Esto se atribuye principalmente a las diferencias en la carga de alimentación, la eficiencia de producción y el proceso tecnológico considerado en cada análisis. El periodo de tiempo, la fracción renovable del trabajo y servicios cambia con el lugar en el que se realiza el análisis, afectando directamente a los índices de emergía (Yang, 2013).

Aunque generalmente descuidado en el análisis tradicional, la mano de obra y los servicios son entradas importantes del sistema en el análisis emergético. El trabajo humano para la instalación de la planta, operación y mantenimiento (Figura 2) representa una parte considerable del uso total de emergía (11,53%); más aún, si sumamos el trabajo humano utilizado en la construcción de la torre (no considerado ya que el costo de adquisición e instalación del equipo incluía la construcción de la torre).

Tabla 7

Comparación de índices emergéticos para sistemas renovables

| Planta | Referencia | Año Publicación | PR | EYR | ELR | EIR | ESI |
|-----------------|------------|-----------------|------|------|-------|-------|------|
| Eólico | a | 2016 | 0,18 | 1,23 | 4,48 | 4,35 | 0,28 |
| | b | 2013 | 0,20 | 1,25 | 4,00 | 4,00 | 0,31 |
| Solar Térmico | c | 2011 | 0,15 | 1,19 | 5,54 | 5,54 | 0,21 |
| Fotovoltaico | d | 2008 | 0,02 | 1,03 | 48,93 | 37,27 | 0,02 |
| Biocombustibles | e | 2010 | 0,25 | 1,05 | 3,02 | 0,95 | 0,35 |
| Bioetanol | | | | | | | |
| Trigo | f | 2008 | 0,20 | 1,24 | 4,05 | 2,38 | 0,31 |
| Maíz | f | 2008 | 0,11 | 1,14 | 7,84 | 5,36 | 0,15 |
| Caña | g | 2010 | 0,31 | 1,57 | 2,23 | 1,44 | 0,71 |
| Yuca | h | 2011 | 0,28 | 1,07 | 2,55 | 2,47 | 0,42 |
| Biodiesel | | | | | | | |
| Ac. vegetal | i | 2007 | 0,06 | 3,68 | 3,55 | 3,57 | 1,04 |
| Ac. soya | j | 2010 | 0,31 | 1,62 | 2,26 | 2,26 | 0,72 |
| Biogás | k | 2011 | 0,66 | 2,93 | 0,52 | 0,52 | 5,67 |

a. Este estudio; b. Yang (2013); c. Zhang *et al.* (2007); d. Paoli (2008); e. Goh y Lee (2010); f. Dong *et al.* (2008); g. Pereira y Ortega (2010); h. Yang (2013); i. Liu *et al.* (2007); j. Cavalett y Ortega (2010); k. Ciotola *et al.* (2011).

Según Yang (2013) la energía eólica se basa en gran parte en las aportaciones de energía de los servicios humanos, lo que refleja la necesidad de simplificar y optimizar el proceso para que sea más rentable.

Por otro lado, la industria eólica ofrece considerables oportunidades de empleo durante las diferentes fases de desarrollo de parques eólicos, como la fabricación de la turbina, la construcción de la planta, operación y mantenimiento, tanto empleo directo como indirecto. Según el Consejo Mundial de Energía Eólica, el mercado anual de energía eólica crea 13 empleos por cada megavatio de nueva capacidad en ese año, empleando a 524 mil personas en el sector de la energía eólica al 2020 (Yang, 2013).

Para el estudio se puede notar además que el mayor monto de flujos de energía consumidos es el del uso de baterías (33,41%), esto se debe principalmente al poco acceso a tecnologías modernas en nuestro país que permitan el uso de sistemas más eficientes y a la vez más baratos que permitan almacenar energía para poder brindar un servicio estable y de mayor duración.

