

Estimación de la tasa de retorno energético: Análisis comparativo de las metodologías disponibles en la actualidad

Federico G. Camargo, Gustavo A. Schweickardt

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas- CONICET, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concepción del Uruguay (UTN-FRCU), Ing. Pereira 676, Concepción del Uruguay, Argentina, 3260.

Autor para correspondencia: gustavoschweickardt@conicet.gov.ar

Fecha de recepción: 21 de septiembre de 2014 - Fecha de aceptación: 17 de octubre de 2014

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolló un análisis conceptual y preliminar de los conceptos y criterios necesarios para la estimación de la Tasa de Retorno Energético (TRE). Se buscó discutir los problemas y aspectos a considerar para obtener una metodología estandarizada y flexible, la cual resulte factible para realizar comparaciones y tomas de decisiones, con el fin de minimizar el impacto ambiental. Se discutieron los métodos basados en estudios monetarios, el método de análisis del ciclo de vida (LCA) y se propuso realizar la modelación por medio de Análisis de Sistemas Dinámicos (ASD) a través del software VENSIM®. A tal efecto, se hizo un desarrollo matemático definiendo las variables de estado, auxiliares y parámetros de ajustes necesarios para estudiar la problemática. De esta manera, se definieron algunos criterios y factores influyentes, a mediano y largo plazo, en la sustentabilidad del sistema energético, con la intención de incorporarlos en ámbitos de discusión y enseñanza pertinentes, propiciando su difusión y críticas.

Palabras clave: TRE, fuente primaria de generación renovable, simulación y modelo dinámico, sistema energético.

ABSTRACT

This work presents a conceptual and preliminary analysis of the concepts and criteria for estimating the Energy Return on Investment (EROI). The manuscript discusses the issues and considerations for a standardized methodology that allows comparisons and decision-making, aiming at minimizing the environmental impact. Methods in monetary studies were discussed, such as the Life Cycle Analysis (LCA) method. For the analysis the modeling platform Dynamical Systems Analysis (DS) was applied using the VENSIM® software. A mathematical approach was made, defining the state and auxiliary variables and the adjustment parameters of the problem. Criteria were defined to assess the medium and long term sustainability of the energy system, with the objective to incorporate insights into relevant areas of discussion and education, enhancing the dissemination and review of findings.

Keywords: EROI, primary source of renewable generation, dynamical system, energy system.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Problemática actual

La urgencia en la resolución de la problemática respecto a la Sustentabilidad Energético/Ambiental del Sector Energético vinculado al Abastecimiento Eléctrico, obliga la búsqueda de tecnologías que sustituyan Fuentes Primarias de Generación no Renovables (FPGNR) por Fuentes Primarias de Generación Renovables (FPGR), y la mejora la Eficiencia Energética del sistema en general. La

sustentabilidad Ambiental refiere el intento de minimizar las emisiones de gases causantes del Efecto Invernadero, fundamentalmente el dióxido de carbono (CO₂). Mientras que la Sustentabilidad Energética, intenta buscar recursos que sean potenciales reemplazantes del combustible fósil ante una probable y próxima crisis energética (Schweickardt & Giménez, 2012).

Se busca por lo tanto una definición operacional del concepto de Sistemas de distribución de Energía Eléctrica (SDEE) Económicamente Adaptado para la Eficiencia Energética 'del Lado de la Oferta', por medio de un modelo que considere el emplazamiento de FPGR, bajo la forma de Generación Distribuida (GD). El enfoque del Control Regulatorio responde, en este contexto, a tres razones fundamentales. En primer lugar, la inercia inherente al cambio cultural que supone la Eficiencia Energética 'del Lado de la Demanda'. En segundo lugar, la existencia de niveles de pérdidas en las redes, y su correlato con las emisiones de CO₂ en proporción a la generación fósil/carbónica cuya potencia discurre por el sistema, muy por encima de los estándares, a causa de la falta de inversión e instrumentos de control que simetricen la relación Regulador-Regulado en los SDEE. Y, por último, la necesidad de emplear, en la medida que la sustentabilidad energético/ambiental del SDEE lo permita y se disponga de ellas, FPGR bajo la forma de Generación Distribuida (Schweickardt & Miranda, 2008).

