

Nueva metodología para medir el rendimiento energético

Los desarrollos en fuentes de energía no convencionales han dado origen a métodos novedosos para la medición de la eficiencia de los sistemas de conversión de energía. Uno de los más conocidos es EROEI. Este artículo propone una nueva metodología de medición de la eficiencia de un sistema de conversión de energía: eGAIN.

Luis M. Buresti
lmb.tech.consultancy@gmail.com

Glosario de siglas

- » BTU: *British Thermal Unit*, 'unidad térmica británica'
- » eGAIN: *Gain of Energy*, 'ganancia de energía'
- » EROEI: *Energy Return on Energy Investment*, 'retorno de energía sobre inversión de energía'
- » eYIELD: *Yield of Energy*, 'rendimiento de energía'
- » GNL: gas natural licuado
- » SCE: sistema de conversión de energía

URL estable: <https://www.editores.com.ar/node/8611>

EROEI y los sistemas de conversión de energía

En 1981, un grupo de investigadores introdujo el concepto de EROEI —por las siglas en inglés de retorno de la energía sobre inversión de la energía— con el propósito de medir en términos realistas la eficiencia de un sistema de conversión de energía (SCE) a lo largo de toda su vida útil. La nueva metodología de medición fue aceptada rápidamente, ya que su cálculo incluye todos los factores involucrados en una instalación real sobre una base de tiempo extendida.

El concepto expone la principal condición con la que opera todo SCE: para producir energía siempre se requiere energía.

Una sociedad, para ser viable a largo plazo, debería operar con un EROEI mayor a uno, sin embargo, este requisito conduce, en algunos casos, a sesgos de cálculo, en particular cuando se analizan los SCE destinados a la producción de energías secundarias.

En este punto, debemos tener en cuenta a la Segunda Ley de la Termodinámica la cual explicita que un SCE siempre va a operar con una eficiencia menor al 100%. Entonces, parecería razonable conciliar la metodología de cálculo del EROEI clásico con criterios de naturaleza termodinámica a los efectos de que esta métrica nos permita hacer comparaciones realistas entre los diversos SCE aun en los casos que puedan exhibir EROEI menor a uno.

Parecería razonable conciliar la metodología de cálculo del EROEI clásico con criterios de naturaleza termodinámica



ERoEI: una definición simple, un cálculo no tan simple

El indicador ERoEI es un número adimensional que se aplica a todo SCE y que está definido por la siguiente expresión:

(1) $ERoEI = E_{reg}/E_{inv}$ —energía entregada sobre energía invertida o requerida para entregar esa energía—

El ERoEI puede ser interpretado como la ganancia de energía que se obtiene al operar un determinado SCE, siempre recordando que para generar energía se requiere energía.

El cálculo del numerador es relativamente sencillo e involucra el total de la energía producida por el SCE a lo largo de su vida útil. Dentro de este término se debe incluir el contenido energético de todos los subproductos comercializables y el efecto de toda tasa de decaimiento o crecimiento de producción que pudiera existir.

El denominador, por su parte, mide la cantidad total de energía requerida para materializar

y operar el sistema de conversión. Esto significa que dentro del denominador está incluida la energía necesaria para la fabricación del equipamiento de proceso y de las instalaciones fijas, la energía requerida para la operación, mantenimiento y administración del SCE y, por último, al fin de la vida útil, la energía requerida para el desmontaje de las instalaciones y reparación del impacto ambiental.

La estimación de las energías requeridas para la construcción y desmantelamiento de las instalaciones muchas veces presenta una cierta dificultad de cálculo, y la variación de los valores obtenidos por los distintos estudios resultan en una amplia dispersión de resultados de los ERoEI correspondientes a sistemas que operan con igual tecnología.

Adicionalmente se debe tener en cuenta que muchas veces el valor calculado de energía invertida está afectado por criterios meramente políticos, ya que subestimar este valor resulta en un mayor ERoEI y, por lo tanto, en una sobreponderación de la tecnología que se está analizando.

