



Producción energética en un modelo para gimnasios colombianos

The energy production in a model for Colombian gyms

Yennifer D. Benítez R.¹

Juan B. González H.²

Javier Rosero G.³

Fecha de envío: julio 2012

Fecha de recepción: julio 2012

Fecha de aceptación: septiembre 2013

Resumen:

La generación distribuida (GD), conectada, en baja tensión y de pequeño porte, basada en energías renovables, es un fenómeno de creciente investigación, desarrollo y penetración. Este artículo presenta un modelo de generación de energía conjunta desde varias máquinas, como alternativa para ser implementada en gimnasios. La investigación se basa en el estudio de los procesos, desde la fuente primaria y el generador y la cuantificación de las cantidades de energía que son capaces de producir bicicletas de *spinning* y elípticas en un periodo de tiempo. Para ello se tomaron como base dos gimnasios colombianos y se evaluó técnicamente la energía cinética generada, para determinar la máquina más eficiente y la cantidad de energía que se puede producir a partir de ella. Luego del diseño se realizó una simulación con los parámetros definidos. De esta manera, como resultado, se obtuvieron las curvas de energía generada versus la energía consumida. Finalmente, se realizó un análisis de factibilidad económica y técnica en el *software* libre RETScreen International V.4.0.

Palabras clave:

Alternadores, fuentes de alimentación, generación de potencia, generación distribuida de potencia, convertidores de frecuencia, motores eléctricos.

Abstract:

Distributed generation (DG), connected at low voltage and small size, based on renew-

able energy is a phenomenon of increasing research, development and penetration. This paper presents a model of joint power generation, from multiple machines as an alternative to be implemented in gyms. The research is based on the study of processes from the primary source and the generator, and the quantification of the amounts of energy that are capable of producing different types of

1 Ingeniera electricista, Universidad Nacional de Colombia (Colombia). correo electrónico: yd-benitezr@unal.edu.co

2 Ingeniera electricista, Universidad Nacional de Colombia (Colombia). Correo electrónico: jbgonzalezh@unal.edu.co

3 Ingeniero electricista, Universidad del Valle (Colombia). Ph.D. en Ingeniería Electrónica, Universidad Politécnica de Cataluña (España). Director del grupo de investigación "Electrical Machines & Drives" (EM&D), Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. correo electrónico: jarosero@unal.edu.co

spinning bikes and elliptical in a period of time. For this, taken two Colombian gyms as a study case, and evaluated technically the kinetic energy generated in order to determine the most efficient machine and the amount of energy that can be produced from it. After the design, a simulation with the parameters already defined were run. In that way, as a result, generation curves as a function of time, were obtained. Finally, an analysis of economic and technical feasibility were made in the free RETScreen International software V.4.0.

Keywords:

Alternators, energy sources, power generation, distributed power generation, drives, electric motors

1. Introducción

Mientras que en el mundo se siguen quemando los combustibles fósiles, lo que implica un directo deterioro del medio ambiente, las llamadas energías limpias y renovables en forma distribuida, cada vez son mejores y más impactantes en beneficio tanto de la naturaleza como de la sociedad en general.

Adicionalmente, con el paso de la auditoría energética a la gestión integral –con la norma ISO 50001:2011–, se establece un marco de referencia y los requisitos para un sistema de gestión de la energía [1] que permite incrementar la eficiencia energética, reducir los costos y mejorar el rendimiento energético. La generación distribuida adquiere aún más importancia y se convierte en el factor principal en el escenario mundial, ya que con este tipo de generación se incrementa el aprovechamiento de energías renovables o excedentarias, lo que implica disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero, convirtiéndose en una solución energéti-

ca sostenible, cumpliendo así con la norma referida.

La generación distribuida, conectada en baja tensión y de pequeño porte, conocida también como microgeneración y basada en particular en energías renovables, es un fenómeno de creciente desarrollo y penetración. Con el apoyo de algunos gobiernos se ha impulsado la instalación de sistemas de generación de baja potencia, que forman sistemas aislados o interconectados con la red eléctrica, dando lugar a los denominados sistemas de generación distribuida a pequeña escala y las microrredes, que permiten incrementar la confiabilidad y eficiencia del sistema al reducir las pérdidas en las redes de transmisión y distribución.

