



**Centro Universitario
de la Defensa Zaragoza**

Academia General Militar



**Convocatorias de Innovación Docente 2011-2012
de la Universidad de Zaragoza**

Experiencias de funcionamiento de una microrred eléctrica con generación renovable



Centro Universitario de la Defensa

Joaquín Mur Amada
Miguel Ángel García García
Iván Cristobal Monreal
Nabil El Halabi Fares

Academia General Militar

Julián Gutiérrez Gutiérrez
Alfonso Dieste Gonzalvo

Centro Universitario de la Defensa - Academia General Militar
Ctra. Huesca s/n
50090 – ZARAGOZA (España)



“Lo que oigo (leo), me olvido. Lo que veo, me acuerdo. Lo que hago, entiendo”.
Atribuido a Confucio (~500 BC).

RESUMEN

Este proyecto aborda el aprendizaje, de manera experimental, de los conceptos de potencia y de transformación de energía mecánica en eléctrica, utilizando una bicicleta estática como fuente de energía primaria y comparando las magnitudes electromecánicas con algunas magnitudes fisiológicas que se utilizan para planificar el entrenamiento deportivo. Se ha diseñado y montado una instalación que sirve también para introducir los elementos básicos que conforman una red eléctrica trifásica.

Por otra parte, la práctica trata de introducir, de forma amena, el funcionamiento de los grupos electrógenos, ampliamente presentes en aplicaciones militares.

En prácticas docentes con generadores eléctricos, los alternadores se suelen hacer girar acoplándoles un motor eléctrico. Si se conocen suficientes características del sistema, se pueden estimar indirectamente los parámetros mecánicos a través de medidas eléctricas en el lado del motor o del generador del sistema. La experiencia de algunos profesores que participan en este proyecto es que algunos alumnos no son plenamente conscientes la fuerte interacción entre los parámetros eléctricos y mecánicos de las máquinas eléctricas, quizás debido a que la explicación de dicha interacción suele requerir circuitos, ecuaciones y conceptos bastante abstractos.

Así pues, la innovación de este proyecto es que el generador se arrastra mediante el pedaleo de los alumnos, que pueden sentir directamente la cadencia y par resistente debido a la potencia eléctrica que el generador inyecta en una pequeña red. Esta experiencia deportiva ayuda a interiorizar y vincular de una manera más eficaz los aspectos energéticos, mecánicos y eléctricos presentes en una red eléctrica.

Desde el manillar de la bicicleta se conmutan distintas cargas eléctricas y se visualiza la cadencia de pedaleo, la frecuencia de pulso cardiaca y las medidas de un analizador de redes conectado entre el generador y las cargas. La percepción cualitativa por parte del alumno del par resistente, de la potencia mecánica desarrollada y de la cadencia se compara con las medidas del pulso del ciclista, de la velocidad de giro y de las medidas eléctricas realizadas sobre la instalación.

Como generador trifásico se ha utilizado el motor de una bici eléctrica del tipo directo -sin engranajes planetarios-. Esta máquina trifásica síncrona de imanes permanentes tiene un buen rendimiento, se puede acoplar a una bicicleta sin requerir piezas hechas a medida y, debido a la creciente popularidad de las bicicletas eléctricas, se puede obtener a un coste reducido.

Para motivar a los alumnos, una de las cargas utilizadas (varios tubos fluorescentes, que presentan un buen rendimiento y una iluminación constante en un amplio margen de frecuencia de pedaleo) se ha colocado detrás de una bandera española que se retroilumina.

Palabras clave: metodología activa, competencias transversales, prototipo, grupo electrógeno, pulso cardiaco, aprendizaje por experimentación.



CONTEXTO DE LA ACTIVIDAD

La asignatura de Fundamentos de Electrotecnia se imparte en el 2º semestre de 2º curso en el Grado de Ingeniería de Organización Industrial en el Centro Universitario de la Defensa (CUD). Los alumnos de este Centro también cursan simultáneamente la formación militar, en la cual se imparten asignaturas de Educación Física.

La realización de actividades conjuntas, que integran la parte militar-deportiva y la universitaria, ayuda a cohesionar la formación multidisciplinar que reciben los cadetes.

La asignatura de Fundamentos de Electrotecnia incluye en su programa el estudio de los principios de funcionamiento de los generadores y los transformadores eléctricos. Además, es habitual que en una situación militar sea necesario crear una pequeña red de suministro eléctrico, ya sea porque es necesario electrificar un emplazamiento remoto o porque la red eléctrica ha dejado de funcionar después de una catástrofe, por lo que será muy útil para los cadetes conocer cómo estos elementos se integran y utilizan.

Por último, la posibilidad de usar el gimnasio de la Academia General Militar, dentro de cuyo recinto se ubica el CUD, y la doble titulación de los alumnos permite plantear esta novedosa actividad (la inclusión de actividades deportivas dentro de prácticas universitarias de Electrotecnia es muy poco habitual). En esta actividad, el alumno experimenta directamente la fuerza sobre los pedales, la cadencia de pedaleo e indirectamente la potencia mecánica entregada (a través de la frecuencia cardíaca y pulmonar). Esta experiencia deportiva ayuda a interiorizar y a vincular de una manera más eficaz los aspectos energéticos, mecánicos y eléctricos presentes en una red eléctrica.

Además, la monitorización del ritmo cardíaco durante la actividad es una motivación adicional para los alumnos, pues el entrenamiento físico es una parte fundamental de su formación militar.

OBJETIVOS DE LA ACTIVIDAD

El primer objetivo de la actividad es que los alumnos obtengan un mejor conocimiento del funcionamiento de los generadores eléctricos y de sistemas eléctricos aislados, muy presentes en aplicaciones militares donde no se dispone de conexión a una red eléctrica convencional. El segundo objetivo es medir algunas cualidades fisiológicas relacionadas con el entrenamiento técnico-deportivo. El tercer objetivo es recalcar el carácter multidisciplinar de la doble titulación que cursan los cadetes.

Dado que la asignatura de Fundamentos de Electrotecnia tiene sólo 6 créditos (150 h de trabajo total de estudiante), la actividad se ha diseñado para tener una carga de trabajo reducida, alrededor de 2:30 horas. Las instrucciones de la actividad están en el guion de prácticas que se encuentra en el anexo II. La actividad se puede realizar de forma individual o en parejas, donde el alumno que no pedalea se encarga de hacer las medidas, controlar tiempos y apuntar los resultados.



DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD

Este proyecto aborda el aprendizaje, de manera experimental, de los conceptos de potencia, transformación de energía mecánica en eléctrica, utilizando una bicicleta estática como fuente de energía primaria y comparando las magnitudes electromecánicas con algunas magnitudes fisiológicas que se utilizan para planificar el entrenamiento deportivo. Además, se aprovecha la instalación montada para introducir los elementos básicos que conforman una red eléctrica trifásica.

Esta experiencia ilustra un pequeño sistema eléctrico trifásico, donde la energía mecánica se convierte en energía eléctrica, se transporta unos metros a mayor tensión y finalmente se utiliza, convirtiéndola en otro tipo de energía. Se ha modificado una bicicleta estática para convertirla en un grupo electrógeno, donde los propios alumnos son la fuente de energía primaria que impulsa el generador eléctrico. Es decir, el papel del motor de combustión de un grupo electrógeno convencional lo realiza un ciclista que ejerce un par de fuerzas con una cierta cadencia de pedaleo. Por tanto, la práctica introduce de forma amena el funcionamiento de los grupos electrógenos, presentes en aplicaciones militares donde el suministro eléctrico no se puede realizar desde una red convencional (emplazamientos remotos, aplicaciones móviles, redes eléctricas destruidas o de baja fiabilidad...).

En prácticas docentes universitarias con generadores eléctricos, los alternadores se suelen hacer girar acoplándoles un motor eléctrico, en vez de un motor de combustión. Si se conocen suficientes características del sistema, se pueden estimar indirectamente los parámetros mecánicos a través de medidas eléctricas en el lado del motor o del generador del sistema. La experiencia de algunos profesores que participan en este proyecto es que algunos alumnos no son plenamente conscientes la fuerte interacción entre los parámetros eléctricos y mecánicos de las máquinas eléctricas, quizás debido a que la explicación de dicha interacción suele requerir circuitos, ecuaciones y conceptos bastante abstractos.

La innovación de este proyecto es que el generador se arrastra mediante el pedaleo de los alumnos, que pueden sentir directamente la cadencia y par resistente debido a la potencia eléctrica que el generador inyecta en una pequeña red. Esta experiencia deportiva ayuda a interiorizar y vincular de una manera más eficaz los aspectos energéticos, mecánicos y eléctricos presentes en una red eléctrica.

Desde el manillar de la bicicleta se conmutan distintas cargas eléctricas y se visualiza la cadencia de pedaleo, la frecuencia de pulso cardiaca y las medidas de un analizador de redes conectado entre el generador y las cargas. La percepción cualitativa por parte del alumno del par resistente, potencia mecánica desarrollada y la cadencia se compara con el pulso del ciclista, la velocidad de giro y las medidas eléctricas.