1.2. *Objetivo del trabajo*

Se presenta, en primer lugar, una comparación de las metodologías disponibles en el estado del arte para la evaluación de la rentabilidad energética de las fuentes de generación renovables, con el objetivo de incentivar la explotación óptima en operación y expansión de mediano/corto plazo de los sistemas de redes de distribución. En este sentido la Tasa de Retorno Energético (EROI) es el mejor estimador para medir la rentabilidad energética obtenida y, por lo tanto, se procede a discutir los métodos disponibles en el estado del arte dificultades a resolver para su determinación. Se busca enfatizar, como propuesta y en segundo lugar, las ventajas de realizar Análisis de Sistemas Dinámicos (ASD), por medio del Software VENSIM®, haciendo un pequeño desarrollo del modelo propuesto. Se aclara que para el presente trabajo se utilizó la versión gratuita del programa, disponible para su uso educativo.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. *Definición de sistema*

En forma general, se define un sistema a un conjunto de elementos organizados y relacionados que interactúan entre sí. Todo sistema tiene una o varias entradas y salidas que pueden ser datos, energía o materia prima, en este sentido, los sistemas se categorizan según el tipo de entrada y salida que manejen. Se considera como sistema toda la aparamenta eléctrica correspondiente a la generación de energía como la demanda industrial y transporte (Wacker *et al.*, 1990). La Eficiencia Energética del sistema implica la minimización de las pérdidas de potencia/energía causantes en la obsolescencia prematura de la aparamenta eléctrica instalada, disminuyendo su vida útil y alterando Rentabilidad Energética. Dicho concepto involucra la energía requerida para producir el dispositivo con cierta vida útil bajo condiciones de operación nominal, supuestas eficientes, conforme la mejor tecnología disponible para su fabricación (Schweickardt *et al.*, 2012).

2.2. *Tasa de retorno energético (TRE) - Energy return on investment (EROI)*

Según las leyes termodinámicas, la energía no se crea ni se destruye, sino que se transforma. El término generación de energía refiere al proceso de transformación de energía realizado por una máquina, en el cual se transforma el recurso energético de interés, en otro tipo de energía que sí tiene utilidad. En toda transformación se producen pérdidas, es decir parte de la energía se utiliza en procesos irreversibles de índole térmicos, químicos, electromagnéticos, etc., que no aportan en la energía obtenida como útil. Con el fin de realizar y sustentar el proceso de transformación energética es necesario invertir energía útil en crear y mantener su infraestructura, abastecimiento energético y

de insumos, además de las correspondientes pérdidas en su funcionamiento. Considerando la merma y posible agotamiento de los recursos fósiles, preocupa conocer entonces la cantidad de energía útil que se obtiene de una fuente de generación determinada y la energía invertida para lograrlo, y el índice que analiza dichos aspectos se denomina Tasa de retorno energético (TRE), Energy Return On Investment (EROI). Ambas siglas serán utilizadas indistintamente.

$$EROI = \frac{E_{ret}}{E_{inv}} \quad (1)$$

donde E_{ret} es la Energía neta Retornada (ER) por la FGR y E_{inv} es la Energía Invertida (EI) en el proceso. La disponibilidad de métodos en el estado del arte es amplia, se discutirán algunos índices propuestos hasta ahora. Algunos de ellos son útiles a la hora de hacer estudios comparativos de proyectos semejantes y evaluar la evolución tecnológica del recurso en cuestión, pero inaplicables para comparar distintas categorías de recursos energéticos.

3. COMPARACIÓN DE METODOLOGÍAS DISPONIBLES EN EL ESTADO DEL ARTE

3.1. Estimación por cálculos analíticos

Se procede a exponer la estimación de la TRE por cálculos analíticos directos. Esta estimación consiste en resolver la ecuación procedente de la definición, evaluando la energía invertida en la maquinaria utilizada E_m y en equipamiento E_e durante la explotación del recurso renovable:

