

Diseño de un sistema de generación de energía eléctrica a partir de bicicletas estáticas

Karl Von Drais, Thomas McCal

Resumen—En este trabajo de investigación se presenta el diseño de un sistema de generación de energía eléctrica basado en el aprovechamiento del trabajo realizado por tripulantes sobre bicicletas estáticas.

El sistema de generación contará de 18 unidades en total, y se configuró a partir de dos subsistemas: (1) de conexión e inyección de energía eléctrica en tiempo real a la red eléctrica y (2) de conexión aislada con almacenamiento para la alimentación de cargas específicas en corriente alterna con respaldo de la red eléctrica; contarán con 12 y 6 unidades, respectivamente.

El escenario de implementación de este diseño será un mini gimnasio a ubicarse en el Módulo II del Complejo E3T de la Universidad Industrial de Santander.

INTRODUCCIÓN

La Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones - E3T de la Universidad Industrial de Santander - UIS, con el ánimo de contribuir a la sensibilización de la comunidad universitaria por el cuidado del medio ambiente, y la correcta utilización de los recursos energéticos disponibles, ha optado por implementar sistemas de generación de energía más limpia en el Complejo E3T.

En el módulo II de este complejo se ha contemplado el diseño de diferentes aplicaciones energéticas sostenibles, con el propósito de reducir el consumo de energía eléctrica de la red pública; lo cual se logrará, principalmente, a partir de la generación de energía eléctrica in situ y de un diseño arquitectónico con enfoque bioclimático.

Una aplicación energética sostenible es aquel sistema que permite satisfacer necesidades (confort visual, confort térmico, uso de equipo electrónico, etc.) al interior de una edificación sin consumir energía (p.e. arquitectura bioclimática) o generándola in situ (p.e. fuentes de energía renovables) o utilizando sistemas de alta eficiencia energética [1].

En este documento se presenta el diseño de una aplicación energética basada en el aprovechamiento de la energía cinética desarrollada por un tripulante sobre una bicicleta de *spinning*. Generalmente, esta energía es transformada y desperdiciada en forma de calor, resultante de la fricción entre la transmisión, el volante y el freno de estas unidades.

Descripción general del sistema

El aprovechamiento de energía se dará al convertir la energía cinética en energía eléctrica, a partir de un generador de corriente continua.

Este tipo de generador puede operar para un amplio margen de velocidades, tal como es el régimen de uso de una bicicleta estática; adicionalmente, sólo se identificó su tipo en el análisis de la

oferta comercial; y por último, se puede instalar de forma no invasiva, evitando la pérdida de la garantía y averías a la bicicleta estática.

En cada bicicleta se sujetará mecánicamente un generador por medio de una estructura de soporte; tal combinación se denominó acople. Se consideraron para este diseño tres (3) tipos de acoples: “directo”, “por rodillos” y “tipo llanta”.

El diseño del sistema de generación consistió en el dimensionamiento de las características técnicas de 18 configuraciones de generación, agrupadas en dos subsistemas: conectado a la red, con 12 configuraciones, y aislado, con 6. Los esquemas de cada tipo de subsistema se muestran en las figuras 1 y 2, respectivamente; donde se identifican para ambos, las etapas de generación y de gestión de energía.



Figura 1. Esquema general del subsistema conectado a la red.



Figura 2. Esquema general del subsistema aislado.

El número total de las configuraciones se determinó con base en el área del recinto (54 m²); mientras, la participación por subsistema, se estableció con base en los requerimientos energéticos del recinto y la mayor eficiencia del subsistema conectado a la red.

La totalidad de las configuraciones funcionarán de forma independiente, dado que no es posible una conexión en paralelo de los generadores, debido a la variabilidad en la velocidad de pedaleo que tendrá cada tripulante; y en consecuencia, en la tensión de bornes del generador.

Para el subsistema conectado a la red, se consideran los tres tipos de acople (directo, por rodillos y tipo llanta). Este subsistema cuenta con dos tramos de red eléctrica: Generador – inversor e inversor - red. La gestión de la energía será realizada por inversores tipo *Grid-tie*¹.

El subsistema aislado tendrá como objeto alimentar cargas específicas (iluminación y tomacorrientes), a partir de la energía generada en tiempo real por las bicicletas de *spinning* y/o la energía almacenada en baterías.

¹ Transforma corriente continua en alterna, para ser inyectada directamente a la red eléctrica previa sincronización de frecuencia y tensión con ésta.

GENERALIDADES DE LA GENERACIÓN ELÉCTRICA A PARTIR DE BICICLETAS ESTÁTICAS

El acondicionamiento físico a partir de bicicletas estáticas permite un mejoramiento en el metabolismo, en el sistema cardiovascular y respiratorio, una quema significativa de calorías y aumenta la tonicidad y la masa muscular de caderas, glúteos, piernas, pantorrillas y abdomen; además, de un beneficio emocional (reduce el estrés). La Figura 3 muestra las partes de una unidad tipo [2].



Figura 3. Partes de una bicicleta estática [2].

Mecánica del sistema de generación

El funcionamiento mecánico de la bicicleta requiere un simple impulso de un par de pedales con las piernas (parte del cuerpo humano que tiene mayor potencia muscular). Este esfuerzo puede ajustarse a partir de un sistema de fricción manual, denominado regulador de resistencia (ver Figura 3).

Poseen una rueda de inercia o volante de varios kilogramos, a fin de facilitar el pedaleo, y que para efectos del sistema a diseñarse, es la parte de contacto a partir de la cual se transmitirá la energía de la bicicleta al generador DC.

Según [3], la potencia promedio generada por una persona promedio en una bicicleta oscila entre 270 W a 400 W. La Figura 4 ilustra la dinámica de pedaleo de un tripulante.

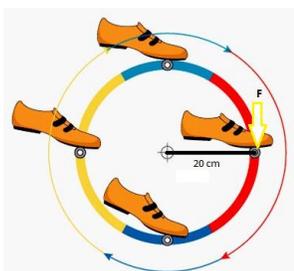


Figura 4. Esquema de fuerza en el pedal [4].

El par generado por la fuerza ejercida en el pedaleo está dado por:

$$T = F \times d \quad (1)$$

La fuerza promedio que pueden aplicar los adultos, sin distinción de sexo es de 294,3 N [3]; por lo tanto, el par sería de 58,86 N·m. De acuerdo con la ecuación (2), si se logra una velocidad angular de una rps o 6,2832 rad/seg, la potencia alcanzada sería 0,5 HP (370W).

$$P_m = T \times \omega \quad (2)$$

Al considerar un total de 18 unidades, esto representaría 6,6 kW de potencia mecánica, y para una eficiencia del sistema eléctrico

co aproximada de 75%, la potencia eléctrica generada ascendería a 5,0 kW.

