

Analogías para comprender la electricidad



Efraim Centeno Hernández

Ingeniero del ICAI (1991) y Doctor UPCO (1998). Subdirector del IIT y Profesor del Dpto. de Electrotecnia del ICAI.



Javier Reneses Guillén

Ingeniero del ICAI (1996) y Doctor UPCO (2004). Licenciado en Matemáticas por UNED (2005). Investigador del IIT del ICAI, donde también imparte clases.



Juan José Sánchez Domínguez

Ingeniero del ICAI (2002). Investigador en formación del IIT, donde desarrolla su tesis doctoral.

Comentarios a:
comentarios@icai.es

Los conceptos eléctricos, incluso los más elementales, resultan a menudo difíciles de entender para el público general. Por eso, casi cualquier ingeniero se ha visto alguna vez requerido para explicarlos de forma sencilla, sin recurrir a tecnicismos. Contestar a preguntas como: “¿y eso de la reactiva, qué es exactamente?”, supone un esfuerzo de imaginación, y también de paciencia, cuando han sido formuladas por personas sin formación técnica. Estamos convencidos de que hay que sacar la ciencia y la tecnología de los libros y de los laboratorios y divulgarlas lo más posible en todos los foros. Por ese motivo ofrecemos algunas ideas que pueden ayudarnos a salir airosos de esas situaciones, e incluso deleitar a quienes se interesan por nuestros temas, ilustrándoles en los misterios y las curiosidades de la ingeniería eléctrica. Nuestro auditorio se sorprenderá al saber que la corriente eléctrica se parece al agua, que un sistema eléctrico de potencia funciona igual que una bicicleta, o que la energía reactiva es como la espuma de la cerveza.

Este artículo presenta una pequeña recopilación de analogías que permiten explicar de una forma sencilla algunos aspectos de la electricidad, prescindiendo al máximo de las matemáticas. Desde principios básicos, como el motivo que hace que la corriente necesite al menos dos cables, hasta conceptos más complejos, como qué es la energía reactiva, se describen mediante comparaciones que ayudan a aclarar las ideas. Estos ejemplos pueden ser útiles al menos en tres tipos de ámbitos distintos en los que nos movemos los que trabajamos en la materia: el mundo de la empresa, el ambiente académico y también en entornos más informales, entre amigos y familiares.

En primer lugar, en las empresas, se presentan ocasiones en las que surge la necesidad de exponer algún aspecto del mundo eléctrico a un profesional que no domina la disciplina. En algunos casos, puede tratarse incluso de personas con estudios centrados exclusivamente en el campo de las humanidades. Algunos

ejemplos son: un ejecutivo de alto nivel sin formación eléctrica que tiene que decidir sobre asuntos con componente técnico, o un juez que tiene que dictaminar en algún pleito relativo a la electricidad, o un periodista que tiene que dar una información relativa al tema, de forma inteligible para sus lectores u oyentes. Recurrir a imágenes acertadas ayuda a comunicar los aspectos que pueden resultar ingratos y que de otra forma quedarán como detalles difíciles en los que se prefiere no entrar.

Un segundo ámbito en el que pueden necesitarse este tipo de ejemplos son las aulas de las escuelas de Ingeniería, en las que conviene ayudar a los alumnos a que, además de dominar los desarrollos matemáticos, se formen una visión “intuitiva” del funcionamiento de los dispositivos eléctricos. Es habitual que buenos alumnos, capaces de entender y dominar el comportamiento de elementos mecánicos complicados, tengan en cambio dificultades al abordar el estudio del electromagnetismo. En

sus propias palabras, los problemas eléctricos tienen el inconveniente de que “no se ve” lo que está ocurriendo.

Por último, la electricidad aparece en conversaciones informales y uno se encuentra de repente convertido en el entendido de la familia o entre los amigos, que tiene que explicar una noticia sobre un apagón, o el funcionamiento de un parque eólico que vemos junto a la carretera, o los pormenores de un recibo de la luz.