$$EROI = \frac{E_{Ret}}{E_m + E_e} \quad (2)$$

Existen dos parámetros que dificultan tal estimación, en primer lugar los límites de influencia respecto a la Energía Invertida, y en segundo lugar los criterios adoptados respecto a Eficiencia Energética, impacto social y ambiental. Respecto al primero, el cálculo no solo se circunscribe únicamente el gasto en construcción y funcionamiento de los distintos equipos utilizados en la extracción y/o explotación de la fuente energética, sino en toda la cadena de producción hasta llegar a los minerales extraídos. También refiere al gasto realizado en transporte y equipos necesarios y pérdidas energéticas de índole eléctricas, térmicas, hidráulicas, etc. La actualidad energética tiene carácter dinámico, existe una demanda creciente en forma exponencial, avances tecnológicos a ritmos acelerados, mayor rigurosidad en las reglamentaciones buscando minimizar el impacto ambiental. Esto aumenta la dificultad de proponer un índice fijo y obtener información del mismo sobre los parámetros del sistema considerado, requiriéndose información adicional. En consecuencia las discusiones realizadas hasta ahora son insuficientes para extraer conclusiones para tomar decisiones satisfactorias que permitan la optimización de la Sustentabilidad Energético/Ambiental.

3.2. Estimación de la EROI por análisis monetarios - Análisis de ciclo de vida

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) - Life Cycle Assessment (LCA) permite realizar un diseño, investigación y evaluación de un proceso productivo y del impacto ambiental asociado durante la explotación del recurso energético en cuestión. La finalidad es evaluar el impacto potencial sobre el ambiente a lo largo de todo su ciclo de vida mediante la cuantificación del uso de recursos (ver Fig. 1). El procedimiento es el siguiente: en primer lugar se fijan los límites del sistema, luego se miden las pérdidas de los distintos subsistemas, efectuando correcciones en la calidad de energía. En tercer lugar, se efectúan la conversión económica-monetaria de energía, y por último se analizan las estadísticas obtenidas. Se definen las entradas como energía, materias primas, maquinarias nuevas y la salida deseada son las emisiones ambientales, en nuestro caso la cantidad de dióxido de carbono producido (Murphy & Hall, 2011).

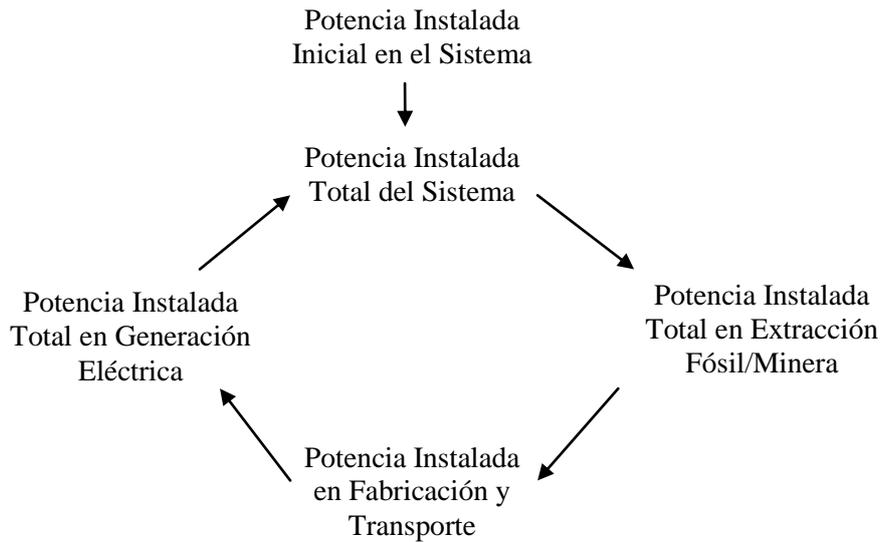


Figura 1. Ciclo de vida de un Sistema según los distintos sectores.

Entre las dificultades de esta metodología está la introducción de análisis flujos monetarios que distorsiona la tasa obtenida, dificulta la capacidad de independizar el resultado respecto a otros ámbitos económicos y referirlo a un estándar que permita la comparación entre distintas fuentes renovables, esto es: nuclear vs solar, eólica, etc. Hay subjetividad en la monetarización del impacto ambiental por efecto invernadero a causa de las emisiones por dióxido de carbono y del metano (gases referidos como Equivalentes en CO₂). Existe una débil consideración de los Costos Económicos de Calidad Eléctrica/Ambiental en los planes de expansión y explotación, sobre la base de atributos que carecen de valoración económica directa, por no existir un mercado asociado a los mismos (Cordero *et al.*, 2011).