Como generador trifásico se ha utilizado el motor de una bici eléctrica del tipo directo -sin engranajes planetarios-. Esta máquina trifásica síncrona de imanes permanentes tiene un buen rendimiento, se puede acoplar a una bicicleta sin requerir piezas hechas a medida y, debido a la creciente popularidad de las bicicletas eléctricas, se puede obtener a un coste reducido.

El generador está conectado con las distintas cargas eléctricas mediante un banco trifásico de transformadores. Mediante cables multipolares, que representan las líneas de



distribución de la microred, se alimentan las siguientes cargas: 6 tubos fluorescentes de 51 W, 6 bombillas incandescentes de 60 W, un banco trifásico de condensadores y un motor.

En un generador de imanes permanentes, se puede deducir teóricamente que la tensión es aproximadamente proporcional a la velocidad de giro. Experimentalmente se observa que cuando se dobla la cadencia de pedaleo (velocidad del generador), las bombillas incandescentes lucen aproximadamente el doble y el esfuerzo fisiológico aumenta considerablemente, pues la potencia en estas cargas depende del cuadrado de la tensión.

El sistema permite observar claramente el efecto de la potencia reactiva en la tensión, pues el generador no tiene un sistema de control automático de la tensión típico de las centrales eléctricas y la excitación magnética de la máquina es constante. Por ello, se observa que al conectar los tubos fluorescentes baja la tensión y al conectar los condensadores sube la tensión. Por otra parte, el generador apenas ofrece resistencia al pedaleo cuando conectamos sólo los condensadores, aunque la corriente sea casi la nominal.

También es bastante ilustrativo que cuando se alimentan cargas trifásicas equilibradas apenas se perciben vibraciones en los pedales, pero cuando se conecta una carga desequilibrada se nota una vibración en los pies pues el par electromagnético en el generador deja de ser constante.

CARGA DE TRABAJO DE LA ACTIVIDAD

Tiempo empleado por los profesores

No se ha llevado una contabilidad del tiempo dedicado por los profesores, pero se ha estimado que el número de horas invertidas en el desarrollo del prototipo y de la documentación de la actividad ha superado 100 h. No obstante, el tiempo necesario para replicar el prototipo es ostensiblemente menor, pues muchas soluciones adoptadas se han obtenido a través del ensayo-errordado que todos los elementos del sistema trabajan fuera de su rango nominal de utilización.

Estimación de la carga de trabajo de los alumnos

En una formación con doble titulación hay que optimizar cada hora de trabajo del alumno. La carga de trabajo del estudiante que realiza la actividad es de aproximadamente 2:30, repartido de la siguiente forma:

- Apuntarse en el estadillo de reserva de la bicicleta (10 min).
- Lectura del guion en donde se explica el umbral aeróbico, los fundamentos de las redes eléctricas y de la conversión de energía mecánica en eléctrica a través del generador (30 min).
- Realización de la experiencia, anotando los resultados en las hojas entregables y haciendo los cálculos necesarios (1:50 h).

RESULTADOS Y EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD

Algunos estudiantes asistieron a una demostración del prototipo y recibieron la actividad con interés y curiosidad (algunos de ellos probaron el prototipo y se hicieron alguna fotografía en él).

Para motivar a los alumnos, una de las cargas utilizadas (seis tubos fluorescentes) se ha colocado detrás de una bandera española que se retroilumina. Esta carga se adapta muy bien a las características de un generador síncrono de imanes permanentes, produciendo una iluminación muy constante en un amplio margen de cadencia de pedaleo.

Este es el primer año que se imparte la asignatura de Fundamentos de Electrotecnia en el Centro Universitario de la Defensa, por lo que no se puede comparar la mejora de la calidad del aprendizaje debido a esta actividad respecto años anteriores. La eficacia para el aprendizaje de la actividad tampoco se puede estimar utilizando un grupo de control porque en el Centro Universitario de la Defensa se intenta que las secciones sean lo más uniformes posibles.

En la asignatura de Calidad se han realizado encuestas sobre algunas asignaturas. Aunque la encuesta no preguntaba específicamente por la actividad, los resultados relativos a las prácticas fueron positivos.

No obstante, durante el curso 2012-13 se tiene previsto realizar la actividad no como una demostración, sino como una práctica voluntaria siguiendo el guion del anexo II. En dicho guion se resume brevemente las características de un sistema eléctrico, haciendo hincapié en la utilización de grupos electrógenos en aplicaciones militares y los alumnos deben rellenar un formulario con los datos eléctricos y fisiológicos, comparándolos. La evaluación de la actividad a los alumnos se realizará a través de las hojas entregables del guion, donde aparecerán los datos medidos, cálculos obtenidos a partir de dichos datos y preguntas para conocer el grado de comprensión del fenómeno experimentado.

La práctica no puede tener carácter obligatorio porque solo se cuenta con un prototipo y el próximo curso estarán matriculados en la asignatura alrededor de 300 cadetes. A fecha de cierre de esta memoria no se ha concretado los beneficios que reportaría a un alumno la realización de esta práctica voluntaria durante el curso 2012-13.

Anexo I - descripción del prototipo

Introducción

En noviembre del 2008, un miembro del equipo realizó un prototipo demostrativo para la I Semana de la Ingeniería de la Universidad de Zaragoza mostrado en la figura 1. Como el presupuesto era reducido, se utilizó una bicicleta antigua colocado en un soporte de rodillos donados, y se sustituyó el rodillo por un alternador de micro-coche, comprado en un desguace.

Se construyó una sencilla maqueta de una casita, con un interruptor magnetotérmico y un diferencial trifásico, líneas de distribución monofásica para cada planta y, como luces de la casita, lámparas halógenas de 12 V que se conmutaban desde interruptores dobles tal como se puede ver al fondo de la figura 1. Dentro de la casita, se podía crear un defecto a tierra para comprobar el funcionamiento del interruptor diferencial.



Figura 1: Prototipo inicial realizado en 2008 para la I Semana de la Ingeniería de la Universidad de Zaragoza.

El alternador de coche es una máquina síncrona con un control automático de la excitación para que la tensión después de la etapa de rectificación trifásica sea unos 14.5 V aproximadamente.

El alternador de coche necesita girar entre 1500 y 9000 rpm para funcionar, mientras que los pedales de una bicicleta suele girar entre 50 y 90 rpm y una rueda de bicicleta suele girar entre 100 rpm y 400 rpm, dependiendo de la relación plato-piñón engarzada por la cadena. En el prototipo, la salida rectificada del generador estaba conectada a un pequeño condensador, en vez de una batería, por lo que requería girar bastante rápido para que se produjese el cebado del generador por magnetismo remanente. Por ello, se sustituyó la rueda de la polea de la distribución por un casquillo de radio reducido, sobre la que pisaba el neumático. Aunque era necesario esprintar al inicio para cebar el



generador, el generador era capaz de alimentar la carga en un amplio rango de marchas y cadencias gracias a la regulación automática de la excitación que viene integrada en la mayoría de alternadores de automoción. Como la potencia eléctrica absorbida por las cargas eléctricas no dependía de la velocidad de giro, se observaba que cuando se bajaba la cadencia, la resistencia al pedaleo se incrementaba inversamente.

Quizás la principal deficiencia de este prototipo era la baja eficiencia del sistema. La rodadura del neumático sobre el pequeño casquillo producía bastantes pérdidas por fricción y deformación del neumático. Para disminuir estas pérdidas dentro de lo posible, se aumentó bastante la presión del neumático y para que no se produjese patinaje entre los dos elementos, también se apretó el tensor que incrementaba la fuerza de contacto entre el neumático y el casquillo. No obstante, el generador seguía presentando un rendimiento bajo debido a los siguientes efectos:

- las elevadas pérdidas mecánicas en el ventilador, que giraba entre 1500 y 9000 rpm (se barajó desacoplarlo, pero había que extraer el rotor y no se disponían de herramientas adecuadas),
- las pérdidas eléctricas en el circuito de excitación,
- el alternador está optimizado para generar unas 10 veces la potencia que proporciona un ciclista no profesional.

Otro problema de los alternadores de automoción es que suelen tener alrededor de 12 polos y genera una red trifásica a una frecuencia entre 150 y 900 Hz. A esas frecuencias, muchos aparatos diseñados para la red convencional de 50 Hz no funcionan adecuadamente. Los aparatos de medida diseñados para corriente alterna de 50 Hz no funcionan correctamente a 900 Hz. Tampoco se logró disparar el interruptor magnetotérmico y el interruptor diferencial se desconectaba con corrientes bastante superiores a la nominal.

Modelos comerciales

Se ha realizado una búsqueda de sistemas que simplificasen el diseño y montaje del prototipo.