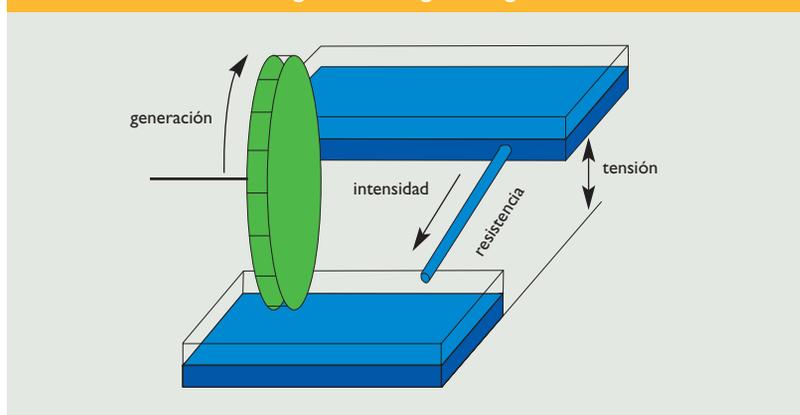
Las analogías que se presentan tienen distintos niveles de formalismo, que las pueden hacer adecuadas para distintas ocasiones. Algunas, como la semejanza entre la energía reactiva y la espuma de la cerveza son meras imágenes nada rigurosas, propias de charlas de café. Otras, como la equivalencia de un circuito eléctrico con un canal de agua, o de un sistema eléctrico de potencia con el transporte de galletas, o con una bicicleta tipo tándem, son comparaciones informales que, sin embargo, permiten ahondar en distintos puntos de forma comprensible para los profanos. Por último, también se presenta la analogía electromecánica, que permite escribir en detalle las ecuaciones de un circuito eléctrico a partir de las ecuaciones que rigen el funcionamiento de un dispositivo mecánico con un muelle y un amortiguador y, por tanto, conlleva un mayor nivel de formalismo.

La electricidad es como el agua

La explicación básica de los principios de la corriente eléctrica y de las magnitudes eléctricas más importantes puede realizarse aprovechando las similitudes entre las propiedades del agua y de la electricidad. Ésta es una analogía muy sencilla en la que sólo se señalan los aspectos más elementales del comportamiento del “fluido eléctrico”: tensión, corriente, resistencia y energía eléctrica. Puede ser estupenda para niños, o para quien nunca haya estudiado esta materia.

Comencemos con el concepto de tensión. Cuando afirmamos que entre las tomas de una batería de coche, por ejemplo, hay una tensión de doce voltios —abreviadamente, 12V— lo que queremos decir es que si conectamos un elemento capaz de conducir la electricidad —una bombilla, por ejemplo— entre ambos bornes, se producirá una circulación de corriente eléctrica. Esto es semejante a disponer de dos depósitos con agua situados a distinta altura. Inicialmente consideramos que no hay ninguna conexión entre los depósitos; sin embargo al existir una diferencia de cota, ésta hará circular

Figura 1. Analogía del agua



el agua si instalásemos una tubería entre ambos. La diferencia de altura existe y la podemos medir, aunque el agua no circule. Ésta es la idea que se aplica también a la tensión: puede haberla aunque no haya corriente eléctrica.

El siguiente concepto importante que se puede introducir es el de corriente o intensidad eléctrica. Continuando con los depósitos, si ahora efectivamente intercalamos una tubería entre el superior y el inferior, inmediatamente aparece un caudal de agua que corre a través de la misma. En nuestra comparación con la electricidad, esa circulación de agua es equivalente a la corriente eléctrica.

La cantidad de agua que circula depende de la diferencia de altura entre los depósitos, y también del grosor de la tubería que instalamos. Igualmente, la corriente que haga circular la batería dependerá de la tensión y, además, del componente que conectemos. Un elemento que oponga más resistencia al paso de la corriente será equivalente a una tubería estrecha, y por él circulará una intensidad pequeña, de pocos amperios —por ejemplo, la luz de la matrícula del coche—. Un equipo que oponga poca resistencia permitirá circular una mayor intensidad, como una tubería de mayor calibre, por ejemplo el motor de arranque. La unidad de medida de la corriente eléctrica se llama amperio. Para dar una idea, por una luz de freno circula alrededor de medio amperio (0,5 A, en forma abreviada) y cuando el motor arranca pueden circular del orden de cien veces más, estando ambos dispositivos conectados a la misma tensión, la que proporciona la batería.