Comportamiento tipo tripulante-generador

Para determinar el comportamiento de la variable potencia eléctrica generada en función de la velocidad desarrollada por un tripulante, se deben conocer: (1) la curva de potencia - velocidad característica del generador y (2) la relación entre las velocidades del eje del generador y la velocidad del volante.

La curva potencia - velocidad se obtiene a partir de la ficha técnica del generador; mientras, la relación entre las velocidades exige el conocimiento de los diámetros de las partes involucradas; asimismo, el comportamiento de la velocidad de pedaleo del tripulante, razón por la cual, se realizó una prueba de campo para determinar.

Desempeño tipo de un tripulante

La prueba de campo fue realizada en el Centro de Acondicionamiento Físico *Bodytech* de la ciudad de Bucaramanga, durante una clase de *Indoor Cycling*², de 50 minutos. Se contó con la participación de tres personas de condiciones físicas promedio.

La Figura 5 presenta el histograma por intervalos y acumulado de la velocidad del volante de la bicicleta para las tres muestras obtenidas.

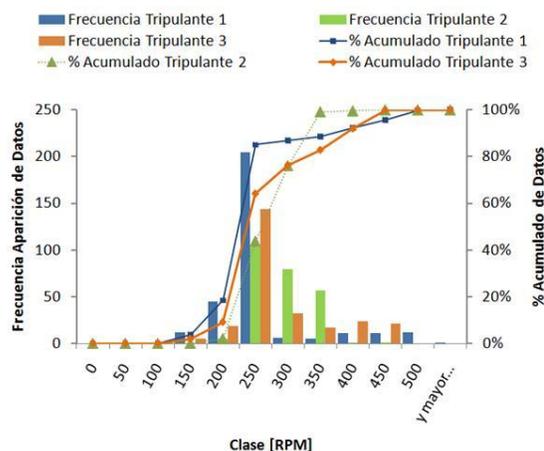


Figura 5. Histograma de velocidad del volante de la bicicleta durante una sesión de spinning.

Se encontró que el rango de velocidades predominante para los tres casos es de 200 rpm a 250 rpm. Los datos estadísticos experimentales se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos muestrales de la prueba realizada

Muestra	Datos	Media \bar{X}	Desviación estándar σ
A	246	211,1 rpm (18,2 km/h)	48,7 rpm (4,8 km/h)
B	308	262,2 rpm (22,6 km/h)	34,5 rpm (2,9 km/h)
C	262	233,8 rpm (20,15 km/h)	56 rpm (4,8 km/h)

De esta prueba se establece que en una sesión de *spinning*, la velocidad promedio de un tripulante es cercana a 242 rpm; además, que la velocidad de pedaleo se encuentra por encima de 200 rpm el 80% del tiempo.

² Es una actividad física que se desarrolla sobre una bicicleta estática que va acompañada de música, mucha concentración y gracias a las diferentes posiciones y ejercicios, se pueden lograr múltiples opciones de entrenamiento [5].

Características de desempeño del grupo acople-generator

Las velocidades del eje del generador y del volante de la bicicleta están relacionadas a partir de sus diámetros de la siguiente forma:

$$D * n_1 = d * n_2 \quad (3)$$

La Figura 6 esboza el proceso de transmisión de velocidad desde el pedal de la bicicleta hasta el eje del generador. La velocidad varía de acuerdo con los diámetros de cada uno de los componentes. Las dimensiones indicadas se basaron en la revisión de diferentes bicicletas estáticas.

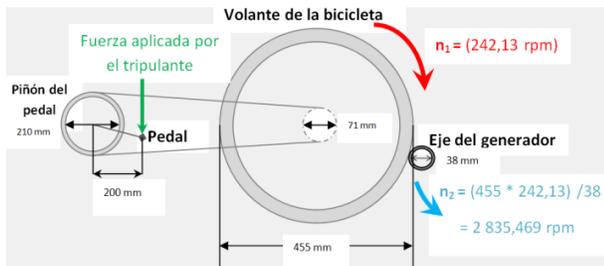


Figura 6. Transmisión de velocidad.

La Figura 7 muestra que la potencia eléctrica generada a una velocidad de 2 840 rpm es cercana a 300 W. Para el caso del subsistema conectado a la red, con una eficiencia del inversor *Grid-tie* del 90%, la inyección de potencia a la red es alrededor de 270 W.

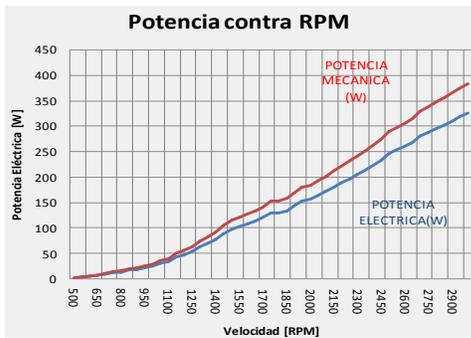


Figura 7. Potencia vs velocidad (generador de acople directo y del tripulante).

En definitiva, para un total de 18 unidades, la potencia efectiva a generarse sería de aproximadamente 5 kW.

SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA

Una vez descritas las generalidades del sistema de generación, se especifican los aspectos considerados para la selección de sus componentes: bicicleta, acople (generador-sujetador), inversores, reguladores y baterías.

Selección del acople-generator

Dado que la velocidad de pedaleo del tripulante se mantendrá 80% del tiempo entre 200 rpm y 250 rpm, y que además, con base en la relación entre los diámetros del volante y del eje del generador es 1:12, se tiene que el generador deberá soportar velocidades entre 2 400 y 3 000 rpm la mayor parte del tiempo, y una potencia nominal de 300 W.

Se estableció que la tensión nominal del generador debe ser 15 V, para garantizar una interconexión con los dispositivos de gestión y acondicionamiento de energía.

Con base en lo anterior, se encontraron tres modelos de acoples viables tecnológicamente en el mercado: “directo”, “por rodillos” y “tipo llanta”. Con el fin de promover la apropiación tecnológica de estos dispositivos, se consideraron los tres modelos en el sistema diseñado. Las características técnicas, cantidad y asignación por subsistema se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Características técnicas de acoples [8],[9].