Estas redes mejoran la calidad del servicio, cumpliendo así con las reglamentaciones. Por otra parte, obtienen mayor control de energía reactiva y regulación de voltaje, disminuyen las inversiones en redes de transmisión y distribución, mejoran la adaptación a las variaciones de la demanda, aumentan la competencia –disminuyendo de esta manera el poder del mercado–, aseguran mayor flexibilidad, al disminuir la dependencia del sistema centralizado, y crean un sistema de respaldo al sistema en caso de fallas. Razones por las que se presentan como sistema eficiente y viable de generación eléctrica.

En Estados Unidos y Europa, la generación distribuida se ha convertido en una solución viable, técnica y económicamente. Esta mejora la confiabilidad del suministro de energía y se convierte en una alternativa importante dentro del concepto de electricidad segura y de calidad. En la mayoría de estos países la generación distribuida participa con el 10% de la capacidad instalada. Incluso, en países como Holanda y Dinamarca ha llegado a ocupar un 30 o 40% de la capacidad total instalada [2].

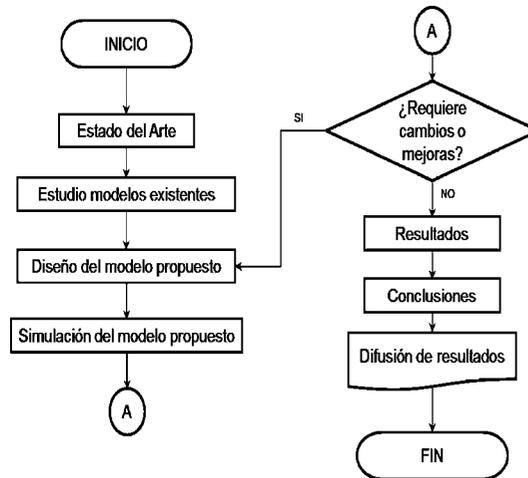
En el escenario colombiano, la generación distribuida es una realidad. “La Andi cuantifica, con base en una encuesta, que la autoproducción de energía eléctrica es de 773 MW, de los cuales 417 MW corresponden a autogeneración, 314 MW a cogeneración y 41 MW a respaldo en emergencias” [3]. Así, el aporte de la energía renovable al sistema eléctrico colombiano es más del 5% de la capacidad total instalada. Adicionalmente, Colombia tiene un gran potencial en la explotación de estos tipos de fuentes de energía [4], ya que:

- El potencial energético solar en promedio multianual, es de 4,5 kWh/m².
- Las densidades de energía eólica anual a 20 m de altura están entre 1 y 1,331 kW/m², y a 50 m entre 2,197 y 2,744 kW/m².
- Para la pequeña generación hidroeléctrica el potencial estimado es de 25 000 MW.
- El potencial anual de generación de biomasa es de 16 260 MWh.

Por otra parte, la generación de energía mediante el ejercicio —aprovechando los recursos disponibles del escenario: los centros de acondicionamiento físico (gimnasios)—, mediante la energía cinética que es suministrada a las máquinas por los usuarios, es una idea que ya se ha implementado a pequeña escala. Actualmente en Colombia esta energía se desaprovecha en estos centros de entrenamiento.

En algunos países hay proyectos implementados que aprovechan esta energía. Por ejemplo: en Panamá “Eco generador de baja revolución a pedal” 2008 [5]; en Portland, Estados Unidos, “Green Microgym” [6]; Nueva York, Estados Unidos “Sport Club”; en Copenhague, Dinamarca “Crowne Plaza Hotel” [7], entre otros. En la literatura disponible no se encuentra un estudio cuantitativo del poten-

Figura 1. Estructura de trabajo



cial energético de los gimnasios. Para suplir esa carencia, este artículo presenta un modelo de generación de energía en gimnasios, analizando detalladamente el proceso desde la fuente primaria y el generador, las cantidades de energía que son capaces de producir distintos tipos de gimnasio en un mes, hasta un análisis de factibilidad en caso de implementación. La figura 1 muestra la estructuración del trabajo realizado.

2. Teoría de generación de energía en GYM

En esta investigación no se midió directamente la potencia mecánica que las personas entregan en diez minutos de ejercicio. En cambio, se optó por un método aproximado. Este método se basa en un estudio de la School of Exercise, Biomedical and Health Sciences, Edith Cowan University, Joondalup, WA, Australia [8], donde se analiza la fuerza que las personas son capaces de entregar a la hora de hacer ejercicio. Como resultado se presenta una gráfica que relaciona la potencia que entrega la persona contra la velocidad de pedaleo en [rpm], como se muestra en la figura 2.