3.4. Análisis de sostenibilidad

La energía eólica parece ser una situación que tiene un alto beneficio social (desde un punto de vista público), pero no es rentable (desde un punto de vista privado); por lo que el gobierno de un país, debería asumir o recompensar los beneficios sociales para hacer atractivo la puesta en marcha de este tipo de proyectos por el inversor privado. Por ejemplo, hace tres décadas, Estados Unidos se planteó la meta de generar energía eléctrica eólica equivalente al 5% de la energía eléctrica utilizada al 2020, ofreciendo incentivos financieros a inversores privados, como el permitir la depreciación acelerada de activos fijos (para efectos fiscales) durante un período de 5 años, a pesar de que su vida útil sea de 20 a 25 años; u otorgando crédito fiscal (1,5 centavos de dólar por kilovatio-hora) a la producción de electricidad generado a

partir de turbinas eólicas en sus primeros 10 años de operación (Welch, 2009). Este tipo de iniciativas, sumado al hecho de que una planta de mayor envergadura permite disminuir costos de fabricación e instalación, el rediseño de ciertos componentes para incrementar la capacidad de una turbina, así como la altura de instalación, hasta la misma localización, podrían permitir obtener una mayor producción de energía eléctrica con un aumento no significativo en la inversión, haciendo más rentable un proyecto eólico.

La ubicación del proyecto también influye drásticamente en la rentabilidad económica del proyecto, la ubicación propuesta no fue la óptima, según el mapa eólico del Perú, recomendándose el cambio de emplazamiento hacia la zona Sur Oeste de la ciudad.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos concuerdan con los estudios emergéticos aplicados sobre plantas eólicas de mayor envergadura y en resumen confirman mayores beneficios y menor impacto ambiental de este tipo de plantas productoras de electricidad respecto a plantas solares, hidroeléctricas y térmicas que utilizan combustibles fósiles, sin llegar a superar la performance del uso de biocombustibles y biogás.

El análisis emergético permitió estimar indicadores, tal como PR (porcentaje de renovabilidad; 0,18), EYR (tasa de rendimiento de energía; 1,23), ELR (tasa de carga ambiental; 4,48), ESI (índice de sustentabilidad emergética; 0,275), EIR (relación de inversión emergética; 4,35), EER (tasa de intercambio emergético; 0,32), lo cual reveló las siguientes características del sistema: elevada dependencia respecto a maquinarias importadas, eficiencia media respecto al aprovechamiento de recursos locales en beneficio de la sociedad, bajo impacto ambiental y emisiones al medio ambiente y un costo de producción medio respecto a otros procesos de producción de electricidad. Se obtuvo un VAN de -2971,05 USD y TIR

de -0,99% lo que indica que el proyecto no es rentable, sin embargo, se vuelve rentable al considerar un precio de 0,21 dólares/kW-h. El precio sistémico encontrado desde el punto de vista emergético fue de 0,16 dólares/KW-h, el cual resulta ser poco menor que el valor necesario para lograr rentabilidad en el proyecto. Los resultados obtenidos nos brindan datos que permitirán optimizar la instalación y utilización de sistemas eólicos además de proponer políticas de estimulación para lograr cumplir metas regionales futuras.