Tipo	ACOPLE DIRECTO*	POR RODILLOS	LLANTA
Unidades	16	1	1
Esquema	Bicicleta spinning+generador	Bicicleta común +generador	Rueda(en eje de generador)
Subsistema	10 configuraciones conectadas a la red 6 configuraciones aisladas	Conectado a la red	Conectado a la red
Características	300W; 15V; 20A; 2 800rpm	300W; 15V; 20A; 2 800rpm	350W; 48V; 7,3A; 2 600rpm
Eficiencia	85%	80%	85%

El acople “directo” permite la conexión entre el volante de cualquier bicicleta de *spinning* con el eje del generador [8].

En cuanto al acople “por rodillos” es usado cuando se dispone de una bicicleta común, la cual se instala sobre una base de rodillos conectados al eje del generador; mientras, el acople tipo llanta, se hace necesario instalarlo en reemplazo del eje posterior de una bicicleta común.

La Figura 8 muestra la relación entre la velocidad del eje y la tensión en bornes del generador, y la influencia de la corriente, para tres escenarios de carga.

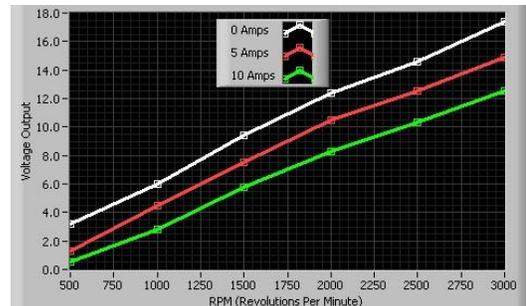


Figura 8. Curva V-rpm del generador a emplear - acople directo [8].

Para una velocidad determinada, la potencia generada dependerá de la tensión y corriente impuestas por la unidad de gestión y acondicionamiento de energía.

Si estos dispositivos poseen tecnología MPPT (*Maximum Point Power Tracking*), se garantizará la obtención de máxima potencia posible en todo momento, a partir de un ajuste suave de la tensión en bornes.

Selección de la bicicleta estática

La selección de la bicicleta estática se realizó a partir de un proceso de análisis jerárquico (*Analytic Hierarchy Process – AHP*), el cual evalúa la importancia de criterios específicos y permite clasificar diferentes alternativas, según su nivel de elegibilidad [10].

La selección se basó en dos criterios: costo y características técnicas del sistema, en estas últimas se consideraron factores

físico - mecánicos relevantes para la implementación del sistema de generación. La Tabla 3 presenta los factores establecidos.

Tabla 3. Criterios de selección bicicleta estática.

Criterio	Factor	
Costo	Mantenimiento	Evalúa qué tan costoso es el mantenimiento de la bicicleta
	Inversión	Evalúa el costo de compra de la bicicleta
	Instalación	Evalúa el costo de la instalación de la bicicleta.
Características técnicas	Adaptabilidad	Evalúa que tan adaptable es la bicicleta a los diferentes tipos de usuarios (talla).
	Sistema de arrastre	Evalúa qué tipo de conexión entre el eje de los pedales con el eje del volante hay para cada bicicleta.
	Peso del volante	Evalúa el peso que tiene el volante. A mayor peso mayor inercia, luego mas revoluciones con un mismo impulso.
	Peso max usuario	Evalúa el peso máximo que un tripulante puede tener para operar la bicicleta.
	Acople	Evalúa la adaptabilidad entre la bicicleta y el acople directo.

La valoración cuantitativa de los criterios y factores se presenta en la Figura 9.



Figura 9. AHP General para el proceso de selección de una bicicleta estática.

Como resultado del proceso de selección, se tiene que la mejor opción es la bicicleta de **Spinning Inox**, su descripción es presentada en la Tabla 4.

Tabla 4. Características bicicleta Spinning Inox [11].

	Marca Sport Fitness	Costo \$ 1 226 000
	Acople Directo	Peso máximo usuario 140 kg
	Sistema de arrastre Banda	Peso del volante 22 kg
	Adaptabilidad 4 sistemas multi posición	

Dimensionamiento y selección de las unidades de gestión de energía

A continuación se presenta el proceso de dimensionamiento y selección de las unidades de gestión de energía para cada subsistema.

Subsistema conectado a la red

La unidad de gestión y acondicionamiento de energía para las configuraciones de este subsistema será un inversor tipo *Grid Tie*, tal como se mostró en la Figura 1; que inyectará la energía a la red, previa sincronización.

La identificación de componentes principales y un flujo de potencia tipo son mostrados en la Figura 10.

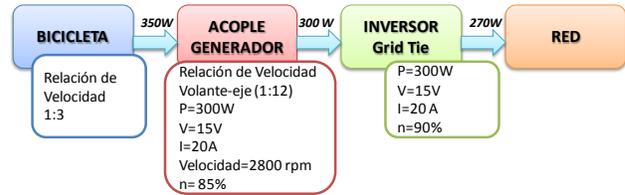


Figura 10. Esquema general del subsistema conectado a la red a partir de un acople tipo directo.

Se estima que la potencia a inyectarse a la red por cada configuración será de aproximadamente 270 W, para una velocidad de pedaleo de 2 800 rpm y una eficiencia total de 77%.

Con base en un análisis realizado, se determinaron las características nominales del inversor, las cuales se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Valores nominales del inversor tipo *Grid Tied* [12].

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Modelo	300 W	Tensión de entrada	10,5 - 28 V _{DC}
Marca	OEM	Tensión de salida	90- 140 V _{AC}
Frecuencia	55-63 Hz	Potencia nominal	300 W

Subsistema aislado

Este subsistema suministrará la energía eléctrica a cargas específicas (luminarias y tomacorrientes), de aproximadamente 1,8 kW.

Cada configuración de este subsistema tendrá un regulador, un inversor y una batería, para la gestión y el almacenamiento de energía; la Figura 11 muestra los valores nominales de los componentes.

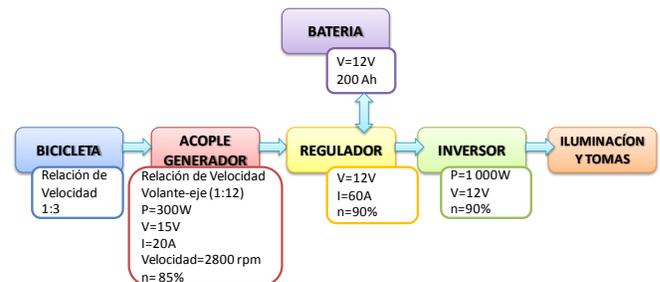


Figura 11. Esquema general del subsistema aislado.

En este subsistema la gestión de energía será realizada por un inversor tipo *Pure*³ y cinco (5) *Grid Tie*, reguladores y baterías. El regulador se encargará de acondicionar la energía generada y gestionar el proceso de carga y descarga de la batería.