Además, se impide la penetración competitiva de la generación renovable en la oferta de energía eléctrica a causa de los elevados costos de producción y, adicionalmente, no se reconocen los costos de agotamiento de las fuentes no renovables. Por lo tanto este análisis llevaría a conclusiones que desechen la posibilidad de implementar alternativas que mitiguen las emisiones, incentivando la búsqueda continua de innovaciones tecnológicas (Schweickardt & Giménez, 2012).

También se puede agregar, que los países con bajo desarrollo en materia de energía renovable, se verían imposibilitados de implementar estas soluciones, debido a una rentabilidad inaceptable. La renovación tecnológica requerida en este caso es alta, y un valor bajo de EROI disminuye el incentivo y produce incertidumbre, dificultando las inversiones en materia tecnológica.

3.3. Estimación de la TRE por análisis de sistemas dinámicos(ADS)

Aunque un análisis económico puede ser importante para evaluar la rentabilidad del sistema, la EROI debe obtenerse por medio de métodos de mensura energética (GVA) o (GWh), con el fin de evitar los inconvenientes mencionados. La herramienta VENSIM® permite establecer relaciones entre las distintas variables, con el fin de obtener el diagrama causal del modelo dinámico a analizar, como el presentado en la Fig. 2. Esto permite hacer diagramas de flujo, según las ecuaciones, funciones analíticas y gráficas que los gobiernan.

En este contexto, se puede realizar una simulación a grandes rasgos con el VENSIM®, considerando cuanto invierte el sistema sin la fuente renovable $\sum En_{i1}$, y cuanto invierte con ella $\sum En_{i2}$. Análogamente, se trabaja con la energía generada durante los escenarios considerados $\sum En_{g1}$ y $\sum En_{g2}$ para el recurso en cuestión. De esta manera, se elimina el error en forma considerable diferenciando la energía latente en el sistema, respecto de la que se invierte en producir la fuente renovable.

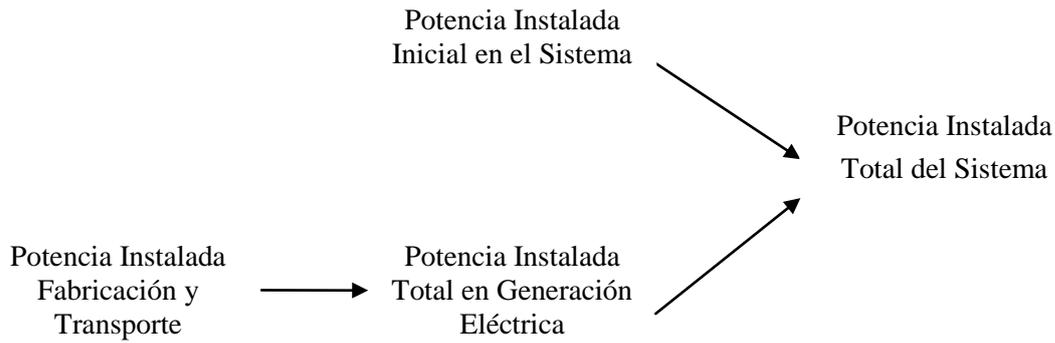


Figura 2. Árbol de causas del modelo propuesto.

$$EROI = \frac{\Delta En_{GR}}{\Delta En_{Inv}} = \frac{\sum En_{g2} - \sum En_{g1}}{\sum En_{i2} - \sum En_{i1}} \quad (3)$$

La mayor ventaja de trabajar con flujos de energía/potencia, es que se puede conocer el ahorro energético obtenido, con la consecuente disminución de emisiones. Al implementarse esta metodología, en un esquema de regulación por incentivos, se pueden establecer las sanciones que deben ser aplicadas por el Ente Regulador ante el incumplimiento de la empresa distribuidora en concepto de Eficiencia Energética.