Estas circunstancias hacen que, en ciertas ocasiones, y dependiendo de los criterios empleados, los valores de EROEI calculados para una misma tecnología de conversión de energía tengan una dispersión considerable, y es frecuente que puedan diferir por un factor de diez veces e incluso más.

eGAIN: factor de ganancia de energía

Se hace imperioso establecer un mecanismo estandarizado de cálculo que, entre otras cosas, incluya los efectos de las pérdidas de energía de modo tal que el índice resultante sea representativo de la eficiencia real con la cual está operando un determinado SCE.

En este artículo, tomo el concepto de "ganancia de energía" junto a una nomenclatura específica y una propuesta de cálculo estandarizado asociado a la representación gráfica de los SCE considerados.

Si se considera un block genérico (ver figura 1), se define el factor eGAIN de la siguiente manera:

$$(2) eGAIN_{A \rightarrow B} = E_r / E_i$$

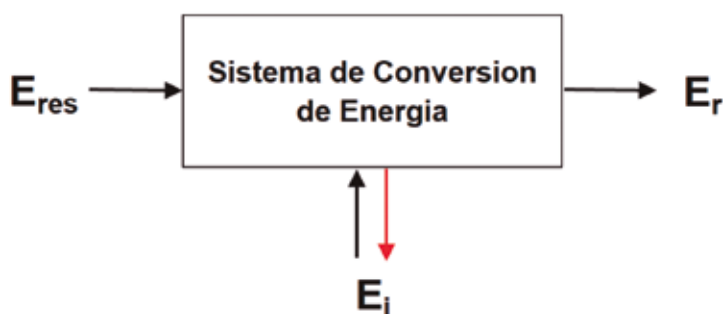
donde:

- » "n": base de tiempo considerada para el cálculo del ciclo de vida de las instalaciones, medida en años.
- » "a": alcance del cálculo del factor eGAIN. Puede ser "t" (total) o "p" (parcial), según incluya o no todos los términos de E_r o de E_i .
- » "A → B": límites físicos del sistema considerado. Para una definición clara, es conveniente emplear una representación gráfica similar a los esquemas de blocks multietapa, y con seis etapas preferentemente. También es importante incluir la localización geográfica o las condiciones ambientales prevalecientes.

Definición ampliada de los términos "E_r" y "E_i"

La energía efectiva producida por el SCE se determina mediante la siguiente fórmula:

$$(3) E_r = E_{mp} + E_{bp} + E_{cg}$$



E_{res} = Energía contenida en el recurso disponible. [15]

E_r = Energía efectivamente producida por el SCE.

E_i = Valor Absoluto de la Energía Requerida para desarrollo y operación.

Figura 1. E_{res}, energía contenida en el recurso disponible; E_r, energía efectivamente producida por el SCE; E_i, valor absoluto de la energía requerida para desarrollo y operación.

donde:

- » " E_{mp} ": energía contenida en la producción principal que se obtiene mediante el SCE considerado.
- » " E_{bp} ": energía contenida en todos los productos secundarios comercializables generados por el proceso de conversión.
- » " E_{cg} ": energía (térmica, en general) que se puede recuperar del SCE.

Por su parte, la energía ingresada al sistema puede ser ampliada como sigue:

$$(4) E_i = E_{op} + E_{dl} + E_{eq} + E_{sm} + E_{dr} + E_{ee}$$

donde:

- » " E_{op} ": energía requerida para accionar a todos los equipos de proceso (bombas, hornos, compresores, servicios generales, control, etc.) necesarios para la operación del SCE.
- » " E_{dl} ": energía perdida o disipada directamente al ambiente.
- » " E_{eq} ": energía necesaria para fabricar los equipos físicos y las instalaciones fijas que se requieren para implementar el SCE.
- » " E_{sm} ": energía requerida para la administración, supervisión y mantenimiento del SCE.
- » " E_{dr} ": energía que se necesita para desmantelar y efectuar la remediación medioambiental de las áreas afectadas al SCE cuando cesen sus operaciones.
- » " E_{ee} ": energía requerida como consecuencia de eventos extraordinarios que eventualmente puedan ocurrir durante el plazo considerado de operación del SCE.