Debido a que es necesario sincronizar las seis (6) configuraciones, en tensión y frecuencia, se estableció una configuración con un (1) inversor tipo *Pure* y cinco (5) *Grid tie*. El inversor *Pure* suministrará como señal de referencia, una tensión de 120 V a 60 Hz, a la cual se sincronizarán los cinco (5) inversores restantes, que serán de tipo *Grid Tie*. Para el correcto funcionamiento de este subsistema, es necesario que la configuración con el inversor *Pure* sea la primera en operar y se mantenga durante el periodo que se preste el servicio.

Las baterías se dimensionaron con base en el mayor de dos criterios, capacidad según carga o capacidad según descarga. En la selección de éstas se consideró la autonomía de operación de las mismas.

³ Transforma corriente continua en alterna, generando una onda sinusoidal pura de 120V a 60 Hz.

Con estos criterios, se seleccionó la batería RPOWER GEL [13], 12 V 200 Ah, la cual tiene un ciclo de descarga profundo de hasta el 80%, y mitiga la emisión de gases tóxicos y el mantenimiento durante su vida útil.

El regulador escogido fue WS-MPPT60 de la marca WELL-SEE [14], con especificaciones de 12 V / 60 A, con base en el cual se determinaron las especificaciones de un inversor Pure LM800W de la marca LEMORI (800 W; 12 V_{DC}/120 V_{AC}) y los cinco (5) Grid Tie GTI1000W de la marca KD (1 kW; 12 V_{DC}/120 V_{AC}; 65 A) [12]; para estos últimos, la restricción fue la corriente, pues aun cuando existen inversores Grid Tie de 800 W, su valor nominal de corriente no alcanza los 60 A.

DISEÑO DE LAS INSTALACIONES ELÉCTRICAS

Dada la configuración del sistema, son identificados dos tipos de instalaciones eléctricas: 1) de generación y 2) complementarias o de cargas específicas del recinto.

El dimensionamiento de los componentes (conductores, ductería, protecciones, SPAT, lámparas, etc.) se realizó disposiciones reglamentaria (RETIE y RETILAP) y normativa (Norma ESSA⁴ y NTC 2050).

Instalaciones eléctricas de generación

El esquema del sistema diseñado es mostrado en la Figura 22.

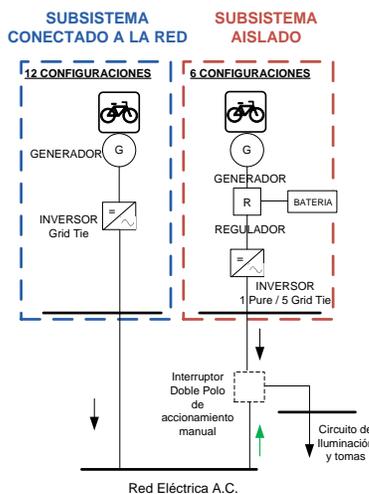


Figura 12. Diagrama básico de los dos subsistemas.

Las unidades del primer subsistema inyectarán energía eléctrica en tiempo real a la red; mientras, las unidades del segundo, tendrán como objetivo la alimentación de las cargas en corriente alterna del mini-gimnasio.

La conmutación entre el subsistema aislado y la red eléctrica será realizada a partir de un interruptor doble polo, doble tiro de accionamiento manual, el cual se seleccionó con base en el criterio de máxima corriente.

Los diagramas unifilares por los tipos de configuración se muestran en las figuras 13 y 14.

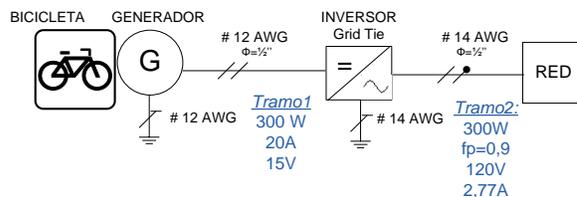


Figura 13. Diagrama unifilar para acople directo y por rodillos

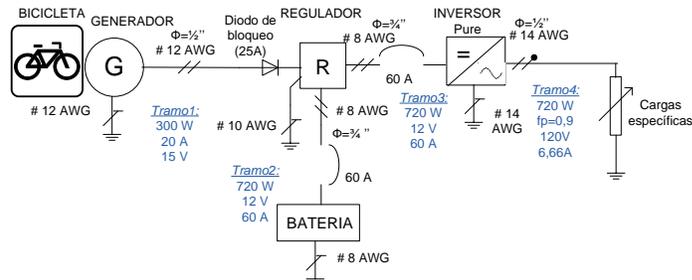


Figura 14. Diagrama unifilar acople directo con baterías.

Instalaciones eléctricas complementarias

Para dimensionar las instalaciones eléctricas del mini-gimnasio, se consideró un cuarto tipo de 54 m² (6 m x 9 m) y de 3 m de altura; dentro de este espacio habrá un cuarto técnico modular de 9 m² para la ubicación de tableros eléctricos y almacenamiento de componentes del sistema.

El recinto tendrá dos circuitos de cargas específicas; el primer circuito estará compuesto por ocho (8) luminarias de 55 W, y el segundo circuito tendrá ocho (8) tomacorrientes de 180 VA cada uno, para un total de 440 W y 1 440 VA, respectivamente. En definitiva, se tendrá una demanda aproximada de 2 kVA.

Estas cargas aisladas serán alimentadas por el subsistema aislado y tendrán como suministro de respaldo de energía la red eléctrica de la edificación, cuya transición se realizará por conmutación manual.

Se dispondrá de un tablero para alimentar los circuitos de iluminación y tomacorrientes del mini-gimnasio (TB). Estos circuitos se dispondrán tal como lo indica la Figura 15.

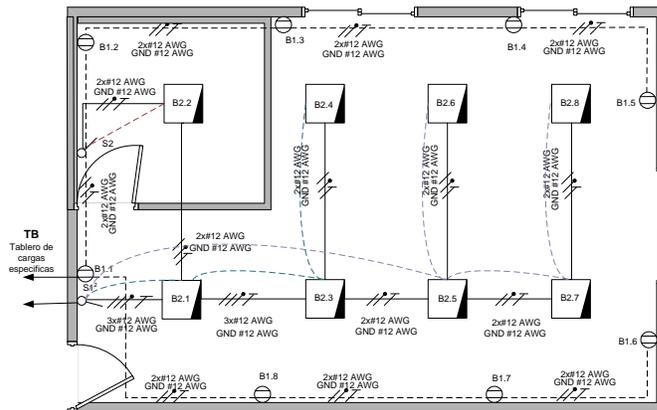


Figura 15. Iluminación y tomacorrientes del mini gimnasio

El sistema de iluminación fue diseñado a partir de simulaciones con el software DiaLux⁵ para diferentes alturas del montaje, y

⁴ Norma de la Electricidad de Santander S.A. – Norma ESSA, cuya cobertura de aplicación se da para el campus de la Universidad Industrial de Santander.