En Internet se ha encontrado información de entusiastas del bricolaje que acoplan generadores a bicicletas convencionales y estáticas. Los equipos encontrados generaban tensiones mediante alternadores con rectificación electrónica o bien con dinamos. A pesar de su bajo rendimiento en esta aplicación, los alternadores de automoción son bastante utilizados en modelos comerciales porque son robustos, baratos y llevan ya incorporados un regulador de excitación y la tensión rectificada que proporcionan es 14 V (para automóviles) o 28 V (para vehículos industriales). En algunos casos, se utilizaba una batería para almacenar la energía y un inversor para conectar cargas de corriente alterna a 50 Hz o 60 Hz a 230 o 240 V. Si no se utiliza una batería que almacene la energía, el inversor se puede desestabilizar debido a variaciones de la carga eléctrica o por pérdida de excitación magnética del alternador.

Algunos investigadores han construido sistemas electrónicos específicos para convertir la energía eléctrica generada por bicicletas a unos niveles de tensión y frecuencia



adecuados para alimentar cargas convencionales. Por ejemplo, (Strzelecki, 2007)¹ muestra una bicicleta estática que arrastra un alternador de coche conectado a una sistema electrónico que carga baterías de 12 V y suministra corriente continua a 12, 24 y 48 y 230 V, 50 Hz en alterna. Por otra parte, (Lindberg-Pousen, 2010)² muestra otro convertidor electrónico para controlar un alternador arrastrado por otra bicicleta estática.

La principal desventaja de los sistemas basados en alternadores de automoción junto con convertidores electrónicos es el bajo rendimiento debido a las pérdidas mecánicas y eléctricas en la transmisión, en el alternador y en el equipo electrónico. Hay comercios electrónicos que ofrecen soportes para bicicleta que llevan incorporado un generador eléctrico y que se acciona mediante una correa que se acopla a la rueda trasera. Estos modelos tienen la desventaja de contar con un elemento más de transmisión, que disminuye el rendimiento del sistema y que aumenta la frecuencia del sistema trifásico generado. En estos modelos sería necesario añadir un ciclocomputador para medir las pulsaciones cardiacas, la cadencia de pedaleo o la velocidad del generador (los modelos más económicos con estas prestaciones están alrededor de 150 € en Decathlon). Dentro de esta categoría cabe citar:

- Modelo *Pedal-A-Watt PAWA-1* en www.econvergence.net por US\$339 + US\$151.50 de gastos de envío. Si se añaden los accesorios necesarios para conectar cargas a 240 V, 50 Hz, el precio total asciende a US\$1461.85
- Modelo *PPG-B300-K-110VAC* en www.pedalpowergenerator.com por US\$999.

La página web www.pedalpowergenerator.com también comercializa una bicicleta estática que genera hasta 300 W a 12 V en continua y 110 V en alterna (modelo SPG-300W-VR110) por US\$1,579.00 + US\$70.99 de gastos de envío en www.amazon.com. No se dispone de información técnica de este sistema, pero viendo otros modelos de la misma casa probablemente se trate de un alternador de imanes permanentes con su salida rectificadora y conectada a un convertidor electrónico de 12 V de corriente continua a 110 V de corriente alterna. Por las fotografías, parece que este sistema no cuenta con pulsímetro y tacómetro.

La compañía *Green Revolution* equipa bicicletas estáticas *Spinner*® con un generador eléctrico que ilumina un panel. El coste de adaptar la bicicleta estática es de unos US\$750, a lo que habría que sumar otro tanto por la bicicleta estática básica *Spinner*® (sin pulsómetro ni velocímetro) y los gastos de envío. Según la publicidad, esta bicicleta no indica los parámetros eléctricos del generador, sólo tiene un potenciómetro para ajustar la fuerza resistente y un indicador de la potencia generada (entre 100 y 130 W para un ciclista medio). Para poder utilizar este sistema en la práctica, habría que añadirle aparatos de medida eléctrica y fisiológica, y cargas que evidencien el funcionamiento trifásico del sistema.

¹ Strzelecki, R.; Jarnut, M.; Benysek, G. "Exercise bike powered electric generator for fitness club appliances", 2007 European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '07), Aalborg, Denmark.

² Lindberg-Poulsen, K.; Andersen, M.A.E. ; Knott, A. ; Andersen, T. "Energy harvesting from an exercise bike using a switch-mode converter controlled generator", 2010 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET '10), Kandy, Sri Lanka



Los cicloergómetros son bicicletas estáticas optimizadas para medir parámetros fisiológicos del ciclista. Suelen llevar un freno magnético para ajustar la resistencia de pedaleo y están enfocados a la medicina deportiva y a la planificación de entrenamientos. Por ejemplo, el cicloergómetro más básico de Ergoselect (modelo 100P) cuesta 3.200 € en la tienda on-line www.tecnomed2000.com. El freno magnético que llevan estas máquinas no puede funcionar como generador eléctrico.

Hay algunos cicloergómetros pasivos asistidos con motor para la rehabilitación, que quizás pudieran utilizarse como generadores. El modelo Electra S4 tiene un motor de 50 W y puede comprarse por 180 € en la tienda on-line <http://www.activasaluz.com>. Debido a falta de información técnica, no se sabe si este motor que lleva es de algún tipo que permita su funcionamiento como generador. No obstante, la potencia de esta máquina sería insuficiente para utilizarla en la actividad propuesta.

Los motores directos de rueda trasera de bicicleta eléctrica tienen mayor rendimiento que los alternadores convencionales de automoción porque no necesitan una transmisión adicional para multiplicar de velocidad. Llevan potentes imanes permanentes, por lo que también evitan las pérdidas eléctricas de excitación, pero a cambio generan una tensión proporcional a la velocidad de giro y, por tanto, proporcional a la frecuencia. Por ejemplo, en la página web <http://www.instructables.com/id/Electric-bike-to-electric-generator-Simple-DIY-m> se documenta una exhibición del Centro de ciencia e industria en Columbus (<http://cosi.org>) donde se explica cómo obtener los materiales y construir un grupo electrógeno basado en bicicletas con motores en las ruedas traseras, que se levantan del suelo con soportes similares a los utilizados para entrenar con rodillos.

Prototipo desarrollado específicamente para la actividad

El prototipo que se muestra a continuación ha sido financiado íntegramente por el Centro Universitario de la Defensa de Zaragoza. Se ha optado por desarrollar un prototipo que fuera lo más pedagógico posible y que reforzarse los conceptos de redes trifásicas, que tuviera un alto rendimiento para fuera más espectacular y que utilizase elementos lo más estándar posible para contener el presupuesto.

Algunos sistemas analizados podrían haber sido utilizados en la actividad, pero habría sido necesario modificarlos para conectarlos a cargas trifásicas. Además, el coste de algunos prototipos comerciales supera el presupuesto inicial disponible, 1000 €, a lo que habría que sumar las modificaciones necesarias para adaptar el sistema a nuestra actividad, las cargas eléctricas y equipos de medida.

Como base de la transformación se ha utilizado la bicicleta estática de la marca *Enebe Fitness*, modelo Europa (vea la figura 2) que costó 270 €. Esta bicicleta lleva incorporado un tacómetro y un pulsímetro que toma la señal de unos electrodos del manillar. Este sistema no requiere una cinta torácica que suelen llevar otros ciclocomputadores como sensor cardíaco.

El volante de inercia que aparece en la figura 2 se sustituyó por un motor eléctrico de rueda trasera de bicicleta, quedando la bicicleta tal como se muestra en la figura 3. El motor rueda trasera de bicicleta no tiene engranajes y ni escobillas, sus valores nominales son 48 V de tensión, 500 W de potencia, 420 rpm de velocidad máxima y 10,86 N·m de par máximo (ver tabla 1). Se ha estimado que el motor tiene 50 polos.

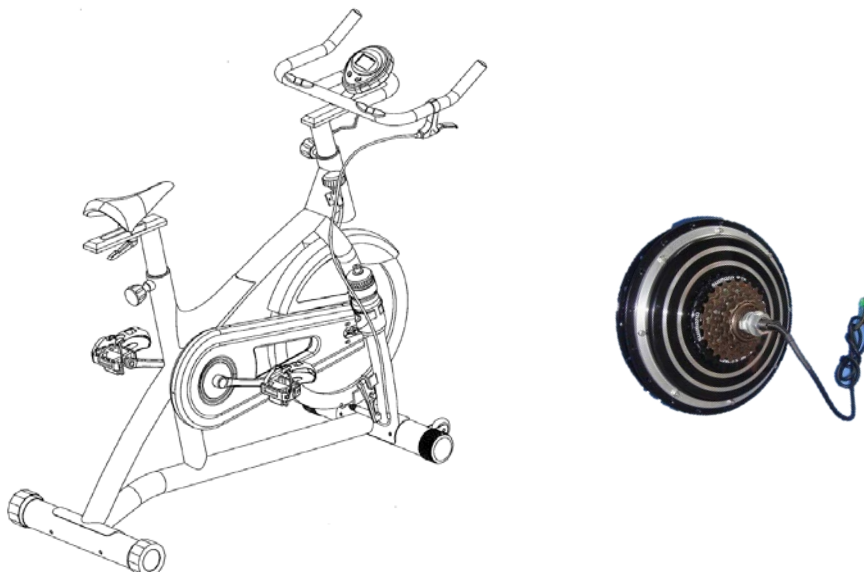


Figura 2: Imagen del catálogo de la bicicleta estática Enebe Spinning Europa y del motor de rueda trasera.