Si además colocamos entre nuestros dos depósitos un dispositivo capaz de hacer volver el agua del depósito inferior al depósito superior, por ejemplo una noria movida por un caballo, tendremos al agua recorriendo

Tabla I. Analogía del agua

Elemento eléctrico	Elemento hidráulico
Tensión	Altura del salto
Intensidad	Caudal de agua
Resistencia	Tubería
Generador	Noria
Motor	Molino

un camino cerrado de forma continuada, que es lo que ocurre en un circuito eléctrico. Si no contáramos con la noria, nuestro tanque superior se vaciaría y el líquido elemento dejaría de fluir. En un circuito eléctrico éste es el papel que desempeñan una batería o un generador. Esto ilustra también el motivo por el que los dispositivos eléctricos necesitan tener dos terminales; la corriente eléctrica necesita una entrada y una salida para mantenerse en movimiento, igual que les ocurre a los caudales de agua (ver Figura 1).

La semejanza con el agua también puede usarse para ilustrar el concepto de generación o consumo de energía eléctrica. Hay equipos, como la noria, que mediante la energía mecánica que desarrolla el caballo producen circulación del agua, y por otro lado existen ingenios, como un molino, que colocados en la tubería de bajada son capaces de convertir la circulación del agua otra vez en movimiento. La noria es equivalente a un generador eléctrico y el molino es semejante a un motor (Tabla I).

Esta explicación tiene la ventaja de ser simple y muy gráfica; es posible incluso ampliarla para abordar otros conceptos como conexiones en serie y en paralelo. Sin embargo, presenta algunas dificultades. En primer lugar, aunque permite presentar de forma clara la Primera Ley de Kirchoff, no ayuda a comprender la segunda. Otra limitación es que no resulta aplicable cuando se trata de introducir el concepto de corriente alterna. Una imagen que puede ayudar parcialmente es el hecho de que tanto el movimiento de un río (corriente continua) como el flujo y reflujos de las olas en la orilla (corriente alterna) pueden ser utilizados mediante una turbina para obtener un movimiento útil.

La potencia eléctrica es como la mano de obra

Una de las confusiones más habituales entre los no iniciados en la electricidad se produce al emplear las unidades para referirse a la energía y la potencia eléctricas. Es frecuente en los medios de comunicación encontrar errores debidos al uso indebido de estas dos magnitud-

des. A continuación se propone cómo explicar el uso de estas unidades de forma divulgativa. Empezaremos con la presentación breve del significado de la energía y de la potencia, para continuar con la exposición de las unidades que permiten traducirlos a números y el uso de estas unidades en términos eléctricos.

Hay dos conceptos en juego, distintos pero relacionados: energía y potencia. Por un lado, la energía eléctrica se consume cuando de forma efectiva se realiza un trabajo con ella. Este trabajo puede consistir en elevar un peso con un motor; y usaremos por claridad este ejemplo, pero también puede tratarse de mantener una bombilla o una cocina vitrocerámica en funcionamiento. Energía y trabajo son dos caras de una misma moneda y se miden en las mismas unidades. Un punto importante es que un trabajo necesita un intervalo de tiempo para ser llevado a cabo. Por otro lado, la potencia, es la facultad necesaria para realizar un trabajo. Según esta capacidad actúe más o menos tiempo, se realizará distinta cantidad de trabajo.