⁵ DIALUX, es un software para la planificación de iluminación de acceso gratuito.

luminarias y se realizó considerando lámparas fluorescentes debido a su uso potencial en la edificación⁶.

La lámpara seleccionada fue la *Havells Sylvania* 0058634 (55 W⁷), de 60 cm x 60 cm, con 4 tubos T5 de 17W, debido a su mejor comportamiento lumínico para el recinto, dando cumplimiento a los requisitos mínimos establecidos en la Norma ESSA⁸.

DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITORIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO

Con el fin de conocer el comportamiento energético del sistema, es preciso monitorizar variables como tensión, corriente y velocidad de cada configuración independiente de generación.

Para ello, se requiere la implementación de un sistema de monitorización; adicionalmente, los datos adquiridos deberán ser transmitidos a un computador para la realización de cálculos y visualización gráfica.

Para esta aplicación computacional se seleccionó el software de desarrollo es *LabView*⁹ de *National Instruments*, el cual tiene una interfaz que facilita el manejo de múltiples señales y permite el desarrollo de proyectos dirigidos a la instrumentación visual.

Adicionalmente, como el desarrollo del sistema de generación es un caso piloto, se requiere la monitorización intensiva de cada una de las etapas y configuraciones del sistema.

Adquisición de datos

Con base en lo antes expuesto, se dimensionó el sistema de adquisición de datos, que contará con sensores en la salida de cada etapa de las configuraciones independientes, y un dispositivo de adquisición de datos para la recolección de todas las señales de los sensores y alimentación de la herramienta computacional diseñada para su análisis.

Posteriormente, se dimensionó el dispositivo de adquisición de datos, el cual deberá contar con 114 entradas para las señales de los sensores, tal como se observa en las figuras 16 y 17, son necesarios 5 sensores por cada configuración para un total de 6 configuraciones aisladas, y 9 sensores por configuración para 12 configuraciones conectadas a la red.

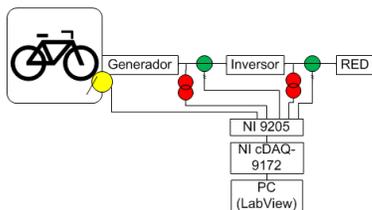


Figura 16. Esquema de conexión del subsistema conectado a la red.

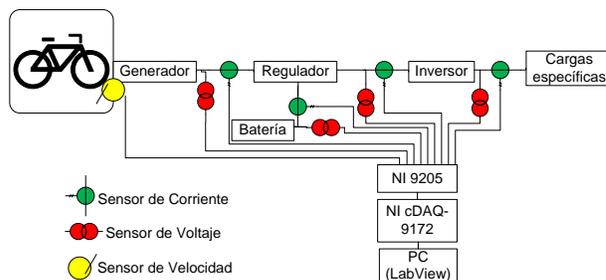


Figura 17. Esquema de conexión del subsistema aislado.

Asimismo, deben considerarse 6 señales adicionales provenientes del tablero de piso, para medir la potencia inyectada a la red, y dos señales asociadas a la alimentación de las cargas específicas; lo cual, suma en total 122 señales de entrada para el dispositivo de adquisición de datos.

Al tener en cuenta este conjunto de señales, se seleccionó el dispositivo de adquisición de datos NI CompactDAQ-9178, junto con los módulos de adquisición E/S NI 9205 (8 en total), también de *National Instruments*; este esquema de transmisión se presenta en la Figura 18.

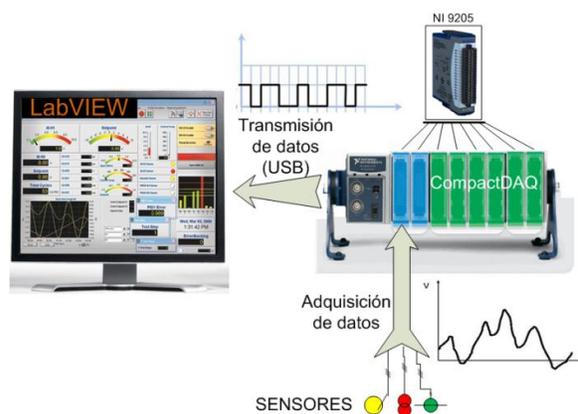


Figura 18. Esquema de adquisición y transmisión de datos.

Considerando los valores típicos del sistema en cada una de sus etapas, fueron seleccionados los sensores requeridos para la etapa de adquisición de datos, los cuales se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Tipos de sensores.

Variable	Tipo de sensor	Cant.	Referencia
Corriente	DC current	30	913B-75 AAC
Corriente	Solid-core AC current	22	UCT-0400-030 MAGNELAB
Tensión	DC voltage	30	CYVT01-32S1-0.5-51 CHEN YANG
Tensión	AC voltage transformer	22	SPT-0375-150 MAGNELAB
velocidad	Inductivo	18	86 MS HE09 HS

Interfaz hombre-máquina

La interfaz hombre-máquina es la herramienta computacional desarrollada en *LabView*, encargada del procesamiento de las señales provenientes de los sensores, para dar como resultado, la visualización del comportamiento del sistema. El diseño de la interfaz tiene los siguientes objetivos:

- Capturar los datos provenientes de chasis CompactDAQ vía USB.
- Calcular la velocidad de pedaleo y potencia en cada etapa de cada configuración.

⁶ La información sobre el tipo de lámparas fue suministrada según los lineamientos para el diseño eléctrico que se tendrá en cuenta en el Módulo II del Complejo E3T.

⁷ Potencia total de tubos fluorescentes y balasto electrónico.

⁸ Tabla 3.2 Niveles de luminancia para escenarios deportivos, Capítulo 3.

⁹ LabVIEW es un entorno de programación gráfica usado para desarrollar sistemas de medida, pruebas y control usando íconos gráficos y cables que parecen un diagrama de flujo. Ofrece una integración de miles de dispositivos de hardware y brinda cientos de bibliotecas integradas para análisis avanzado y visualización de datos, todo para crear instrumentación virtual [18].

- Mostrar a los usuarios de las bicicletas la potencia total entregada por cada subsistema, la velocidad y potencia de cada configuración independiente.
- Almacenar los datos provenientes de los sensores.
- Dar el aviso de conmutación al interruptor para conectar la red ó el subsistema aislado a las cargas específicas.