Figura 3: Bicicleta estática después de sustituir el volante de inercia por el motor de rueda trasera de bicicleta.



Figura 4: Vista del manillar con los sensores de pulso, los interruptores de las cargas, el analizador de redes y la pantalla original de la bicicleta estática

El motor fue comprado en EBay al vendedor Conhismotor por 173 € Tiene seis piñones instalados y el desarrollo que actualmente está engrazado con la cadena es 14 dientes en



el piñón del motor y 54 dientes en el plato de los pedales. Con una cadencia rápida (90 rpm en el eje del pedalier), el generador gira a unos 347 rpm. Esto produce una red trifásica de tensión línea 35 V y una frecuencia de 150 Hz aproximadamente, que se conecta a un banco de tres transformadores para focos halógenos de 12/230 V y 200 VA conectados en esquema Y-D. Con esto se consigue una red trifásica de unos 400 V y 150 Hz, aunque el valor de la frecuencia y de la tensión varía con la cadencia. La frecuencia es el triple del de la red convencional, pero se ha comprobado que el analizador trifásico de redes Circutor CVM-Mini (que aparece en la figura 4 junto a los interruptores de las cargas) mide con suficiente precisión tensiones, corrientes y potencias y se ha alimentado mediante un pequeño divisor capacitivo.

Mediante cables multipolares, que representan las líneas de distribución de la microred, se alimentan las siguientes cargas: 6 tubos fluorescentes de 51 W, 6 bombillas incandescentes de 60 W, un banco trifásico de condensadores y un motor. Para producir un encendido más rápido de los tubos fluorescentes, se han añadido condensadores de 12 μF en serie con el cebador.

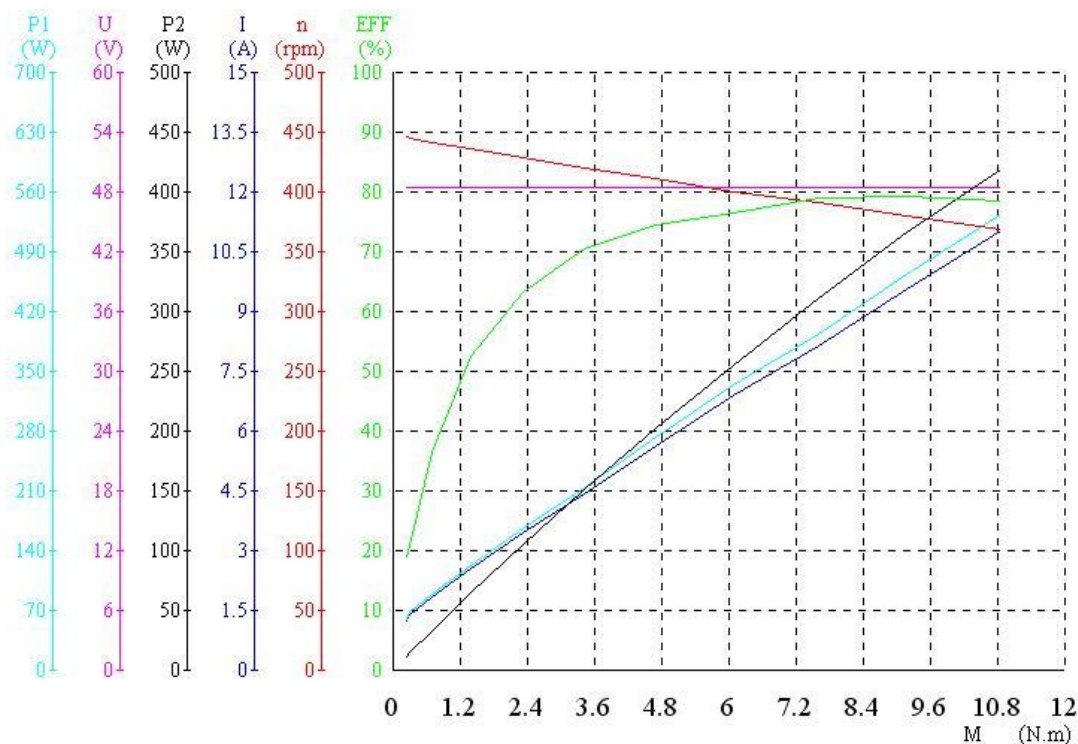
Estimación del rendimiento del sistema

En el sistema se mide la potencia entregada a las cargas en el lado de alta tensión de los transformadores. Debido a los rozamientos mecánicos y a las pérdidas eléctricas en el generador, transformador y cables, el ciclista deberá desarrollar una mayor potencia.

Las pérdidas eléctricas en el motor/generador de imanes permanentes y en los transformadores se deben a la magnetización, la generación de corrientes parásitas de Foucault y la resistencia de los devanados, siendo estas últimas las más importantes. Las pérdidas de Foucault son proporcionales a la frecuencia al cuadrado de la velocidad de giro. Las pérdidas de magnetización son proporcionales a la velocidad de giro. Las pérdidas debidas a la resistencia de los conductores son proporcionales al cuadrado de la corriente.

La tabla 1 muestra los resultados del ensayo de la máquina funcionando como motor a una velocidad entre 45 km/h y 56 km/h en marcador de bicicleta (velocidad de giro entre 357 y 450 rpm) a través de un convertidor electrónico que se alimenta a una tensión constante de 48,38 V y genera una salida trifásica de frecuencia y tensión variable. La corriente I (en azul oscuro) representa la corriente continua extraída de la fuente de 48,38 V. La potencia $P1$ en azul cian corresponde a la potencia eléctrica consumida de la fuente de 48,38 V, que corresponde al producto de la tensión e intensidad por se un convertidor electrónico que se alimenta con una fuente continua. La potencia $P2$ en color negro corresponde a la potencia entregada por el motor a la velocidad de giro n (en color rojo). El ratio entre la potencia mecánica entregada y la potencia eléctrica consumida es EFF , la eficiencia del sistema funcionando como motor.

En la tabla 1, la eficiencia del sistema está por encima del 75%, salvo a bajas cargas. Cuando el motor empuja poco, las pérdidas constantes del sistema y, en especial, del sistema electrónico hacen que el rendimiento baje debido al consumo mínimo del accionamiento electrónico. Cuando el motor empuja cerca de los valores nominales, las pérdidas se deben sobretodo a la resistencia en el motor y en el equipo electrónico y las pérdidas constantes (consumo mínimo) tienen menos peso relativo.



Description	U	I	P1	M	n	P2	Eff
	(V)	(A)	(W)	(N.m)	(rpm)	(W)	(%)
No Load	48.44	1.221	59.18	0.24	446.0	11.20	18.9
Max Efficient	48.38	9.550	462.1	9.19	380.0	365.6	79.1
Max Output Power	48.38	11.01	533.0	10.86	368.2	418.6	78.5
Max Torque	48.38	11.01	533.0	10.86	368.2	418.6	78.5
END	48.38	11.01	533.0	10.86	368.2	418.6	78.5

Tabla 1: Características nominales del motor utilizado como generador.

Aunque la tabla 1 corresponde a un funcionamiento como motor a una cierta velocidad, se puede esperar eficiencias similares cuando el motor funcione como generador. Es más, como los transformadores tienen mayor rendimiento que los convertidores electrónicos, se estima que el rendimiento del conjunto generador más transformadores sea igual o superior al nominal (78,5%) en un amplio margen de utilización.

Las pérdidas aerodinámicas del generador ya están incluidas en el rendimiento de la tabla 1. El resto de partes móviles giran muy despacio y la fricción aerodinámica importantes pequeña comparada con otras pérdidas. Por ejemplo, cuando el indicador de la bicicleta marca 50 km/h, la velocidad lineal en extremo del generador es 18,3 km/h y la de la cadena es 4,23 km/h.

El cableado entre el generador y el analizador de redes es corto y las pérdidas en esta parte no se han considerado por simplicidad. Mientras las corrientes no sean muy elevadas, se puede obviar que las pérdidas debido a la resistencia de los conductores dependen del cuadrado de la corriente.

Teniendo en cuenta que el rendimiento de una transmisión por cadena de bicicleta tiene

un rendimiento entre el 90% y el 98.6 % según (Spicer, 2001)³. Cuanta más potencia se transmite y menor es la cadencia, mayor es la tensión de la cadena y menores son las pérdidas en la transmisión. Para una potencia transmitida de 200 W y una cadencia de 60 rpm con un desarrollo muy próximo al utilizado, el rendimiento es del 98% según la tabla 1 de dicho artículo. (Spicer, 1999)⁴ también indica cómo se podría hacer un sistema para medir la eficiencia del prototipo desarrollado para la actividad.