Una vez expuestas estas dos nociones, pasamos al tema de las unidades. A menudo se mide la potencia de los motores eléctricos en caballos (*Horse Power, HP*). El caballo como unidad de potencia fue definido por James Watt para promocionar su máquina de vapor y representa, de forma aproximada, la potencia que es capaz de desarrollar dicho animal. También el hombre, salvando las distancias y sin ánimo de ofender a nadie, es utilizado en ocasiones como medida de capacidad de realizar trabajo, o sea, de potencia. Si en una oficina hay diez empleados, hay más mano de obra capaz de trabajar que si hay cinco personas. Así pues, el caballo y el hombre serían medidas de potencia. Si ahora ponemos a nuestros operarios a trabajar durante un determinado tiempo, entonces estamos hablando de una cantidad de trabajo que podemos calcular como potencia multiplicada por tiempo. Es muy común medir la cantidad de trabajo necesaria para realizar un proyecto en horas-hombre –horas multiplicadas por hombres–. Cien horas-hombre es el trabajo que realizan cien personas en una hora, o diez trabajadores en diez horas, o un solo individuo en cien horas. Se entiende que estos hombres (o mujeres) están trabajando al máximo de sus posibilidades. Por lo tanto, podemos extraer como consecuencia de lo anterior, que las unidades de trabajo (o de energía consumida para realizarlo) deben ser unidades de potencia multiplicadas por unidades de tiempo.

En términos eléctricos la potencia se suele computar en múltiplos del vatio, que es la unidad de potencia del sistema internacional de unidades (por cierto, llamada así en honor al mencionado señor Watt). Los más comunes son el kilovatio (abreviadamente kW, equivalente a mil vatios) y el megavatio (que se abrevia MW y equivale a un millón de vatios, o a mil kilovatios, como se prefiera). Estas unidades se utilizarán por ejemplo para medir la potencia requerida para hacer funcionar un equipo. Si se trata de un motor de 4 kW, que podría utilizarse en el ascensor de una vivienda, éste requiere dicha potencia para funcionar con la carga máxima. En cuanto a la energía y el trabajo eléctrico, se computarán, igual que en el caso de las horas-hombre, en unidades de potencia multiplicadas por tiempo, esto es, en kilovatios multiplicados por horas o abreviadamente kilovatios-hora. Continuando con el ejemplo anterior, si queremos calcular la energía eléctrica empleada (consumida) para hacer funcionar nuestro ascensor de 4 kW a máxima potencia, por ejemplo durante media hora, basta con multiplicar cuatro por un medio, resultando dos kilovatios-hora (Tabla 2).

Uno de los errores comunes es hablar de kilovatios “por” hora. Desgraciadamente, la preposición “por” en castellano puede tener el significado de multiplicar (dos por dos son cuatro), pero también de dividir (tocamos a cinco croquetas por persona). Cuando se mencionan unidades, en física se suele reservar la preposición “por” para la división. Si queremos averiguar por ejemplo cuántos kilómetros por hora (km/h, dividido) de media hace un coche, debemos dividir los kilómetros recorridos entre las horas invertidas en el viaje. Sin embargo, si en lugar de referirse a kilovatios-hora (kWh, multiplicado) se dice kilovatios por hora (kW/h, dividido de forma errónea), se está dividiendo la potencia entre el tiempo, de lo que resulta una magnitud que no tiene significado ni de potencia, ni de energía ni de ningún concepto que resulte útil en este contexto. O sea, que no tiene sentido dividir la potencia entre el tiempo, ya que a más tiempo más energía: lo correcto es multiplicar para obtener el consumo.

La red eléctrica es como una autopista

La red eléctrica puede ser comparada en una explicación elemental con la red de carreteras de un país. Las ciudades importantes requieren transportar grandes cantidades de energía a largas distancias y para

Tabla 2. Distintas unidades de potencia y energía

	Proyectos	Electricidad	Sistema Internacional
Potencia	Hombre	kilovatio (kW)	Vatio (W)
Energía (trabajo)	Horas-hombre	kilovatio-hora (kWh)	Julio (J)

ello existe una red de alta tensión. Podemos compararla con la red de autopistas. Igual que en algunas autopistas, los usuarios de la infraestructura de alta tensión (los generadores) han de pagar un peaje por utilizarla, en función del uso que hacen de la misma. Una vez que la energía está cerca de las zonas de consumo, se transporta mediante redes de menor voltaje, que se denominan de media y baja tensión. Del mismo modo existen carreteras nacionales y regionales que nos permiten conducir hasta nuestro punto de destino.