Para lograr estos objetivos, la interfaz se dividió en 5 pestañas; la primera de éstas muestra la potencia total que el sistema entrega a la red, la segunda y la tercera contienen las potencias asociadas a cada configuración del sistema, la cuarta pestaña muestra al usuario la velocidad y potencia generada para 9 configuraciones independientes, diseñado para ser visualizado en una de las dos pantallas LED del recinto, la quinta pestaña muestra las 9 configuraciones faltantes en la segunda pantalla LED. Las figuras 19 y 20 muestran las pestañas 2 y 4.



Figura 19. Panel frontal 3.

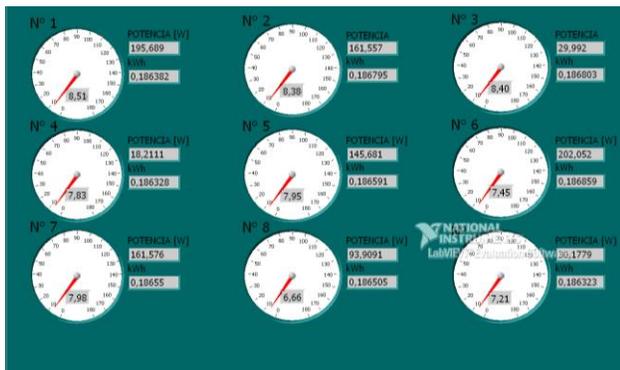


Figura 20. Pantalla LED 1.

ANÁLISIS ENERGÉTICO

El propósito del análisis energético es realizar un cálculo estimativo de la generación de energía del sistema en un periodo determinado.

Análisis energético del subsistema conectado a la red

Este estudio consideró ocho (8) escenarios de tiempo de operación del sistema 1h, 4h, 8h, 12h y 16h; para los cuales, se simuló la generación del sistema. El análisis de duración anual, se basó en una operación durante 8 meses de 22 días.¹⁰

La Tabla 7 muestra el resumen de los resultados de la simulación.

Tabla 7. Resultados del análisis energético

Escenario de operación	Total día [kWh]	Total mes [kWh]	Total año [kWh]
1 horas	9,03	198,85	1 590,80
4 horas	17,80	391,81	3 134,49
8 horas	35,93	790,51	6 324,08
12 horas	53,05	1 167,21	9 337,72
16 horas	71,25	1 567,52	12 540,20

Los resultados del estudio reflejan que el sistema de generación con un mínimo de funcionamiento de 2 horas podrá generar un poco más de 9 kWh por día, que serían inyectados a la red, al igual que con un tiempo promedio de generación de 12 horas se podrá generar mensualmente cerca de 1 200 kWh.

Análisis energético del subsistema aislado

Dado que la comprensión de la operación del subsistema aislado puede resultar complejo para el lector, a continuación se describen aspectos que pueden favorecer el entendimiento del mismo.

La Figura 21 muestra el esquema del subsistema aislado, se identifican los flujos de potencia a fin de determinar su comportamiento.

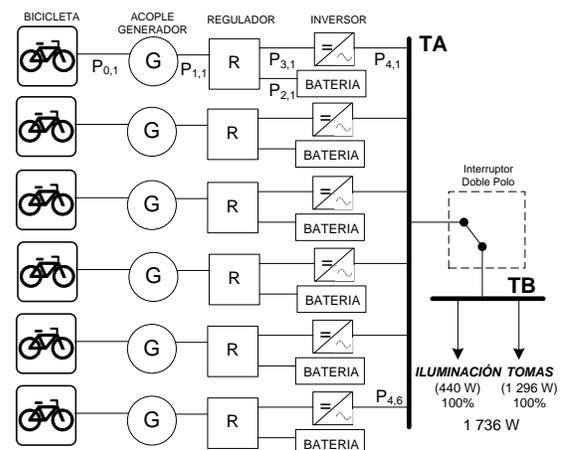


Figura 21. Esquema del subsistema aislado.

Donde:

$P_{i,j}$ = Potencia del flujo i , de la configuración j

$$\sum_{j=1}^6 P_{4,j} = P_{4T} : \text{Sumatoria de los flujos 4} \quad (4)$$

La gestión principal de energía de este subsistema es realizada por el regulador, lo cual puede presentar dos escenarios de operación, tal como se muestra en la Figura 22.

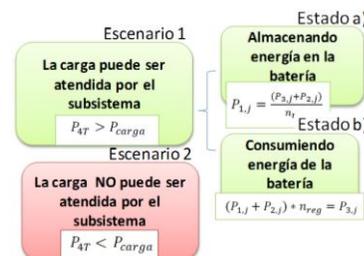


Figura 22. Escenarios y casos de aplicación del subsistema aislado.

Para el primer escenario, se pueden presentar los estados a) y b), de manera múltiple en las 6 unidades. Cuando ocurre el segundo escenario, es necesaria la conmutación con la red eléctrica,

¹⁰ Debido a que el sistema operará durante dos periodos académicos al año y sólo funcionará entre semana.

Con el fin de ilustrar el funcionamiento del subsistema, se presentan a continuación los cuatro (4) casos de operación típicos a partir de los flujos de potencia tipo.

Caso 1. La demanda es nula y la bicicleta genera 350 W; en este caso, la potencia generada cargará las baterías como lo indica la Figura 23.

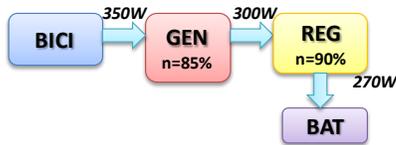


Figura 23. Subsistema aislado Caso 1.

Caso 2. La demanda total es reducida, por tanto la potencia generada de 350 W por unidad es suficiente para almacenar y abastecer la carga simultáneamente.

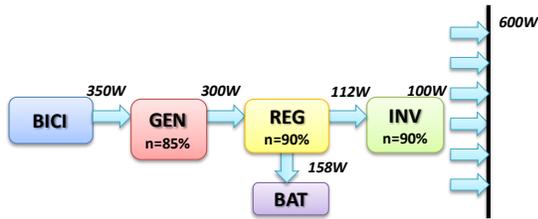


Figura 24. Subsistema aislado Caso 2.

Caso 3. Cuando las baterías están cargadas y la demanda es baja, habrá un exceso de potencia por parte del tripulante de la bicicleta; por lo que, el regulador hará un ajuste suave de tensión en los bornes del generador para reducir la potencia generada, de conformidad a lo mostrado en la Figura 25.