- Rendimiento del generador eléctrico más los transformadores: 78%
- Rendimiento de la transmisión por cadena: 98%
- Rendimiento global estimado: $0,78 \cdot 0,98 = 0,76$ (76%)

Para cargas por debajo de 100 W o corrientes (en el lado de utilización) superiores al medio amperio, el rendimiento real será algo menor del 76%. Para el resto de casos, la aproximación de un rendimiento global del 76% es todo el rango de utilización es suficientemente precisa para esta aplicación didáctica.

Coste económico de los materiales del prototipo

El coste de los materiales empleados en el prototipo viene resumido en la tabla 1. No se ha incluido el coste del analizador trifásico que aparece en la figura 4 junto a los interruptores de las cargas, puesto que es un equipo de repuesto de prácticas y que se adquirió en enero de 2012 por 228,30 €. El prototipo ha sido sufragado íntegramente por el Centro Universitario de la Defensa (CUD), excepto el generador, que ha sido una donación de uno de los integrantes del equipo.

Materiales	Importe
Bicicleta spinning	269,9
Generador eléctrico	173,48
Material de ferretería	271,29
Material eléctrico	383,55
Total:	1089,22

Tabla 2: Resumen del coste del sistema, excluido el analizador trifásico y el coste de la mano de obra.

La tabla 2 no incluye la mano de obra. La realización del prototipo ha sido bastante laboriosa por el tiempo dedicado al diseño del equipo, la búsqueda de materiales y porque frecuentemente ha sido necesario hacer pruebas de ensayo y error hasta que el prototipo funcionase adecuadamente. El tiempo necesario para diseñar y crear este prototipo está cerca de 100 h.

Algunos materiales de ferretería y eléctricos, después de haber sido comprados no se pudieron utilizar porque se vio a posteriori que no eran adecuados o que había

³ Spicer, J. B.; Richardson, C. J. K, Ehrlich, M. J.; Bernstein, J. R., Fukuda, M.; Terada, M. "Effects of Frictional Loss on Bicycle Chain Drive Efficiency", Transactions of the ASME, Vol. 123, DECEMBER 2001, pp. 598-605.

⁴ Spicer, James (1999-08-19). "[Pedal Power Probe Shows Bicycles Waste Little Energy](#)". Retrieved 2012-07-06.



soluciones mejores. El ahorro que se habría obtenido si se hubiera acertado a la primera en la compra de materiales es similar al coste del analizador trifásico, por lo que se podría replicar el sistema con el importe que indica la tabla 2 y unas 30 h de trabajo.

No se puede comparar directamente el coste de materiales de la tabla 2 con sistemas comerciales, ya que dichos sistemas también deberían ser adaptados para hacer la práctica, con el consiguiente gasto de tiempo y materiales.

Futuras mejoras

Dentro de las posibles mejoras del prototipo, se propone continuar con las siguientes líneas de trabajo:

- Conectar eléctricamente un disco de inercia mediante un motor síncrono de imanes permanentes en funcionamiento “synchro”. Esta inercia serviría para ilustrar el papel tan importante que tienen las inercias mecánicas en la estabilidad de una red eléctrica.
- Conectar con una cadena el disco de inercia a la corona de piñones del generador. Este disco de inercia se sujetaría mediante tirantes. Su función sería estabilizar la tensión del generador, que se ve afectada por la posición de máximo/mínimo par en los pedales.
- Cambiar a un sillín de los que se utilizan en bicicletas de paseo, con un coste inferior a los 25 €. Algunos usuarios de la bicicleta se han quejado del sillín tan estrecho que lleva, que es de bicicleta de carretera. Estos sillines son cómodos cuando la espalda está casi horizontal y el ciclista está acostumbrado a pasar muchas horas en la bicicleta, pero no tiene sentido en una bicicleta estática que se va a utilizar un rato. Con las manos sobre los sensores cardiacos del manillar, la posición es bastante erguida y el apoyo correcto de los huesos isquiotibiales en esa posición, tanto en hombres como en mujeres, requiere un sillín más ancho.

El prototipo actual genera una red trifásica, aspecto que se ve en el penúltimo tema de la asignatura. A esas alturas del curso, los alumnos están muy estresados pensando en los exámenes finales del cuatrimestre y no tienen mucho tiempo para actividades voluntarias como las que se plantea en este proyecto. Por ello, sería deseable construir otra versión que funcionase en corriente continua para ilustrar la potencia en los primeros temas de la asignatura (de hecho, uno de los profesores involucrados en esta actividad está dirigiendo un proyecto fin de carrera en este sentido). Este prototipo de corriente continua podría estar asociado a una batería que ilustrase el fenómeno de la acumulación electroquímica de energía y que haría el papel análogo a la energía cinética de rotación en una red eléctrica de corriente alterna. Esta actividad tendría mejor acogida porque se realizaría durante el mes de marzo-abril, cuando los alumnos no están tan preocupados por los exámenes finales.



Anexo II – Guion de la actividad

Efectos fisiológicos de la realización de un esfuerzo físico

Las fuentes de energía tienen una gran importancia. Si sólo dispusiésemos de energía de origen animal y humano, nuestro nivel de vida retrocedería varios siglos. La primera revolución industrial se produjo a finales del siglo XVIII cuando se reemplazó la fuerza animal por fuentes de energía fósiles.

En aquella época se estableció una unidad para la medición de la potencia de las máquinas de vapor llamada *caballo de vapor* (CV). Mediante experimentos se determinó que un caballo podía desarrollar de forma continuada una potencia equivalente a levantar 76 kg hasta una altura de 1 metro en un segundo (1 CV = 735 W en unidades del sistema internacional). En el sistema inglés equivale a 33,000 pies libra de trabajo por minuto y su abreviatura es HP (1 HP = 746 W).

Cuando una persona experimenta el gran esfuerzo físico necesario para generar una potencia entre 200 W y 300 W (un tercio de la potencia que desarrollaría un caballo de forma continua), comprende la gran importancia económica, política y estratégica de la energía. La actividad propuesta también trata de inculcar el valor del ahorro energético, ya que la energía que no contamina es la que no se utiliza.

Dentro del entrenamiento deportivo, las pruebas de esfuerzo sirven para planificar entrenamientos y dosificar las fuerzas en pruebas deportivas.

El *umbral funcional de potencia* es la potencia media que el ciclista es capaz de desarrollar durante una hora, rodando a tope. Por ejemplo, Induráin era capaz de desarrollar 510 vatios durante una hora. Como la prueba es bastante exigente, se pueden establecer la potencia media, haciendo el mismo esfuerzo en 20 minutos y multiplicando por 0,93 el valor medido para equiparlo a esa hora de esfuerzo.

El *umbral aeróbico* es el máximo ritmo cardiaco que se puede mantener de forma sostenida y puede calcularse de forma aproximada con la siguiente fórmula:

$$\text{Umbral aeróbico} = \text{pulso}_{\text{reposo}} + 0,8 (220 - \text{edad} - \text{pulso}_{\text{reposo}})$$

donde la edad se expresa en años, el pulso en reposo corresponde a la frecuencia cardiaca mínima, que se alcanza una hora antes de despertarse. La constante 0,8 se debe a que durante un ejercicio aeróbico intenso, el ritmo cardiaco es el 80% de la reserva cardiaca (diferencia entre la mínima y máximas frecuencias cardiacas)

El umbral aeróbico se puede conocer con más precisión midiendo la concentración de lactato en la sangre y las pulsaciones cardiacas durante la realización de un esfuerzo. El deportista se coloca en un cicloergómetro para controlar la potencia desarrollada, aumentando lentamente la resistencia al pedaleo, con el consecuente aumento de pulso y concentración de lactato en sangre. Al ir aumentando la intensidad del ejercicio, la producción de ácido láctico y su concentración en sangre va aumentando.

Un médico deportivo monitoriza la frecuencia cardiaca y va extrayendo gotas de sangre del lóbulo de la oreja del deportista. Cuando la concentración de lactato en sangre no



supera los 2 milimoles por litro de sangre, el ácido láctico generado en los músculos se recicla totalmente y el nivel de esfuerzo se mantiene durante un largo tiempo. Cuando la concentración de lactato en sangre supera los 4 mMol/l, el lactato se va acumulando y de persistir la intensidad del ejercicio, el ácido láctico aumentaría hasta bloquear los músculos por acidosis. El umbral aeróbico es la frecuencia cardíaca cuando la concentración de lactato se dispara (entre 2 mMol/l y 4 mMol/l).