Para la simulación, el diseño de la unidad de modelo como elemento fundamental de este estudio, junto con las simulaciones de los gimnasios en casos base y propuesto, se utilizó el software Simpower Systems de Simulink® de MatLab®.

La cantidad de energía producida en diez minutos de ejercicio, ya sea en bicicleta, o en elíptica, es tomada como resultado de las simulaciones de la unidad de modelo (entiéndase unidad de modelo como la base de producción energética en un periodo de diez minutos), y es llevada a una función para determinar la operación en conjunto del gimnasio en un periodo de un mes. En dicha función se establecen parámetros básicos que corresponden a la operación del gimnasio, tales como: número de bicicletas para calentamiento cardiovascular, número de veces al día que se usan las bicicletas, número de elípticas, número de veces que se usan las elípticas al día, número de clases de *spinning* diaria y el correspondiente número de bicicletas usadas en la clase de *spinning*. Con las salidas de esta función se obtienen los resultados finales de este estudio.

3. Modelo de simulación

3.1. Unidad de modelo

La unidad de modelo se simula con base en una máquina eléctrica óptima para la operación en gimnasio. El tamaño y el ruido son dos factores influyentes para la selección de la máquina que se va a usar. La potencia nominal de la máquina se selecciona de acuerdo con la potencia máxima que se puede obtener con el pedaleo. La tensión de excitación corresponde a las condiciones nominales de trabajo de la máquina promedio, y en la simulación con la que

se obtiene mayor transferencia de potencia. Además, corresponde a una máquina real comercial adecuada, no solo por las condiciones eléctricas, sino también por condiciones de tamaño y espacio con el fin de colocarla cerca de una bicicleta o elíptica. Los parámetros de la máquina seleccionada son:

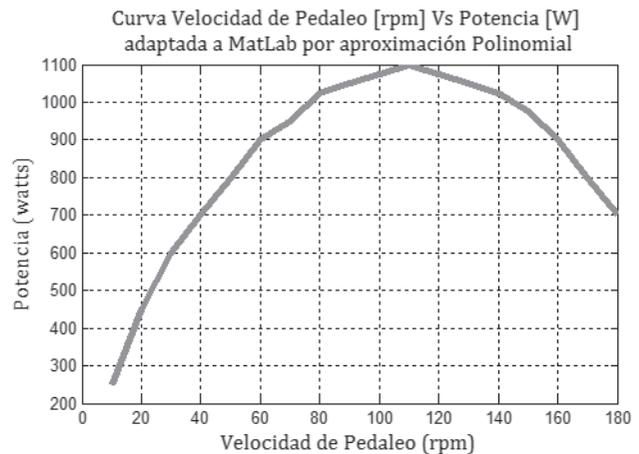
- Máquina sincrónica: 1.9 kW,
- Sistema de rectificación.
- Regulador de tensión.
- Voltaje nominal de 48 VDC.
- Corriente nominal de 39 A.

La figura 3 muestra el modelo diseñado. Este es conectado a una barra infinita, en lugar de ser conectado a una carga, con el fin de establecer la energía que es capaz de entregar la unidad de modelo.

3.2. Modelo en conjunto

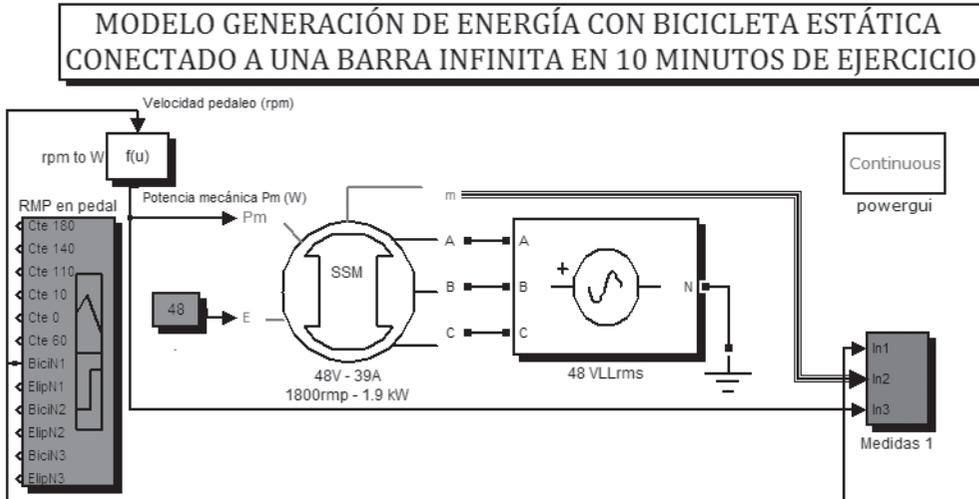
La simulación de la unidad de modelo consta de seis partes: bloque máquina síncrona, barra infinita, excitación, velocidad de pedaleo (entrada en rpm), cambio de velocidad de pedaleo a potencia mecánica y mediciones.