La comparación puede usarse también para explicar el motivo por el que el transporte se hace en alta tensión. Supongamos que usamos la carretera para transportar galletas energéticas desde grandes fábricas donde se producen hasta los numerosos puntos de consumo. Para hacer la analogía más gráfica (aunque es un poco exagerado dietéticamente) vamos a considerar que cada galleta proporciona una energía de 1 kWh. El transporte se lleva a cabo en grandes tráileres, de forma que la cantidad de galletas enviadas cada hora es el número de ellas que cabe en un camión por el número de vehículos que salen cargados de la fábrica cada sesenta minutos. En nuestro mundo paralelo, el número de galletas por camión equivaldría al nivel de tensión y el flujo de camiones que transportan las galletas sería la intensidad. El producto de galletas en cada camión, por número de vehículos nos da el total de galletas —de energía, en definitiva— transportadas en una hora. De igual forma, el producto de tensión por intensidad en una línea nos da la potencia eléctrica transportada (también energía en cada hora). Está claro que si los camiones son grandes, el tráfico será menos intenso y disminuirían los problemas de tráfico, el desgaste de las carreteras, etc. En el caso de la red eléctrica, las pérdidas por el calentamiento de las líneas dependen de la intensidad —del cuadrado de la misma para ser más exactos—, por lo que interesa hacer el transporte en alta tensión para tener una intensidad lo menor posible.

Sin embargo, no sería práctico hacer llegar las “marías” hogar por hogar en un enorme tráiler y por una autopista, de modo que al llegar a una ciudad, los grandes remolques se descargan y se continúa la distribución en

Tabla 3. Analogía de la autopista

Elemento eléctrico	Elemento de transporte
Tensión	Galletas por camión
Intensidad	Camiones por hora
Potencia	Galletas por hora
Energía	Galletas
Energía reactiva	Devolución de envases
Subestación	Centro de venta al por mayor
Generación distribuida	Artesano galletero

vehículos de menor tamaño. El número de galletas por camión disminuye –menor tensión– y el tráfico de camiones aumenta –mayor intensidad–. La cantidad de galletas por hora sigue siendo el producto de ambos valores. El trasiego de la mercancía de unos camiones a otros se realiza en un gran centro de venta al por mayor –tipo Mercamadrid–, que en nuestro ejemplo equivaldría a una subestación, que al igual que los centros mayoristas, se encuentra a las afueras de las urbes y ocupa grandes extensiones de terreno. Esta operación se repite para pasar de media a baja tensión, y la podríamos comparar con el proceso que tiene lugar en un almacén en el que entran camiones y salen furgonetas para distribuir el producto.

Puede ocurrir que en algunas localidades existan artesanos que fabrican pastas y las hacen llegar con sus propias furgonetas de reparto a los consumidores. Estos productores cumplen una función importante porque, además de mantener una bonita tradición, reducen la cantidad de galletas que debe llegar a la ciudad y por tanto disminuyen el tráfico en las autopistas y carreteras nacionales. En la comparación que estamos manejando, este papel lo juega la denominada generación distribuida, por ejemplo una instalación solar doméstica conectada a la red de baja tensión (Tabla 3).

También podemos introducir en este ejemplo el concepto de energía reactiva. Imaginemos que desde la fábrica, las cajas de galletas se sirven apiladas en unos soportes especiales que facilitan su manipulación y que, una vez hecha la entrega, han de enviarse de vuelta a su lugar de origen. El envío de estos accesorios, necesarios para el reparto, obliga a incrementar el tráfico en la red, sin embargo no tienen utilidad para el consumidor: como la energía reactiva.

La corriente trifásica es como un tiovivo

Otro de los aspectos que suele intrigar a los que se acercan al mundo de la electricidad es la llamada corriente trifásica. Al

contrario que la mayoría de aparatos eléctricos domésticos, que se conectan con dos bornes –tres si hay toma de tierra, pero ahora obviaremos ese aspecto–, hay equipos industriales que requieren tres cables para ser alimentados. Igualmente, las líneas de alta tensión que se ven junto a las carreteras tienen comúnmente tres cables o grupos de conductores principales. ¿Cómo podemos explicar el funcionamiento de este trío de tomas eléctricas?