La *cadencia de pedaleo* es el número de revoluciones que dan los pedales en un minuto. Cada ciclista tiene una cadencia preferida para cada nivel de esfuerzo, que depende de su constitución y forma física, tipo de entrenamiento u otros deportes que suele practicar, etc. Los ciclistas amateurs y profesionales prefieren cadencias altas porque castigan menos los músculos a costa de hacer trabajar más al sistema cardiovascular. Esto les permite mantener el nivel de esfuerzo las horas que dura una prueba ciclista. La mayoría de ciclistas aficionados prefieren unas cadencias entre 60 y 80 rpm y los que practican este deporte con asiduidad prefieren cadencias mayores, entre 80 y 100 rpm. Durante un sprint, la cadencia es mucho mayor para desarrollar la máxima potencia que permiten los músculos durante un corto tiempo. En un puerto no muy largo, la cadencia suele ser un poco más baja que en el llano para disminuir el consumo de oxígeno, pues los ciclistas pueden recuperarse durante la bajada.

Durante cada ejercicio de esta actividad es conveniente mantener una velocidad de pedaleo lo más constante posible porque la tensión y la frecuencia del generador varían proporcionalmente con la cadencia. Si no se mantiene la velocidad constante, los datos deberían ser tratados para compensar este efecto.

Aspectos energéticos asociados a la actividad

Un concepto importante en Electrotecnia es el flujo de potencia de un circuito eléctrico. Por ejemplo, muchas cargas eléctricas se caracterizan con la potencia que consumen cuando se conectan a una determinada diferencia de potencial. Las corrientes que circulan por redes eléctricas se suelen resolver planteando las ecuaciones correspondientes al balance de potencias.

Al mismo tiempo, el sistema de engranajes de la bicicleta sirve para ilustrar el transformador eléctrico. En bastantes sistemas físicos, la potencia transmitida es el producto de dos magnitudes que se pueden transformar: fuerza por velocidad, par por velocidad angular, diferencia de presión por caudal, diferencia de potencial por corriente, etc. En una bicicleta, la potencia mecánica transmitida es el producto de la tensión de la cadena por su velocidad. En los pedales de una bicicleta se tiene un par elevado pero una baja velocidad de rotación (cadencia de pedaleo) y en el generador se tiene una velocidad de rotación mayor a costa de reducir el par proporcionalmente a la relación de dientes.

Análogamente, la potencia transformada eléctricamente es el producto de la diferencia de potencial en los bornes de alta o baja tensión por la corriente que circula por ellos. La relación de transformación eléctrica es el ratio de espiras entre el primario y secundario, en vez del ratio del número de dientes.



Ejercicio 1. Constantes geométricas del sistema.

La bicicleta cuenta con un tacómetro, que indicaría la velocidad que llevaría una bicicleta con desarrollo 54 dientes en plato y 14 dientes en piñón y rueda estándar de 0,668 m de diámetro.

- ¿Cuál es la circunferencia de la rueda?
 - Circunferencia =
- ¿Por qué factor tenemos que multiplicar la indicación del velocímetro para obtener las revoluciones por minuto del generador?
 - $K_{\text{generador,rpm}} = \dots\dots\dots \text{rpm}/(\text{km/h})$
- ¿Por qué factor tenemos que multiplicar la indicación del velocímetro para obtener la cadencia de pedaleo en revoluciones por minuto?
 - $K_{\text{cadencia,rpm}} = \dots\dots\dots \text{rpm}/(\text{km/h})$

Pedalear con un ritmo constante y comprobar el factor entre el velocímetro y las revoluciones del generador midiendo con un tacómetro de prácticas (enfocar a la pegatina reflectante que está pegada en el borde de los piñones del generador).

- Velocidad en la pantalla de la bicicleta: $v = \dots\dots\dots \text{km/h}$
- Revoluciones por minuto del generador medidas con el tacómetro de mano: $RPM_{\text{generador,tacómetro}} = \dots\dots\dots \text{rpm}$
- Comprobación: $v \cdot K_{\text{generador,rpm}} = \dots\dots\dots \text{rpm}$

Pedalear con un ritmo constante y comprobar que la cadencia está entre 45 y 100 rpm (rango típico de cadencia).

- Velocidad en la pantalla de la bicicleta: $v = \dots\dots\dots \text{km/h}$
- Cadencia: $v \cdot K_{\text{cadencia,rpm}} = \dots\dots\dots \text{rpm}$
- ¿A qué velocidad se debe pedalear para tener una cadencia de 90 rpm?
 $v_{\text{cadencia 90 rpm}} = \dots\dots\dots / \dots\dots\dots = \dots\dots\dots \text{km/h}$

El generador tiene 25 pares de polos. ¿Cuál es la relación entre la frecuencia de la red trifásica generada y la velocidad de giro del generador en rpm?

- $K_{\text{Hz,rpm}} = \dots\dots\dots / \dots\dots\dots = \dots\dots\dots \text{Hz}/(\text{rpm})$

¿Cuál es la relación entre la velocidad indicada en la pantalla de la bicicleta y la frecuencia de la red trifásica generada?

- $K_{\text{Hz,km/h}} = \dots\dots\dots / \dots\dots\dots = \dots\dots\dots \text{Hz}/(\text{km/h})$

Comprobar los resultados midiendo con un polímetro la frecuencia en bornes del generador y con un tacómetro la velocidad del generador. El multímetro de prácticas admite tensiones hasta 170 V. Para no sobrepasarla, medir la frecuencia en los terminales de baja tensión de los transformadores o utilizar un divisor de tensión.

- Frecuencia medida con el multímetro $f = \dots\dots\dots \text{Hz}$
- Revoluciones por minuto del generador medidas con el tacómetro de mano: $RPM_{\text{generador,tacómetro}} = \dots\dots\dots \text{rpm}$
- $f / K_{\text{Hz,rpm}} = \dots\dots\dots / \dots\dots\dots = \dots\dots\dots \text{Hz}/(\text{rpm})$
- Velocidad en la pantalla de la bicicleta: $v = \dots\dots\dots \text{km/h}$
- $v / K_{\text{Hz,rpm}} = \dots\dots\dots / \dots\dots\dots = \dots\dots\dots \text{Hz}/(\text{km/h})$

Ejercicio 2. Iluminación de tres tubos fluorescentes durante 10 minutos.

En este ejercicio mide el efecto fisiológico del esfuerzo y mide los parámetros eléctricos cuando se iluminan tres tubos fluorescentes.

- Anotar el pulso al inicio y comenzar a pedalear.
 - *Pulso inicial* =pulsaciones por minuto (ppm)
- Oprime el botón Reset del analizador para poner a cero el contador de energía y conectar la carga de 3 tubos fluorescentes.
- Anotar el pulso (pulsaciones por minuto) al inicio y cada 2 minutos hasta completar 10 minutos de ejercicio.
 - *Pulso*_{2min} =ppm
 - *Pulso*_{4min} =ppm
 - *Pulso*_{6min} =ppm
 - *Pulso*_{8min} =ppm
 - *Pulso*_{10min} =ppm
- ¿Se ha estabilizado el pulso durante la prueba? Si es así, anotar cuánto tiempo ha tardado:.....

Ejercicio 3. Influencia de la frecuencia en la red. Tres tubos fluorescentes

En este ejercicio se mide la tensión, la corriente y la potencia activa y reactiva que indica el analizador de redes para tres cadencias de pedaleo, empezando por una velocidad rápida para ir disminuyendo hasta que casi se apagan los tubos fluorescentes.

- Pedalear hasta conseguir que la velocidad en la pantalla de la bicicleta sea 40 km/h aproximadamente y que se iluminen tres tubos fluorescentes. Apuntar los valores correspondientes a ese ritmo.
 - Tensión de fase-neutro: $U_{\text{fase},50\text{km/h}} = \dots\dots\dots \text{V}$
(promedio de las tres fases)
 - Tensión de línea: $U_{\text{línea},50\text{km/h}} = \dots\dots\dots \text{V}$
(promedio de las tres fases)
 - Corriente de línea: $I_{\text{línea},50\text{km/h}} = \dots\dots\dots \text{A}$
(promedio de las tres fases)
 - Potencia activa trifásica: $P_{\text{III},50\text{km/h}} = \dots\dots\dots \text{kW}$
 - Potencia reactiva trifásica: $Q_{\text{III},50\text{km/h}} = \dots\dots\dots \text{kvar}$
- Disminuir la cadencia hasta conseguir que la velocidad en la pantalla de la bicicleta sea 40 km/h aproximadamente y que se iluminen tres tubos fluorescentes. Apuntar los valores correspondientes a ese ritmo.
 - Tensión de fase-neutro: $U_{\text{fase},40\text{km/h}} = \dots\dots\dots \text{V}$
(promedio de las tres fases)
 - Tensión de línea: $U_{\text{línea},40\text{km/h}} = \dots\dots\dots \text{V}$
(promedio de las tres fases)
 - Corriente de línea: $I_{\text{línea},40\text{km/h}} = \dots\dots\dots \text{A}$
(promedio de las tres fases)
 - Potencia activa trifásica: $P_{\text{III},40\text{km/h}} = \dots\dots\dots \text{kW}$
 - Potencia reactiva trifásica: $Q_{\text{III},40\text{km/h}} = \dots\dots\dots \text{kvar}$

- Disminuir la cadencia hasta conseguir que la velocidad en la pantalla de la bicicleta sea 30 km/h aproximadamente y que se iluminen tres tubos fluorescentes. Apuntar los valores correspondientes a ese ritmo.
 - Tensión de fase-neutro: $U_{\text{fase},30\text{km/h}} = \dots\dots\dots$ V
(promedio de las tres fases)
 - Tensión de línea: $U_{\text{línea},30\text{km/h}} = \dots\dots\dots$ V
(promedio de las tres fases)
 - Corriente de línea: $I_{\text{línea},30\text{km/h}} = \dots\dots\dots$ A
(promedio de las tres fases)
 - Potencia activa trifásica: $P_{\text{III},30\text{km/h}} = \dots\dots\dots$ kW
 - Potencia reactiva trifásica: $Q_{\text{III},30\text{km/h}} = \dots\dots\dots$ kvar

Rellenar la siguiente tabla a partir de los datos anteriores.