Figura 2. Gráfica potencia [W] vs. velocidad [rpm]



Fuente: [9]

Figura 3. Unidad de modelo simulada en el software Simpower Systems de Simulink® de MatLab®



Fuente: elaboración propia

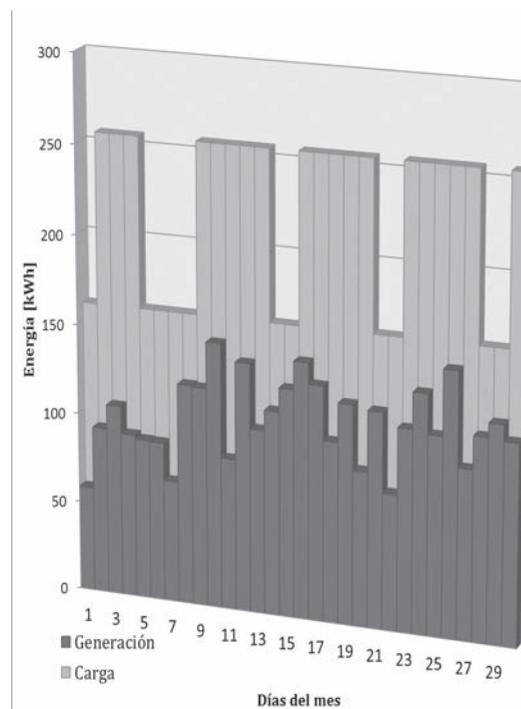
La unidad de modelo se simuló con once entradas de velocidad de pedaleo diferentes. Cinco de ellas son velocidades constantes de operación, donde en la nomenclatura el número asociado indica las rpm; por ejemplo: “Cte180” significa que se pedalea a 180 rpm constantes. Las otras seis corresponden a pedaleo medido en la máquina directamente en tres niveles de ejercicio (suave, medio y fuerte). Para la nomenclatura, las primeras cuatro letras indican el tipo de máquina y las otras dos el nivel de pedaleo, donde 1 es el más lento y 3 el más rápido.

A partir de la figura 2 se simulan en Matlab® diferentes entradas al modelo, obteniendo la energía generada para cada una, como se observa en la tabla 1.

4. Análisis de resultados

A continuación se muestra la simulación de perfiles de generación de múltiples bicicle-

Figura 4. Energía generada y perfil de consumo en un mes de operación del gimnasio real



tas en gimnasios de tamaño: mediano, promedio y grande. Para un gimnasio como caso real se simula la situación de un gimnasio grande, como lo indica la tabla 2.

Por medio de visitas al gimnasio se recogieron los datos de operación del establecimiento. Con estos datos se establecieron los parámetros para la simulación de este caso en particular. Además, el perfil de consumo diario se obtuvo identificando cada una de las cargas existentes con su respectivo uso horario. En [4] se presenta la energía diaria generada durante los treinta días del mes junto con el perfil de consumo diario en kWh.

Para todo el mes, en este caso se generaron 3,286 kWh, y tomando el precio del kWh a 0,02 dólares (siendo este el precio promedio del kWh para el sector comercial), en un mes el gimnasio estaría produciendo lo correspondiente a 77,8 dólares mensuales.

Gimnasio propuesto: se simula la situación de un gimnasio grande. Sus condiciones se muestran en la tabla 3.