5. References

- Agostinho, F.; Diniz, G.; Siche, R.; Ortega, E. 2008. The use of emergy assessment and the Geographical Information System in the diagnosis of small family farms in Brazil. *Ecological Modelling* 210 (1): 37-57.
- Brown, M. 1997. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. *Ecological Engineering* 9 (1): 51-69.
- Brown, M.; Ugliati, S. 2002. Emergy evaluations and environmental loading of electricity production systems. *Journal of cleaner production* 10 (4): 321-334.
- Brown, M.; Rauegi, M.; Ugliati, S. 2012. Boundaries and investments in Emergy Synthesis and LCA: A case of study on Thermal vs photovoltaic electricity. *Ecological Indicators* 15 (1): 227-235.
- Buonocore, E.; Vanoli, L.; Carotenuto, A.; Ugliati, S. 2015. Integrating life cycle assessment and emergy synthesis for the evaluation of a dry steam geothermal power plant in Italy. *Energy* 86: 476-487.
- Cao, K.; Feng, X. 2007. The Emergy Analysis of multi-product systems. *Process Safety and Environmental Protection* 85 (5): 494-500.
- Caruso, C.; Catenassi, G.; Marchettini, N.; Principi, L.; Tiezzi, E. 2001. Emergy based analysis of italian electricity production system. *Journal of thermal analysis and Calorimetry* 66 (1): 265-272.
- Castellini, C.; Bastianoni, S.; Bosco, A.; Brunetti, M. 2006. Sustainability of poultry production using emergy approach: Comparison of conventional and organic rearing systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 114: 343-350.
- Cavalett, O.; Ortega, E. 2010. Integrated environmental Assessment of biodiesel production from soybean in Brazil. *Journal of Cleaner Production* 18 (1): 55-70.
- Chen, Z.X. 2010. Emergy based ecological assessment of constructed wetland for municipal wastewater treatment: methodology and application to the Beijing wetland. *J of Environmental informatics* 15 (2): 62-73.
- Ciotola, R.; Lansing, S.; Martin, J. 2011. Emergy analysis of biogas production and electricity generation from small-scale agricultural digesters. *Ecological engineering* 37: 1681-1691.
- Cohen, M.; Brown, M.; Shepherd, K. 2006. Estimating the environmental costs of soil erosion at multiple scales in Kenya using emergy synthesis. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 114: 249-269.
- Dincer, I. 2000. Renewable energy and sustainable development: a crucial review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 4 (2): 157-175.
- Dong, X.; Ugliati, S.; Yang, M.; Zhang, X.; Gao, W. 2008. Energy and Emergy evaluation of bioethanol production from wheat in Henan province, China. *Energy Policy* 36 (10): 3882-3892.
- Engardio, P. 2007. Beyond the Green Corporation. *Business Week* January 29: 50-64.
- Florida, R.; Davison, D. 2001. Gaining from green management: environmental management systems inside and outside the factory. *California Management Review* 43 (3): 64-84.
- Goh, C.; Lee, K. 2010. Palm-based biofuel refinery (PBR) to substitute petroleum refinery: an energy and emergy assessment. *Renewable and Sustainable Energy reviews* 14: 2986-2995.
- Iribarren, D.; Vasquez-Rowe, I.; Benedetto Rugani, E. 2014. On the feasibility of using emergy analysis as a source of benchmarking criteria through data envelopment analysis: A case study for wind energy. *Energy* 67: 527-537.
- Jorgensen, S. 2004. Emergy and exergy stored in genetic information. *Ecological modelling* 178 (1-2): 11-16.
- Liu, S.; Sun, D.; Wan, S. 2007. Emergy evaluation of a kind of Biodiesel production system and construction of new emergy indices. *Natural Science* 86 (1-2): 256-263.
- MeiMei, Z.; Zhifeng, W.; Chao, X.; Hui, J. 2012. Embodied Energy and emergy analyses of a concentrating solar power system. *Energy Policy* 42: 232-238.
- Mingyue, P.; Lixiao, Z.; Ugliati, S.; Changbo, W. 2015. Ecological Impacts of small hydropower in China: Insights from an emergy analysis of a case plant. *Energy Policy* 76: 112-122.
- Mosquera, P. 2010. *Energías Renovables para todos*. Editorial Haya Comunicación. Madrid – España.
- Muñante, D. 1995. *Indicadores de la evaluación económica de proyectos: VAN, B/C, N/K, TIR. Definición de cálculo e interpretación*. Editorial Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo - Mexico.
- Odum, H. 1983. *System ecology*. Editorial Wiley. New York - USA.
- Odum, H. 1988b. Self organization, transformity and information. *Science* 242: 1132-1139.
- Odum, H. 1996. *Environmental accounting. Emergy and environmental decision-making*. Editorial Wiley. New York - USA.
- Ortega, E.; Anami, M. 2002. Certification of food products using emergy analysis. *Proceedings of III International workshop Advances in Energy Studies*. 227-237.
- Ouammi, A.; Sacile, R.; Zejli, D.; Mimmet-Abdelaziz, B. 2010. Sustainability of a wind power plant: Application to different Moroccan sites. *Energy* 35: 4226-4236.
- Paoli, C. V. 2008. Solar power: an approach to transformity evaluation. *Ecological Engineering* 34: 191-206.
- Pereira, C.; Ortega, E. 2010. Sustainability assessment of large-scale ethanol production from sugarcane. *Journal of Cleaner Production* 18 (1): 77-82.
- Rydberg, T.; Haden, A. 2006. Emergy evaluations of Denmark and Danish agriculture: Assessing the influence of changing resource availability on the organization of agriculture and society. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 117 (2): 145-158.
- Sapag, N.; Sapag, R. 1991. *Preparación y evaluación de Proyectos Sapag*. Editorial McGraw-Hill. México.