Velocidad	50 km/h	40 km/h	30 km/h
U_{fase}	V	V	V
U_{fase} / v	V/(km/h)	V/(km/h)	V/(km/h)
$I_{\text{línea}}$	A	A	A
$Z_Y = U_{\text{fase}} / I_{\text{línea}}$	Ω	Ω	Ω
P_{III}	kW	kW	kW
Q_{III}	kvar	kvar	kvar
Q_{III} / v	var/(km/h)	var/(km/h)	var/(km/h)

La tensión U_{fase} ...

- a) Es proporcional a la velocidad
- b) Tiene una relación cuadrática con la velocidad
- c) Es inversamente proporcional a la velocidad
- d) No depende de la velocidad

La corriente I_{fase} ...

- a) Es proporcional a la velocidad
- b) Tiene una relación cuadrática con la velocidad
- c) Es inversamente proporcional a la velocidad
- d) No depende de la velocidad

La potencia activa P_{III} ...

- a) Es proporcional a la velocidad
- b) Tiene una relación cuadrática con la velocidad
- c) Es inversamente proporcional a la velocidad
- d) No depende de la velocidad

La potencia reactiva Q_{III} ...

- a) Es proporcional a la velocidad
- b) Tiene una relación cuadrática con la velocidad
- c) Es inversamente proporcional a la velocidad
- d) No depende de la velocidad

Explica el efecto del balasto de las luminarias en la corriente y en la potencia reactiva.



¿Qué potencia mecánica media se está entregando en pedales si el rendimiento global del sistema es del 76%?

¿Cuál es el par de fuerzas ejercido en los pedales a una velocidad de 40 km/h? Tomar como dato que el piñón tiene 14 dientes y que el plato tiene 54 dientes.

¿Cuál será la fuerza que ejerce el ciclista sobre un pedal, cuyo eje está a 175 mm del eje del pedalier, si la fuerza es vertical y la posición de las bielas es horizontal?

¿Cuál es la tensión en la cadena cuando la bicicleta una velocidad de 40 km/h? Tomar como dato que el paso de la cadena es media pulgada y que el piñón tiene 14 dientes (7 pulgadas de circunferencia).

Ejercicio 4. Influencia de la potencia reactiva en la tensión. Carga capacitiva.

En este ejercicio se estudia el efecto de la energía capacitiva en la tensión. El banco trifásico de condensadores no consume potencia activa, por lo que la variación de tensión al conectarlo se debe a la potencia reactiva que ceden.

En una red monofásica con una impedancia del equivalente Thévenin $Z_{eq} = R_{eq} + j X_{eq}$ y una tensión a circuito abierto U_0 , la disminución de la tensión al conectar una carga monofásica que absorbe una potencia activa P_I y una potencia reactiva Q_I es:

$$\Delta U = (R_{eq} P_I + X_{eq} Q_I) / U_0$$

(modelo lineal de la disminución de la tensión en una red monofásica al conectar una carga)

El criterio de signos es:

- la potencia reactiva es positiva ($Q > 0$) si la carga es inductiva y negativa ($Q < 0$) si la carga es capacitiva.
- La potencia activa es positiva ($P > 0$) si es consumida por las cargas. P sólo puede ser negativa si existe un generador u otra red que inyecta potencia activa a el punto considerado.

Si la red es trifásica y trabajamos con el equivalente Thévenin en estrella y la tensión de fase a neutro en circuito abierto es $U_{0, fase}$, la disminución de la tensión al conectar una carga trifásica que absorbe una potencia activa P_{III} y una potencia reactiva Q_{III} es:

$$\Delta U_{fase} = (R_{eq} P_{III} + X_{eq} Q_{III}) / (3U_{0, fase})$$

(disminución aproximada de la tensión de fase en una red trifásica)

Un banco de condensadores no consume energía activa ($P_{III} = 0$) y la potencia reactiva que absorbe de la red es $Q_{III} = -3 C \omega U_C^2$, donde la pulsación de red es $\omega = 2 \pi f$.

- Pedalear hasta conseguir que la velocidad en la pantalla de la bicicleta sea aproximadamente 50 km/h.
 - Tensión de fase-neutro en vacío: $U_{0,fase,50km/h} = \dots\dots\dots V$ (promedio de las tres fases)
 - Tensión de fase-neutro con el banco de condensadores conectados: $U_{C,fase,50km/h} = \dots\dots\dots V$ (promedio de las tres fases)
 - Corriente de línea con el banco de condensadores conectados: $I_{C,línea,50km/h} = \dots\dots\dots A$ (promedio de las tres fases)
 - Potencia reactiva trifásica: $Q_{III,50km/h} = -\dots\dots\dots \text{kvar}$
- Pedalear hasta conseguir que la velocidad en la pantalla de la bicicleta sea 40 km/h aproximadamente y apuntar los siguientes valores.
 - Tensión de fase-neutro en vacío: $U_{0,fase,40km/h} = \dots\dots\dots V$ (promedio de las tres fases)
 - Tensión de fase-neutro con el banco de condensadores conectados: $U_{C,fase,40km/h} = \dots\dots\dots V$ (promedio de las tres fases)
 - Corriente de línea con el banco de condensadores conectados: $I_{C,línea,40km/h} = \dots\dots\dots A$ (promedio de las tres fases)
 - Potencia reactiva trifásica: $Q_{III,40km/h} = -\dots\dots\dots \text{kvar}$
- Disminuir la cadencia hasta conseguir que la velocidad en la pantalla de la bicicleta sea 30 km/h aproximadamente y apuntar los siguientes valores.
 - Tensión de fase-neutro en vacío: $U_{0,fase,30km/h} = \dots\dots\dots V$ (promedio de las tres fases)
 - Tensión de fase-neutro con el banco de condensadores conectados: $U_{C,fase,30km/h} = \dots\dots\dots V$ (promedio de las tres fases)
 - Corriente de línea con el banco de condensadores conectados: $I_{C,línea,30km/h} = \dots\dots\dots A$ (promedio de las tres fases)
 - Potencia reactiva trifásica: $Q_{III,30km/h} = -\dots\dots\dots \text{kvar}$

Construir la siguiente tabla a partir de los datos anteriores.

Velocidad	50 km/h	40 km/h	30 km/h
$U_{0,fase}$ (en vacío)	V	V	V
$U_{C,fase}$ (con condensadores)	V	V	V
$\Delta U_{fase} = U_{0,fase} - U_{C,fase}$	-	V	-
Q_{III}	-	kvar	-
$X_{eq} = 3 U_{0,fase} \Delta U_{fase} / Q_{III}$	Ω	Ω	Ω
$f = v K_{Hz,km/h}$	Hz	Hz	Hz
$L_{eq} = X_{eq} / \omega$	H	H	H

La potencia reactiva Q_{III} ...

- a) Es proporcional a la velocidad
- b) Tiene una relación cuadrática con la velocidad
- c) Tiene una relación cúbica con la velocidad
- d) No depende de la velocidad

Ejercicio 5. Influencia de la potencia activa en la tensión. Carga resistiva.

En este ejercicio se estudia el efecto de la energía activa en la tensión debido a 6 bombillas incandescentes⁵. En este caso la potencia reactiva Q_{III} es nula y la disminución de la tensión al conectar las bombillas que absorben una potencia activa P_{III} y una potencia reactiva Q_{III} nula es:

$$\Delta U_{fase} = (R_{eq} P_{III} + X_{eq} \emptyset) / (3U_{0,fase}) = (R_{eq} P_{III}) / (3U_{0,fase})$$

La potencia activa que absorbe de la red es $P_{III} = U_R^2 / R_{bomb}$, donde la tensión en las bombillas U_R es aproximadamente proporcional a la frecuencia f .