La figura 5 muestra la energía generada diariamente en kWh. Para todo el mes, en este caso se generaron 7,947 kWh, y asumiendo un precio de kWh de 0,02 dólares (sector co-

Tabla 1. Energía generada en diez minutos de calentamiento a diferentes niveles de pedaleo

Modo de operación	Velocidad promedio (rpm)	Energía generada [Wh]
Cte80 Rutina ideal a 180 rpm	180	116,4
Cte 140 Rutina ideal a 140 rpm	140	170,0
Cte 110 Rutina ideal a 110 rpm	110	181,9
Cte 60 Rutina ideal a 60 rpm	60	148,1
Cte 10 Rutina ideal a 10 rpm	10	47,0
BiciN1 Rutina a baja velocidad	45	128,9
ElipN1 Rutina a baja velocidad	45	120,7
BiciN2 Rutina a media velocidad	80	165,8
ElipN2 Rutina a media velocidad	80	172,4
BiciN3 Rutina a media velocidad	100	176,3
ElipN3 Rutina a alta velocidad	100	176,5

Tabla 2. Criterios de simulación gimnasio real

Criterios de simulación	Cantidad
Bicicletas (calentamiento)	11
Promedio uso bicicletas	24 veces
Elípticas	12
Promedio uso elípticas	24 veces
Clases diarias (una hora) de <i>spinning</i>	1,6
Bicicletas por clase de <i>spinning</i>	14

mercial), se estaría generando lo correspondiente a 185 dólares mensuales.

4.1. Análisis de factibilidad

El software gratuito de análisis de proyectos de energía limpia RETScreen International es ofrecido por el Gobierno de Canadá como parte de la estrategia de ese país para trabajar en un marco integral en la lucha contra el

Tabla 3. Criterios de simulación gimnasio propuesto

Criterios de simulación	Cantidad
Bicicletas (calentamiento)	15
Promedio uso bicicletas	32 veces
Elípticas	18
Promedio uso elípticas	26 veces
Clases diarias (una hora) de <i>spinning</i>	4
Bicicletas por clase de <i>spinning</i>	30

cambio climático y la reducción de la contaminación. Es una herramienta de comprobada eficacia que facilita el desarrollo de proyectos de energía limpia en todo el mundo, reduciendo considerablemente los costos tanto financieros como de tiempo asociados a la identificación y evaluación de proyectos energéticos potenciales, costos que surgen en las fases de estudios de prefactibilidad, factibilidad, desarrollo e ingeniería [10].

RETScreen permite a ingenieros, arquitectos y responsables económicos modelar y analizar todos los proyectos de energía limpia. Los que toman decisiones pueden llevar a cabo un análisis estándar de cinco pasos, incluyendo el análisis energético, el análisis de costos, el análisis de emisiones, el análisis financiero y el análisis de sensibilidad y riesgo.

Los modelos de proyecto de RETScreen abarcan todas las tecnologías e incluyen tanto las fuentes de energía limpia tradicionales como las no tradicionales, además de las fuentes y tecnologías de energía convencionales. Los modelos de proyectos incluyen: eficiencia energética (desde grandes instalaciones industriales hasta viviendas individuales), calefacción y enfriamiento (p. ej. biomasa, bombas de calor y calefacción

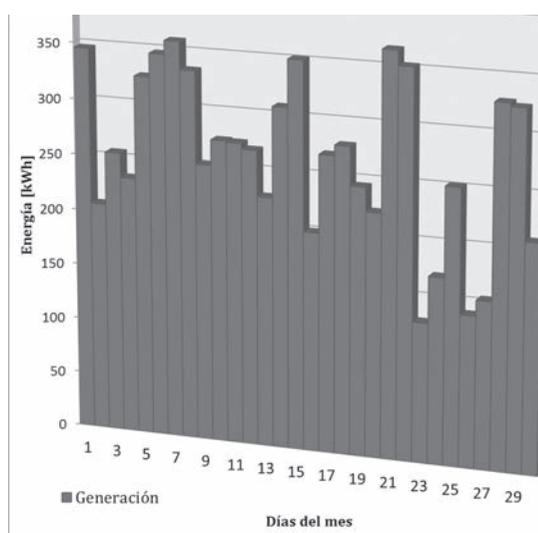
solar de aire/agua), energía (incluyendo energías renovables como solar, eólica, hidráulica, geotérmica, etc. y tecnologías convencionales como las turbinas de vapor/gas) y calor y energía combinados (o cogeneración).

A pesar de todas las opciones de análisis que ofrece RETScreen, para este estudio solo se realizaron el análisis energético y el análisis financiero, ya que la propuesta se centra en el proceso de producción de energía para un modelo de gimnasio grande con treinta máquinas.