Utilizaremos un clásico tiovivo de caballitos. Cada una de las figuras del mismo tiene dos movimientos simultáneos: gira alrededor del centro del carrusel y también sube y baja. Vamos a suponer que los dos movimientos están sincronizados, de forma que exactamente a la vez que un caballo completa una vuelta, también efectúa una subida y bajada. De esta forma, contando con que ha empezado desde el punto más bajo, el animal comienza a subiendo. Al completar media vuelta, el caballito llega al punto más alto y comienza a bajar hasta que completa un giro, volviendo a la posición inferior. Vamos a equiparar la altura del caballito con la tensión en un punto de la red trifásica, que es alterna y por lo tanto completa el ciclo de subir y bajar; a la frecuencia de la red.

Veremos ahora qué ocurre si colocamos más caballitos. Empezaremos con números pares antes de pasar a tres, que es el número que nos interesa. Añadamos para empezar un segundo ejemplar en la posición opuesta a la del primero. No es difícil ver que cuando uno está arriba el otro está abajo y viceversa. Si sumamos la elevación en vertical de ambos caballitos resulta que obtenemos el mismo valor en todo momento, la altura que pierde uno la gana el otro. Si ahora agregamos otros dos animales, de forma que cada uno esté separado uniformemente de los demás un cuarto de vuelta, ocurrirá lo mismo. Cada uno con su opuesto se comporta como si estuvieran en un balancín (Figura 2). Así es que podemos afirmar que un número par de figuras uniformemente espaciadas mantiene una altura total constante. Esto es bueno para el equilibrio del tiovivo, los soportes que lo unen al suelo sufrirán menos.

Aunque no es obvio, si el número de animales fuera tres, o cualquier número impar, no es difícil comprobar que también la altura de todos sumada sería constante. Y el caso de tres es el que nos sirve para compararlo con un sistema trifásico. En él hay tres puntos cuyas tensiones varían en el tiempo de forma

que cada una va retrasada de forma uniforme respecto a la anterior. Se cumple que la suma de tensiones es constante (cero si se toma como referencia la tensión del neutro, que en este caso correspondería con la altura media entre el punto más alto y el más bajo). Si se conectan tres cargas semejantes en las tomas, se obtienen tres corrientes que también suman cero. Este equilibrio de tensiones y corrientes hace funcionar en mejores condiciones a los demás elementos que estén conectados al sistema. Si el total de las intensidades no es cero, es necesario contar con un cuarto hilo, que es el neutro, por el que circula la intensidad sobrante.

Esta analogía presenta las características básicas de un sistema trifásico, aunque no explica por qué motivo es tres el número de fases elegido habitualmente. Adicionalmente, permite visualizar la evolución temporal de las tensiones y que la suma de las mismas es cero, sin embargo no hay una equivalencia para las corrientes ni para el hilo neutro.

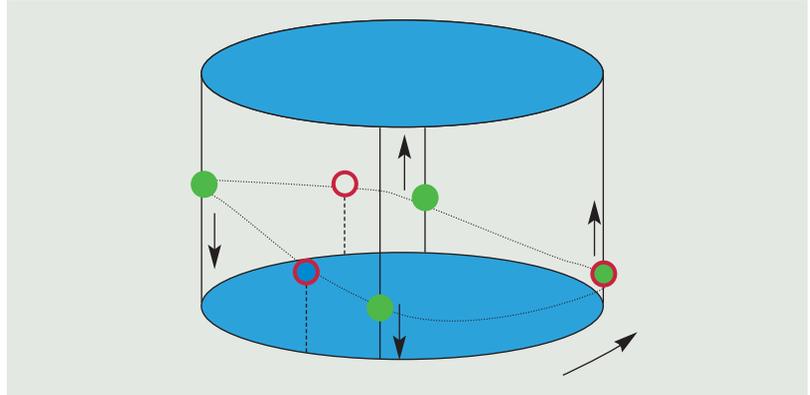
Un sistema eléctrico es como una bicicleta

Una de las metáforas más bonitas y completas que existen para explicar el funcionamiento de un sistema eléctrico de potencia es la que señala sus semejanzas con una bicicleta tipo tándem con múltiples pasajeros. Es una imagen muy rica, que permite dar idea de la complejidad que tiene operar este tipo de sistemas y sus problemas fundamentales: mantener constantes la frecuencia y la tensión.