- Pedalear hasta conseguir que la velocidad en la pantalla de la bicicleta sea 40 km/h aproximadamente y apuntar los siguientes valores.
 - Tensión de fase-neutro con las bombillas conectadas:
 $U_{R,fase,40km/h} = \dots\dots\dots V$ (promedio de las tres fases)
 - Corriente de línea con las bombillas conectadas:
 $I_{R,linea,40km/h} = \dots\dots\dots A$ (promedio de las tres fases)
 - Potencia activa trifásica: $P_{III,40km/h} = \dots\dots\dots kW$
- Disminuir la cadencia hasta conseguir que la velocidad en la pantalla de la bicicleta sea 30 km/h aproximadamente y apuntar los siguientes valores.
 - Tensión de fase-neutro con las bombillas conectadas:
 $U_{R,fase,30km/h} = \dots\dots\dots V$ (promedio de las tres fases)
 - Corriente de línea con las bombillas conectadas:
 $I_{R,linea,30km/h} = \dots\dots\dots A$ (promedio de las tres fases)
 - Potencia activa trifásica: $P_{III,30km/h} = \dots\dots\dots kW$
- Disminuir la cadencia hasta conseguir que la velocidad en la pantalla de la bicicleta sea aproximadamente 20 km/h.
 - Tensión de fase-neutro con las bombillas conectadas:
 $U_{R,fase,20km/h} = \dots\dots\dots V$ (promedio de las tres fases)
 - Corriente de línea con las bombillas conectadas:
 $I_{R,linea,20km/h} = \dots\dots\dots A$ (promedio de las tres fases)
 - Potencia activa trifásica: $P_{III,20km/h} = \dots\dots\dots kW$

Construir la siguiente tabla a partir de los datos anteriores.

Velocidad	40 km/h	30 km/h	20 km/h
$U_{0,fase}$ (en vacío)	V	V	V
$U_{R,fase}$ (con condensadores)	V	V	V
$\Delta U_{fase} = U_{0,fase} - U_{R,fase}$	V	V	V
P_{III}	kW	kW	kW
$R_{eq} = 3 U_{0,fase} \Delta U_{fase} / P_{III}$	Ω	Ω	Ω

⁵ Las bombillas parpadean debido a la cadencia de pedaleo. Cuando las bielas están en posición horizontal, ejercemos máximo par en los pedales y aceleramos el generador, aumentando la tensión en las bombillas. Cuando las bielas están verticales, el par se hace nulo, el generador gira más lento y disminuye la tensión. Dado que el flujo luminoso proporcionado por bombillas incandescentes depende mucho de la tensión, se percibe esa modulación de la luminosidad.

La potencia activa P_{III} ...

- Es proporcional a la velocidad
- Tiene una relación cuadrática con la velocidad
- Tiene una relación cúbica con la velocidad
- No depende de la velocidad

Ejercicio 6. Influencia de la frecuencia en la red. Tres tubos fluorescentes

En este ejercicio se estudia el efecto de la energía activa en la tensión debido a tres tubos fluorescentes. Esta carga consume potencia activa P_{III} y potencia reactiva Q_{III} . Dado que los parámetros R_{eq} y L_{eq} son conocidos, se puede aplicar la siguiente relación:

$$\Delta U_{fase} = (R_{eq} P_{III} + \omega L_{eq} Q_{III}) / (3U_{0,fase})$$

Construir la siguiente tabla a partir de los datos del ejercicio 3.

Velocidad	40 km/h	30 km/h	20 km/h
$U_{0,fase}$ (en vacío)	V	V	V
$U_{C,fase}$ (con 3 tubos)	V	V	V
$\Delta U_{fase} = U_{0,fase} - U_{T,fase}$	V	V	V
P_{III}	kW	kW	kW
Q_{III}	kvar	kvar	kvar
$(R_{eq} P_{III} + \omega L_{eq} Q_{III}) / (3U_{0,fase})$	V	V	V

Ejercicio 7. Límite aeróbico con seis tubos y un banco de condensadores

En este ejercicio analiza el pulso y los parámetros eléctricos cuando se iluminan seis tubos fluorescentes, *con el banco de condensadores conectado*. El esfuerzo es el doble que en el ejercicio 2 y se puede alcanzar el límite aeróbico.

Si se superan 170 pulsaciones por minuto (umbral aeróbico aproximado de una persona de 20 años), descansar un minuto o disminuir la cadencia para no superar el límite anaeróbico. Si se supera dicho límite, los músculos empezarán a agarrotarse por la excesiva carga, tal como ocurriría durante un sprint, en el cual un ciclista desarrolla una potencia elevada pero que sólo es capaz de mantener durante un tiempo corto. Tener en cuenta que la frecuencia cardiaca máxima de una persona de 20 años suele estar alrededor de 200 pulsaciones.

- Anotar el pulso al inicio y comenzar a pedalear con los condensadores y los 6 tubos conectados.
 - $Pulso_{inicial} = \dots\dots\dots$ pulsaciones por minuto (ppm)
- Anotar el pulso al inicio y cada 2 minutos hasta completar 10 minutos de ejercicio. Utilizar una cadencia cómoda.
 - $Pulso_{2min} = \dots\dots\dots$ ppm
 - $Pulso_{4min} = \dots\dots\dots$ ppm
 - $Pulso_{6min} = \dots\dots\dots$ ppm

- $Pulso_{8min} = \dots\dots\dots ppm$
- $Pulso_{10min} = \dots\dots\dots ppm$
- ¿Se ha estabilizado el pulso durante la prueba? Si es así, anotar cuánto tiempo ha tardado:.....
- ¿Qué potencia activa se desarrolla con los 6 tubos fluorescentes y los condensadores?
 $P_{III} = \dots\dots\dots kW$
- ¿A qué velocidad se consigue que la potencia reactiva sea nula?
 $v_{Q=0} = \dots\dots\dots m/s$
- Estimar mediante una regla de 3 la potencia eléctrica que se podría generar sin sobrepasar su límite aeróbico (si el alumno no conoce con precisión su umbral aeróbico, utilizar el valor aproximado de 170 pulsaciones).
- Suponiendo un rendimiento global del 76%, ¿qué potencia mecánica podría desarrollar en el límite aeróbico?

Ejercicio 8. Oscilaciones de par debido a cargas trifásicas desequilibradas.

- Conectar la carga de sólo 2 bombillas. Esto es un ejemplo de carga desequilibrada porque las dos bombillas se alimentan en serie desde dos fases, sin absorber corriente de la tercera fase.
- ¿Se nota una vibración en los pedales mayor que en los apartados anteriores⁶?

Ejercicio 9. Importancia estratégica de la energía.

La energía es un bien escaso y tiene una gran importancia geopolítica. La energía nos puede parecer cara, pero la maqueta enseña lo que cuesta generar una pequeña potencia. Si nos acogiéramos al régimen de productores de energías renovables del artículo 2 del Real Decreto 661/2007, el precio de la energía generada para el 2012 de “centrales” que utilicen como combustible residuos sólidos urbanos (grupo c.1), es 0,09 €/kWh. Calcular el pago por estar iluminando 6 tubos fluorescentes durante una hora.

¿Cuál es el coste económico de la energía generada desde que se puso a cero en el ejercicio 2 el contador de energía del analizador trifásico?

Cita al menos dos efectos geopolíticos que crearía una escasez repentina de energía primaria fósil y nuclear.

⁶ El par electromagnético interno en el generador deja de ser constante cuando la carga no es equilibrada. Esto produce una oscilación en el par del alternador de la misma frecuencia que la red trifásica generada, que se puede sentir en los pies, salvo que se lleven botas con la suela muy gruesa.

Índice

RESUMEN	2
CONTEXTO DE LA ACTIVIDAD	3
OBJETIVOS DE LA ACTIVIDAD	3
DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD	4
CARGA DE TRABAJO DE LA ACTIVIDAD	5
Tiempo empleado por los profesores.....	5
Estimación de la carga de trabajo de los alumnos	5
RESULTADOS Y EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD	6
Anexo I - descripción del prototipo	7
Introducción.....	7
Modelos comerciales	8
Prototipo desarrollado	10
Estimación del rendimiento del sistema	12
Coste económico de los materiales del prototipo	14
Futuras mejoras	15
Anexo II – Guion de la actividad.....	16
Efectos fisiológicos de la realización de un esfuerzo físico	16
Aspectos energéticos asociados a la actividad	17
Ejercicio 1. Constantes geométricas del sistema.....	18
Ejercicio 2. Iluminación de tres tubos fluorescentes durante 10 minutos.	19
Ejercicio 3. Influencia de la frecuencia en la red. Tres tubos fluorescentes.....	19
Ejercicio 4. Influencia de la potencia reactiva en la tensión. Carga capacitiva.....	21
Ejercicio 5. Influencia de la potencia activa en la tensión. Carga resistiva.....	23
Ejercicio 6. Influencia de la frecuencia en la red. Tres tubos fluorescentes.....	24
Ejercicio 7. Límite aeróbico con seis tubos y un banco de condensadores	24
Ejercicio 8. Oscilaciones de par debido a cargas trifásicas desequilibradas.	25
Ejercicio 9. Importancia estratégica de la energía.....	25
Índice	26