Se inicia con la descripción de los datos básicos del análisis:

- **Tipo de proyecto:** de las diversas opciones que se muestran se selecciona generación de electricidad, que es la que corresponde a generación de energía eléctrica mediante la energía cinética de las bicicletas de *spinning* en los gimnasios.

Figura 5. Energía generada en un mes de operación del caso propuesto para un gimnasio grande



Fuente: elaboración propia

- **Tecnología:** como se observó en la simulación, la tecnología usada es un generador alternador, que no está entre las opciones, por lo que se selecciona otro para luego representarlo.
- **Tipo de red:** en este caso se debe escoger el tipo de red en el que se usaría el modelo. De las cinco opciones que se dan se selecciona “fuera de red” y se descarta “red aislada” porque el consumo se da en el mismo lugar de generación y no se utiliza la red de transporte ni distribución, por lo que se descarta la red central.
- **Condiciones de referencia:** seleccionando el país y la ciudad, el software se encarga de traer los datos meteorológicos que corresponden según la ubicación y que se usaran en el desarrollo del análisis que se requiera.

Luego se describe el sistema eléctrico de potencia base, que servirá como punto de referencia para evaluar el caso propuesto.

El sistema base escogido es un electrógeno, ya que sus características de análisis son similares al modelo propuesto usar un motor y no está conectado a la red de distribución. Su capacidad de generación es de 50 kW y su combustible es Diesel. Se le asigna el precio de combustible de 0,48 dólares por galón, ya que fue el precio promedio para el mes de mayo de 2012, cuando se realizó el análisis, el rendimiento calórico y el costo anual de operación y mantenimiento. Con esto se obtiene la tarifa del kWh y el costo total de electricidad, que para esta investigación fue de 170 y 1425 dólares, respectivamente. En la tabla 4 se definen los datos del caso propuesto.

Como cada máquina tiene una capacidad de 1,9 kW, y con la tensión de excitación la tras-

Tabla 4. Datos del caso propuesto

Criterio	Datos
Tipo de combustible	Definido por el usuario: energía cinética
Precio del combustible	0 pesos
Capacidad de generación	57 kW
Disponibilidad	100%
Rendimiento calórico	88 kJ

Tabla 5. Datos análisis financiero

Criterio	Datos
Tasa de inflación	3,5%
Tiempo de vida del proyecto	10 años
Relación de deuda	70%
Tasa de interés de la deuda	14,00%
Duración de la deuda	2 años

ferencia de potencia es máxima, y disponemos de 30 máquinas en el gimnasio propuesto, la capacidad de generación es de 57 kW, aproximadamente, con un ahorro de energía de 52%. Para el análisis financiero se asigna un costo inicial de 1765 dólares, ya que se debe instalar un generador-alternador para cada máquina, más los costos de instalación, que suman 2647 dólares. Otros datos requeridos se muestran en la tabla 5. En la figura 6 se muestra el flujo de caja respectivo.

Como se observa, hasta el segundo año el flujo de efectivo es negativo por cuanto se está pagando la inversión, pero a partir de allí se obtienen ganancias muy significativas. En el año 4, por ejemplo, el flujo de caja acumulado es de 3000 dólares, hasta llegar al año 10 con 13530

dólares, aproximadamente, tiempo en el que finaliza la vida útil de las máquinas. Con los anteriores resultados, el análisis muestra que el modelo es viable, técnica y económicamente.

Conclusiones

Para la sociedad y el planeta, cada día es más necesaria la generación de energía limpia y renovable, preferiblemente en forma distribuida.

Es posible generar energía eléctrica teniendo como fuente la potencia mecánica que las personas invierten en el ejercicio. Con la ayuda de una máquina sincrónica excitada a una adecuada tensión y con una velocidad de pedaleo que varía de 0 a 180 rpm, es posible generar una potencia de hasta 1100 W.