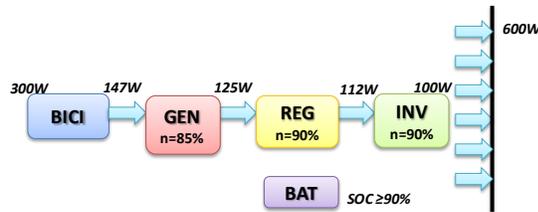


Figura 25. Subsistema aislado Caso 3.

Si las baterías se cargan completamente y no existe demanda por parte del mini-gimnasio, el regulador automáticamente se desconectará.

Caso 4. Hace referencia al escenario de operación 2, donde la demanda del recinto es mayor a la generación de las bicicletas. En este caso, la carga será atendida con el 100% de la potencia generada por el tripulante, y el faltante provendrá de la batería, tal como lo indica la Figura 26.

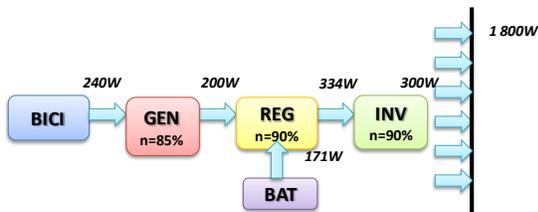


Figura 26. Subsistema aislado Caso 4.

En los casos uno (1), dos (2) y cuatro (4), es necesario mantener el generador a su máxima eficiencia; lo cual es posible a partir de la opción MPPT de los reguladores, que garantizan la entrega de la máxima potencia disponible en cada instante de tiempo.

A continuación se presenta un bosquejo del análisis energético del funcionamiento del subsistema para un día de operación; se tienen en cuenta demanda de la carga (Figura 27), potencia entregada (Figura 28) y comportamiento energético de las baterías (Figura 29).

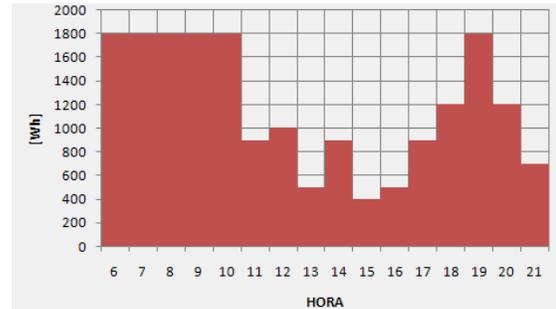


Figura 27. Demanda de cargas aisladas.

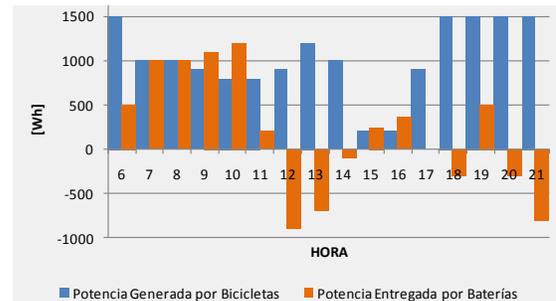


Figura 28. Potencia entrega por bicicletas y baterías.

El proceso de carga y descarga de la batería se muestra en la Figura 29, describiendo los límites del SOC (*State of Charge*), evidenciando un SOC mínimo a la hora 12.

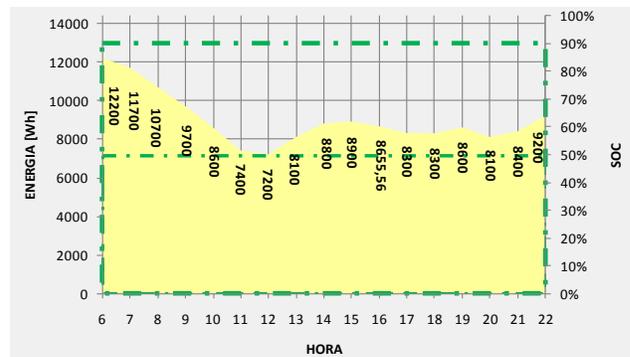


Figura 29. Comportamiento de la energía almacenada en la batería.

CONSIDERACIONES FINANCIERAS

Con el fin de establecer las implicaciones financieras del sistema diseñado, se determinó el monto de inversión requerido, los costos de operación y mantenimiento, el ahorro financiero producto de la energía eléctrica generada aprovechada, junto a los indicadores financieros, VPN (valor presente neto) y TIR (tasa interna de retorno).

La inversión para una configuración conectada a la red asciende a USD 1 200, cuya vida útil será de 15 años, y tendrá costos por operación y mantenimiento anual cerca a USD 45.

La Tabla 8 presenta el cálculo de los indicadores financieros VPN y TIR para los cinco escenarios de intensidades de uso diario. Se consideró el régimen de dinámica universitaria, equivalente a 180 días al año.

Tabla 8. Indicadores financieros por configuración.

Escenario [horas]	Gen. anual [kWh]	Ahorro anual [USD]	VPN (i=0%) [USD]	VPN (i=5%) [USD]	TIR [%]	
A	1	44	10	-1 797	- 1 623	NA
B	4	176	39	-1 357	- 1 320	NA
C	8	352	78	-770	- 913	NA
D	12	528	117	-183	- 507	NA
E	16	704	156	403	- 101	4%

Se tiene que de lograrse un uso promedio de 16 horas diarias del sistema, se podría considerar esta alternativa tecnológica como viable financieramente.

Ahora, teniendo en cuenta la potencial existencia de antemano de las bicicletas estáticas, el costo de inversión por configuración sería de USD 550. Con base en esta consideración se presenta nuevamente el consolidado en la Tabla 9.

Tabla 9. Indicadores financieros por configuración ajustados.

Escenario [horas]	Gen. anual [kWh]	Ahorro anual [USD]	VPN (i=0%) [USD]	VPN (i=5%) [USD]	TIR [%]	
A	1	44	10	- 783	- 713	NA
B	4	176	39	- 343	- 409	NA
C	8	352	78	243	- 2,5	4,9
D	12	528	117	830	404	14,4%
E	16	704	156	1 417	809	22,6%

Se aprecia que para un escenario de uso cercano a las 8 horas diarias, se podría garantizar la viabilidad financiera del sistema. Es importante considerar que por encima del enfoque financiero, se establece que el objeto de esta alternativa tecnológica es prioritariamente la conciencia sobre el cuidado del medioambiente y la generación de conciencia con respecto al uso racional de la energía

RESULTADOS

Con base en una prueba realizada en el Centro Médico Deportivo *BODYTECH*, de la ciudad de Bucaramanga, se estimó que la velocidad de pedaleo promedio desarrollada por una persona será cercana a 240 rpm, en cuyo caso, el potencial energético sería de 300 W a la salida del generador.