4. APLICACIÓN DEL SOFTWARE VENSIM® PARA EL ADS

Se plantean dos escenarios, un primer escenario considerando la actual asignación del despacho de generadores según las distintas fuentes de generación, y el segundo, considerando un aumento gradual y/o brusco en la matriz energética de generadores renovables. Se mantuvieron constantes las tendencias en la producción de energía hidráulica y nuclear, y se observa una disminución en la producción de generación a base de recursos fósiles implicando una mitigación en las emisiones de CO₂ y un menor impacto ambiental.

Los factores más influyentes en la demanda industrial fueron: la extracción, procesamiento de minerales y combustibles fósiles, fabricación y transporte, excluyendo del análisis la industria ganadera, agropecuaria y textil.

Definición de variable independiente:

n Número de mes correspondiente (meses)

Definición de variables de estado del sistema:

Pi_s Potencia instalada total del sistema analizado

Pi_g Potencia instalada total del sector de generación (GVA)

Pi_{gf} Potencia instalada total de generación fósil (GVA)

Pi_{gn} Potencia instalada total de generación nuclear (GVA)

Pi_{gh} Potencia instalada total de generación fósil (GVA)

Pi_{gr} Potencia instalada total de generación renovable (GVA)

Pi_i Potencia instalada total de sector industrial (GVA)

Pi_m Potencia instalada total en extracción minera (GVA)

Pi_{ef} Potencia instalada total en extracción fósil (GVA)

Pi_{tr} Potencia instalada total en transporte (GVA)

P_g Potencia media generada total de generación (GVA)

P_{gf} Potencia media generada total de generación fósil (GVA)

P_{gn} Potencia media generada total de generación nuclear (GVA)

P_{gh} Potencia media generada total de generación hidráulica (GVA)

P_{gr} Potencia media generada total de generación renovable (GVA)

P_i Potencia media demandada total industrial (GVA)

P_{fa} Potencia demandada total en fabricación (GVA)

P_m Potencia demandada total en extracción minera (GVA)

P_{ef} Potencia demandada total en extracción fósil (GVA)

P_{tr} Potencia demandada total en transporte automotor (GVA)

Las variables auxiliares de control mayormente usadas son las siguientes:

FU_{Gi} Factor de utilización del sector de generación i

FU_{Di} Factor de utilización del sector de demanda j

Variables auxiliares de asignación:

$\%A_{Gi}$ Factor de asignación del sector de generación i

$\%A_{Di}$ Factor de asignación del sector de demanda j

Otras variables auxiliares:

$\%Cr$ Porcentaje de crecimiento de la potencia instalada

Los factores de utilización para los rubros de generación y demanda son:

$$FU_{Gi} = 1 - \frac{\sum P_{gj}}{\sum P_{ij}} \quad (4)$$

$$FU_{Di} = 1 - \frac{\sum P_j}{\sum P_{ij}} \quad (5)$$

Si el factor de utilización es positivo, tenemos una capacidad ociosa, que si es elevada, repercute en el deterioro de los equipos e incremento de las emisiones al momento de la puesta en marcha. En caso contrario, habrá una sobrecarga produciendo un envejecimiento prematuro de los equipos, y disminución de la vida útil. Ambos efectos repercuten en un incremento en la ΔE_{Inv} , con sus correspondientes gastos energéticos, en términos de mantenimiento y renovación de equipos que incrementan los gastos energéticos.

Siguiendo este razonamiento, tiene sentido traducir todos los procesos en energía eléctrica (GWh), o en su defecto potencia eléctrica media (GVA), que es en definitiva lo que se manipula y aprovechada.

Potencia instalada del sistema:

$$P_{is} = P_{ise} + P_{ii} \quad (6)$$

La potencia instalada del sistema eléctrico P_{ise} en (6) corresponde a suma de las etapas de Generación, Transmisión y Distribución, para evitar confusión no se escribe la ecuación correspondiente a esta suma.