eYIELD: rendimiento de energía

A partir de la definición de eGAIN, se puede derivar la siguiente expresión:

$$(5) eYIELD = eGAIN / (1 + eGAIN)$$

Cuando el SCE se reduce a alguna etapa simple, se obtiene:

$$(6) eYIELD_{e'o} \approx \eta_{th}$$

ya que típicamente se verifica E_{op} menor que E_{dl} .

Unidades de medición

eGAIN es un indicador adimensional pero los términos que se requieren su cálculo están definidos en unidades de energía.

Muchos de los análisis clásicos emplean el joule, pero todavía es posible encontrar estudios de eficiencia energética que emplean "unidades antiguas" (BTU, kilocalorías, toneladas de petróleo equivalente, etc.). Esta multiplicidad de unidades dificulta la comparación entre los distintos trabajos que evalúan la eficiencia de un SCE.

Se propone utilizar exclusivamente el watt-hora y sus múltiplos para las mediciones de energía

Teniendo en cuenta que la "electrificación universal" parece ser una tendencia muy poderosa y que el joule realmente representa una cantidad muy pequeña, en este artículo se propone utilizar exclusivamente el watt-hora y sus múltiplos para las mediciones de energía.

La estandarización de las unidades de medición tiene una ventaja adicional: permite comparar con facilidad los costos de los diversos tipos de energía.

Cadena de conversión	Límites del sistema (A → B)	Base de análisis	eGAIN_t,0	eGAIN_t,20	Análisis técnico
Producción integrada de combustibles fósiles	Pozo petrolero → Estación de servicio	Refinería 10.000 m ³ /día	5,6	4,5	La refinación concentra el 59% de los consumos operativos (9,9 GWh/d).
Generación eléctrica por ciclo combinado	Yacimiento de gas → Red de Distribución	Central 1.000 MWe	0,82	0,78	Aunque la central exhiba 58% de eficiencia, el sistema es un "destructor neto de energía primaria" para entregar un vector secundario de alto valor (electricidad).
Cadena Integrada de GNL	Yacimiento de gas → Regasificación/ Red	15 MSm ³ /día (2,8 Mton/a GNL)	4,4	3,9	La licuefacción y el transporte criogénico reducen el eGAIN frente a un sistema de gasoducto convencional nacional (cuyo eGAIN típico ronda 11,2).
Procesamiento de soja a biodiésel	Campo agrícola → Transporte Ultramar	Molienda de 10.000 ha	2,1	1,7	El subproducto harina de soja aporta casi tanta energía metabólica aprovechable (69,3 GWh/a) como el biocombustible líquido (74,7 GWh/a).

Tabla 1

Comparativa de casos reales en la matriz energética

La aplicación de esta metodología sobre cadenas de valor típicas divididas en seis etapas revela cifras clave para el análisis de proyectos (ver tabla 1).

Conclusión y utilidad para la ingeniería de proyectos

- » Evaluación integral de tecnologías: eGAIN permite comparar alternativas renovables, fósiles y de transición bajo una misma escala normalizada en watt-hora, evitando discusiones metodológicas dispersas.
- » Diagnóstico de eficiencia en planta: la partición modular en bloques facilita identificar qué eslabón del proceso penaliza la rentabilidad energética global, orientando las inversiones en electrificación de accionamientos, variadores de velocidad, cogeneración o recuperación de calor residual.
- » Herramienta para auditorías y planes de descarbonización: provee un sustento cuantitativo directo para proyectos que buscan certificar desempeño energético o evaluar la huella de ciclo de vida en activos industriales. ■■