Se diseñó un sistema de generación de energía eléctrica de 5 kW de capacidad instalada, conformado por 18 configuraciones independientes, las cuales estarán agrupadas en dos subsistemas. El subsistema aislado atenderá los servicios complementarios, cuya carga instalada se estableció en aproximadamente 2 kVA.

El sistema de monitorización fue estructurado en 4 etapas: sentido, adquisición, procesamiento y visualización. Para cada configuración se dispusieron tres (3) tipos de sensores (corriente, tensión y velocidad). En cuanto a la adquisición de datos, el procesamiento y la visualización de resultados, se estableció una interfaz hombre-máquina.

La visualización de resultados del sistema de monitorización se realizará a partir de una interfaz sobre la plataforma *LabView*. Podrá realizarse en tiempo real tanto por personal técnico como por los tripulantes de las unidades estáticas a partir de pantallas LED.

Se realizó una estimación del comportamiento energético por configuración, teniendo en cuenta que la potencia eléctrica útil es 250 W. Se tiene que para un uso tipo residencial, una hora cada día del año, se podrían generar 91 kWh, equivalentes a USD 20; para el caso del campus universitario UIS, donde se tiene un régimen de 22 días al mes durante 8 meses al año, la generación ascendería a 350 kWh, equivalentes a 80 USD; y finalmente, para un caso hipotético de uso intensivo, de 10 horas diarias cada día del año, se

tendría una generación anual por unidad cercana a 900 kWh, equivalente a USD 200.

CONCLUSIONES

Se concibió una propuesta para generación de energía en sitio a partir del uso de bicicletas estáticas en el Edificio de Ingeniería Eléctrica II. Esta iniciativa favorecerá la calidad de vida de los integrantes de la E3T.

La búsqueda de generación de energía en sitio y de forma no convencional, permitió visualizar el aprovechamiento de energía comúnmente desperdiciada, como es el caso de la actividad física realizada por el ser humano.

La metodología AHP posibilita procesos de selección de dispositivos que considera diversos factores; su aplicación permitió establecer que el principal aspecto a considerar en la selección de la bicicleta, es la adaptabilidad del acople-generador con el volante.

La variabilidad en la ocupación de las unidades del sistema y la velocidad de pedaleo de cada tripulante, imposibilitan la conexión en paralelo de los generadores; por lo que, deben diseñarse configuraciones de forma independiente.

Las configuraciones de generación conectadas a la red ofrecen una mayor eficiencia del sistema, y menores costos de inversión inicial, operación y mantenimiento, en comparación a las configuraciones de tipo aislado.

Para el subsistema conectado a la red se estableció una eficiencia desde bornes del generador de 76,5%; para el subsistema aislado a la red sería de 65,8% (incluyendo baterías). Esta menor eficiencia se debe a un número mayor de dispositivos en la gestión de la energía.

Los dispositivos acople-generador comerciales para el aprovechamiento de la energía en una bicicleta de *spinning* funcionan con base en la velocidad de pedaleo del tripulante, y no en el esfuerzo desarrollado por éste.

Los dispositivos de gestión de energía con tecnología MPPT lograrán ajustar la tensión de salida del generador, a fin de obtener la máxima potencia posible.

Las baterías de ciclo profundo son una opción de alta elegibilidad, debido a que mantienen su tensión de funcionamiento estable y tienen una mayor vida útil.

El uso de la plataforma *LabView* para el desarrollo de interfaces hombre-máquina es una buena opción tecnológica para la adquisición de información en tiempo real, debido a que permite adquirir y procesar hasta 256 señales de distinto tipo.

Se recomienda la continuación de este trabajo de investigación, a fin de lograr un planteamiento para la optimización energético-financiera.

RECONOCIMIENTOS

Se agradece a la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones – E3T y al Grupo de Investigaciones de Sistemas de Energía Eléctrica – GISEL, por el apoyo suministrado para el desarrollo de este trabajo de investigación, y la inclusión de esta iniciativa en la dotación tecnológica del Módulo II del Complejo E3T.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Osma Pinto, Germán Alfonso. “*Uso racional de la energía en el edificio de Eléctrica II a partir del diseño de aplicaciones energéticas sostenibles*”. Trabajo de investigación de Maestría. Universidad Industrial de Santander. Director: Dr. Gabriel Ordoñez. 2011
- [2] ¿Cómo es una bicicleta de *spinning*? Artículo extraído de www.foroindoor.com. Disponible el 9 de noviembre de 2010.
- [3] Osorio, Arturo, “Generador eléctrico accionado por fuerza humana: una nueva alternativa de generación de energía”, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, 2007.
- [4] “Como pedalear correctamente”. Artículo extraído de www.nosinbici.com. Disponible el 10 de noviembre de 2010.
- [5] Centro de Acondicionamiento físico *BODYTECH*, Página oficial www.bodytech.com.co. Disponible 17 Julio de 2011.
- [6] Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española. Página oficial www.rae.es. Disponible 20 Enero de 2011.
- [7] www.real2electronics.com. Disponible 1 octubre de 2011
- [8] www.pedalpowergenerator.com, Página oficial Sistema Pedal vision, disponible, Enero 2011.
- [9] www.goldenmotor.com, Página Oficial Sistema MagicPie Wheels. Disponible Enero 2011.
- [10] Thomas L. Saaty, “*The Analytical Hierarchical Process*”, J. Wiley. New York. 1980.
- [11] Catálogo HA Bicicletas, Disponible en www.habicicletas.com, Enero 2011.
- [12] www.phoebus-solar.com . Página donde se encuentran los inversores requeridos. Febrero 2011
- [13] www.battcompany.com . Catálogo de baterías en línea. Disponible Noviembre 2010.
- [14] www.blueligth.com. Catálogo de Reguladores. Disponible Diciembre de 2010.
- [15] NTC 2050 Primera actualización, “Código Eléctrico Colombiano”. Editada por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). 2002.
- [16] RETIE. REGLAMENTO TECNICO COLOMBIANO DE INSTALACIONES ELECTRICAS. Anexo General. Agosto de 2008.
- [17] NORMA ESSA PARA EL CÁLCULO Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DISTRIBUCION. Anexo general. 2005.
- [18] *National Instruments*, Página oficial www.ni.co. Disponible 28 Enero 2011.
- [19] R. Strzelecki, M. Jarnut, G. Benysek, “Exercise bike powered electric generator for fitness club appliances”, University of Zielona Góra, 2010.
- [20] Agustín Arango Gómez, “EKO-SPINNING”, Instituto Politécnico Jesús Obrero, 2007.