- SENAMHI. 2012. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Disponible en: http://www.senamhi.gob.pe/main_mapa.php?t=dHi
- Sha, S.; Markku, H. 2012. Emery evaluation of combined heat and power plant processes. *Applied Thermal Engineering* 43: 67-74.
- Siche, R.; Ortega, E. 2005a. Cálculo do índice de renovabilidade emergética na avaliação da sustentabilidade de uma economia nacional. *Agrener* 6 (1), 1-7.
- Siche, R.; Ortega, E. 2005b. Índice de Sustentabilidade Emergético como ferramenta para avaliar a sustentabilidade dos países da América Latina. *Seminário Internacional Ciencia e Tecnologia na América Latina 2*. UNICAMP. Brasil.
- Siche, R.; Ortega, E. 2007. Emery-based sustainability of the Peruvian Economy. En M. Brown, *Emery Synthesis 4: Theory and applications of the Emery Methodology* (págs. 11.1-11.12). Gainesville, Florida: The Center for Environmental Policy.
- Siche, R. 2007. Avaliação ecológica-termodinâmica e econômica de nações: o peru como estudo de caso. Tesis de Doctorado, Universidad Estadual de Campinas. Brasil.
- Siche, R.; Agostinho, F.; Ortega, E.; Romeiro, A. 2008. Sustainability of nations by indices: Comparative study between environmental sustainability index, ecological footprint and the emery performance indices. *Ecological Economics* 66: 628 – 637.
- Siche, R.; Agostinho, F. 2015. El Índice de Beneficio Emergético (IBE) como indicador de sostenibilidad de las exportaciones del sector agropecuario de un país. *Journal Agriculture and Animal Sciences* 4 (2): 8-18.
- Ugliati, S. 1998. Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems. *Ecological Modelling* 108 (1): 23-36.
- Villarrubia, M. 2013. Ingeniería de la energía Eólica. Editorial Alfaomega. México D.F. - México.
- Welch, J. 2009. The dual sustainability of wind power. *sustainable Energy Reviews* 13 (5): 1121-1126.
- Xiaolong, W.; Yuanquan, C.; Peng, S.; Wangsheng Gao, F. 2014. Efficiency and Sustainability analysis of biogas and electricity production from a large-scale biogas project in China: an emery evaluation based on LCA. *Journal of Cleaner Production* 65: 234-245.
- Yang, Q. 2013. Environmental sustainability of wind power: An emery analysis of a chinese wind farm. *Renewable and Sustainable Energy Rev.* 25: 229-239.
- Zhang, L.; Yang, Z.; Chen, G. 2007. Emery analysis of cropping-grazing system in Inner Mongolia Autonomous Region, China. *Energy Policy* 35: 3843-3855.
- Zhang, X.; Deng, S.; Wu, J.; Jiang, W. 2010. A sustainability analysis of a municipal sewage treatment ecosystem based on emery. *Ecological Engineering* 36 (5): 685-696.
- Zhou, J. 2008. Embodied ecological elements accounting of national economy. PhD. Dissertation. Peking University. Beijing - China.
- Zhou, J. 2009. Emery evaluations for constructed wetland and conventional wastewater treatments. *Communications in nonlinear science and numerical simulation* 14 (4): 1781-1789.
- Zhou, S.; Zhang, B.; Cai, Z. 2010. Emery analysis of a farm biogas project in China: A biophysical perspective of agricultural ecological engineering. *Communications in nonlinear Science and Numerical Simulation* 15 (5): 1408-1418.