Potencia instalada en generación del sistema:

$$P_{ig} = P_{igf} + P_{ign} + P_{igh} + P_{igr} \quad (7)$$

Potencia instalada de la demanda industrial:

$$P_{ii} = P_{ief} + P_{im} + P_{ief} + P_{itr} \quad (8)$$

Potencia generada del sistema según sector:

$$P_g = P_{gf} + P_{gn} + P_{gh} + P_{gr} \quad (9)$$

Potencia demandada industrial:

$$P_i = P_{fa} + P_m + P_{ef} + P_{tr} \quad (10)$$

Analizando la repartición en la capacidad instalada (8) y de la demanda (10), se puede tener una idea del nivel de desarrollo del sistema que influye en la capacidad de respuesta ante incrementos en

la demanda a largo plazo. A mayor desarrollo, mayor será la base tecnológica para construir una mayor cantidad de generadores renovables, en caso contrario se incrementan los gastos energéticos ocasionados por transporte. El nivel de desarrollo en investigación es determinante ya que avances tecnológicos pueden reducir el número de etapas intermedias para producir un insumo intermedio, reemplazo de materiales manipulables con mayor facilidad y por lo tanto EROI será mayor.

Un aumento en la producción de fuentes renovables (7) y (9) supone un impacto en los sectores involucrados (8), cuyos resultados serán afectados por el nivel de desarrollo en la tecnología de la generación renovable de interés, ya que se requiere construir la base tecnológica o un aumento drástico en los gastos de transporte.

Para la Potencia instalada del sistema, se realizó un ajuste exponencial, considerando la siguiente tendencia:

$$P_{i_s}^{[k+1]} = P_{i_s}^{[k]} * (1 + \%Cr)^n \quad (11)$$

Haciendo el mismo ajuste para la potencia de demanda residencial:

$$P_{re}^{[k+1]} = P_{re}^{[k]} * (1 + \%Cr_e)^n \quad (12)$$

donde $[k]$ es el mes analizado correspondiente y $\%Cr_e$ es un crecimiento estimado, que podría ser un 10 % anual. La tasa de crecimiento de (11) $\%Cr$ depende de la proyección de la demanda total actual y se puede obtener haciendo una anticipación aproximada:

$$\%Cr = \%Cr_e + k1 * FU_{Gi} + k2 * FU_{Gi} \quad (13)$$

donde $k1$ y $k2$ son constantes de ajuste. La Demanda Eléctrica Total del sistema se expresa como:

$$P_{t_s} = P_i + P_{re} \quad (14)$$

Si bien las pérdidas dependen cuadráticamente de la potencia circundante en las líneas, configuración del sistema eléctrico y aparamenta eléctrica instalada, se la puede aproximar de la siguiente manera:

$$P_p = 0.1 * P_{t_s} \quad (15)$$

Entonces la Potencia Generada será:

$$P_g = P_{t_s} + P_p \quad (16)$$

Analizando dos escenarios, el primero con la actual generación de energía renovable y el segundo con un aumento porcentual, se obtiene la TRE a partir de las ecuaciones (3), (7) y (15):

$$EROI = \frac{\Delta E_{n_{GR}}}{\Delta E_{n_{Inv}}} = \frac{P_{gr2} - P_{gr1}}{P_{g2} - P_{g1}} \quad (17)$$

Uno de los efectos producidos por la anticipación es introducir oscilaciones indeseadas en la TRE estimada, incrementándose según el ajuste en (12) e incluso haciendo inestable al sistema. Con el fin de evitar dichas oscilaciones se recomiendan graduales en la producción de energías renovables y precaución en la anticipación (Massoud, 2002).

5. CONCLUSIONES

El trabajo propuesto presentó algunas recomendaciones para el estudio de la TRE, con el fin de conocer el impacto producido por una implementación a gran escala de generación a base de recursos renovables en términos de la sustentabilidad Energética/Ambiental, y la búsqueda continua de la renovación tecnológica.

El método del ACV es adecuado para observar los efectos ambientales de cada materia prima en la cadena de producción, que en este caso son las emisiones de CO₂. Sin embargo, el cálculo de la tasa debe ser realizado en base a flujos de energía o potencia y no en base a flujos monetarios, con el fin de evitar subjetividad en los criterios de medición, con la consecuente pérdida de estandarización y capacidad de comparación en distintos ámbitos económicos. Por lo tanto, la TRE constituye un índice

de carácter técnico/energético y no económico/financiero. El estudio por medio de análisis de sistemas dinámicos es adecuado porque permite interpretar los resultados y realizar las debidas correcciones y por lo tanto, tiene un potencial enorme en este campo. Se agrega que es de carácter urgente realizar estudios comparativos relacionados a la energía nuclear, único potencial reemplazante de los combustibles fósiles para abastecer la demanda actual, en caso de un colapso energético.