La operación en conjunto de varias máquinas funcionando en paralelo determina, junto con el perfil de uso de cada máquina y el número de clientes del gimnasio, la cantidad de energía que el establecimiento puede generar mensualmente. Los gimnasios pequeños (pocas máquinas, pocos usuarios sin clases de *spin-*

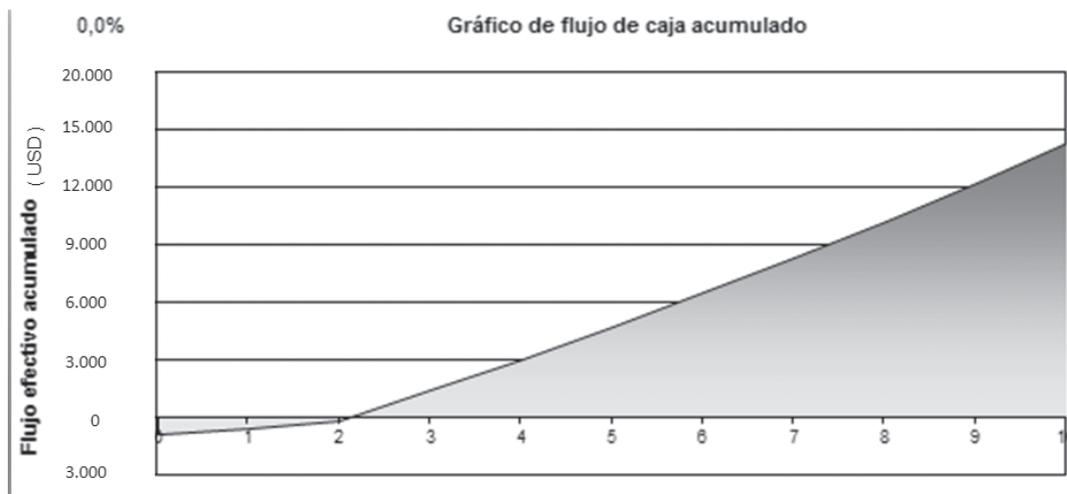
ning) logran generar mensualmente alrededor de 1565 kWh, en tanto que los gimnasios grandes (muchas máquinas, muchos usuarios, gran cantidad de clases de *spinning*) logran generar alrededor de 8000 kWh mensuales.

Esta investigación muestra que, técnicamente, es viable la producción de energía en gimnasios y que el modelo propuesto, aunque no supe toda la energía consumida, sí contribuye en gran medida a un ahorro tanto económico como energético, ya que partimos del uso de elementos que no necesitan estar conectados a la red para funcionar.

El software RETScreen International V.4 se sitúa entre los líderes del desarrollo de tecnologías de energías limpias, es un elemento esencial de análisis y contribuye al objetivo de lucha contra el cambio climático.

Mientras el mundo avanza hacia el desarrollo sostenible, cada persona puede apoyar con un proyecto innovador que permita el aprovechamiento de las energías limpias.

Figura 6. Flujo de caja acumulado del proyecto propuesto



Fuente: elaboración propia

La generación distribuida en gimnasios permite un cambio radical en la forma de generar y consumir energía a nivel local, tanto así que es posible llevar este concepto al campo residencial en general.

Reconocimientos

El modelo propuesto es un producto parcial de la investigación titulada “Evaluación técnica del proceso de producción de energía eléctrica en un modelo de generación distribuida para gimnasios en Colombia”, desarrollada por el grupo de Máquinas Eléctricas y Controladores, del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá.

Referencias

[1] ISO Energy Management, *Win the energy challenge with ISO 50001*.

- [2] A. I. Cadena, S. Botero, C. Táutica, L. Betancur y D. Vesga, *Regulación para incentivar las energías alternas y la generación distribuida en Colombia*, 2009.
- [3] Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), *La generación distribuida y su posible integración al sistema interconectado nacional*, 2009.
- [4] XM. Filial de ISA, *Informe de Gestión 2011: Capacidad efectiva neta del SIN a diciembre 31 de 2011*.
- [5] The Green Revolution [en línea], disponible: <http://www.egreen-revolution.com>, consultado: enero de 2012.
- [6] T. Gibson, “Turning sweat into watts”, *IEEE Spectrum*, vol. 48, no. 7, pp. 46-51, julio 2011.
- [7] Crowne Plaza Hotel [en línea], disponible: <http://www.buidaroo.com>, consultado: febrero 2012.
- [8] C. R. Abbiss, J. Peiffer y P. Laursen, “Optimal cadence selection during cycling”, *International SportMed Journal*, 2002.
- [9] Chris Abbiss, Jeremiah Peiffer y Paul Laursen, “Optimal cadence selection during cycling”, *International SportMed Journal*, vol. 10, no. 1, 2009.
- [10] RETScreen® International, Natural Resource Canada, *What is RETScreen*.