Más allá de que el objetivo buscado es impulsar la inversión pública, la implementación de políticas de estado para realizar una transición hacia las FPGR tiene un efecto indirecto sobre la inversión privada. Esto implica la búsqueda continua de innovación y mejoras tecnológicas que permitan aumentar la Eficiencia Energética de todo el sistema, resultando en el proceso una reducción de los costos energéticos, productivos y de mantenimiento. Las mejoras pueden estar relacionadas a la reducción de etapas intermedias, producción local de la materia prima producida, correcta asignación de la capacidad ociosa, etc., la TRE puede ser un buen complemento en la evaluación de un proyecto, que puede ser complementado con otros índices económicos y ambientales para la evaluación del mismo.

Entre los temas a abordar se encuentra la eficiente utilización de los recursos, con el fin de evitar excesivas sobrecargas/capacidad ociosa del sistema, problema que puede ser solucionado con métodos de pronóstico eficientes, como una red neuronal o un sistema adaptativo inteligente. Se debe incentivar la investigación en este campo, resaltando las mejoras obtenidas, que sobresalen al análisis económico y aportan competitividad.

AGRADECIMIENTOS

Los Autores agradecen la colaboración de la Universidad Tecnológica Nacional de la Facultad Regional de Concepción del Uruguay por la proporción de material de estudio y publicaciones realizadas. A su vez, se agradece el sustento económico realizado por la misma UTN y el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas a los miembros del grupo, sin los cuales no hubiera sido posible realizar este proyecto. Agradecemos a nuestros familiares por el apoyo recibido, entendiendo el esfuerzo y trabajo realizado para que estemos aquí.

REFERENCIAS

- Cordero, J.F., S. Astudillo, J. Delgado, O. Amón, X. Carpio, 2011. Análisis de los actores que influyen el emprendimiento y la sostenibilidad de las empresas del área urbana de la Ciudad de Cuenca, Ecuador. *Revista MASKANA*, 2(2), 27-38.
- Massoud, A., 2002. Restructuring the electric enterprise: simulating the evolution of the electric power industry with intelligent adaptative agents. Faruqui, A., K. Eakin (Eds.), Chapter 3 in *Market Analysis and Resource Management*. Kluwer Publisher, 15 pp. Disponible en <http://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/SEPIA.EPRI.pdf>.
- Murphy D. J., C.A.S. Hall, 2011. Order from chaos: A preliminary protocol for determining the EROI of fuels. *Sustainability*, 3, 1888-1907. Disponible en <http://www.mpd.com/journal/sustainability>.
- Schweickardt, G., J.M. Giménez, 2012. Un modelo de incentivos para las fuentes primarias de energía renovable por análisis envolvente de datos. Alteración de los cargos de acceso de los generadores en un sistema de transmisión eléctrica aplicando una función virtual de producción. *Revista de la Escuela de Perfeccionamiento en Investigación Operativa*, 33, 158-180.
- Schweickardt, G., V. Miranda, 2008. Optimización dinámica difusa con nivel de riesgo acotado. Aplicación en la planificación y control regulatorio de sistemas de distribución de energía eléctrica. Parte 1: El modelo. *Revista de la Escuela de Perfeccionamiento en Investigación Operativa*, 30, 121-133.

Schweickardt, G., V. Miranda, J.M. Giménez, 2012. Control de la adaptación económica en sistemas de distribución de energía eléctrica mediante un modelo posibilístico de optimización dinámica: Parte 2: Modelo de control de la desadaptación dinámica del sistema y estudio de caso. *Revista de la Escuela de Perfeccionamiento en Investigación Operativa*, 33, 112-134.

Wacker, G., R. Billiton, J. Oteng-Adjei, P. Kos, 1990. *Determination of reliability worth for power system design applications*. Austria, 10th PSCC.