Imaginemos una bicicleta multiplaza sobre la que un grupo de adultos pedalean mientras unos cuantos niños y niñas se dejan llevar. Además tenemos que considerar que para evitar sobresaltos la bicicleta circula a velocidad constante. Los padres y madres representan las centrales de generación que aportan la energía al sistema, mientras que los críos cumplen el papel de las cargas. Por supuesto unos adultos pedalean más y otros menos, aportando distintas cantidades de energía, como pasa con las distintas centrales eléctricas. Del mismo modo, hay niños –cargas– de distintos tamaños.

Igual que hacen las plantas de generación eléctrica, los ciclistas que pedalean han de coordinarse para conseguir que la velocidad de la bicicleta sea constante, y algunos deberán reservar parte de sus fuerzas por si otro falla. Podemos pensar que ciertos ciclistas pedalean más cuando hace buen tiempo y aunque son útiles para hacer avanzar la bici-

Figura 2. Analogía del tiovivo. Se señalan en verde algunos puntos significativos del recorrido de una de las figuras del carrusel. Los tres círculos marcados en rojo forman un sistema trifásico



cleta, son imprevisibles y no puede confiarse sólo en ellos para mantener el movimiento. En esto se parecerían a las centrales eólicas, que sólo generan cuando sopla el viento.

La cadena de la bicicleta es equivalente a la red eléctrica de transporte, que es la encargada de transmitir la energía desde los centros de generación a los lugares de consumo. Como la “bici” avanza a velocidad constante, la cadena gira con una velocidad también constante, igual que la red eléctrica mantiene una frecuencia siempre igual (50 Hertzios o ciclos por segundo en Europa). La parte superior de la cadena mantiene una tensión mecánica uniforme, como la red mantiene una tensión eléctrica. La parte baja de la cadena, sin tensión, es equivalente al hilo neutro.

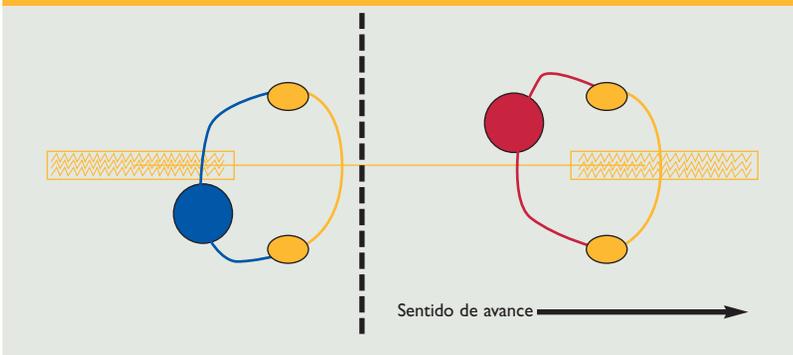
Las cargas resistivas que convierten la energía del sistema en calor o en luz, pueden verse como uno de los niños que no pone los pies en los pedales, sino que mantiene apretado el freno de forma continua. Por otro lado las cargas tipo motor que convierten la energía del sistema en energía de rotación son como un chaval que mantiene los pies en los pedales oponiéndose con su peso al pedaleo.

Las personas que están dando pedales deben ser cuidadosas para mantener la velocidad constante y también la tensión de la cadena, para permitir la transmisión de la energía. Si los pies de uno de los ciclistas resbalaran de las fijaciones, los demás deberían ponerse de acuerdo para, entre todos, pedalear más fuerte y así mantener la velocidad. Durante unos instantes se produciría una caída de tensión en la cadena. Exactamente lo mismo ocurre en el caso de fallo de una central: la potencia debe ser reemplazada por las demás y mientras tanto puede aparecer una bajada local de tensión en la red. Además, la

Tabla 4. Analogía del tándem

Elemento eléctrico	Elemento ciclista
Generador	Ciclista que pedalea
Carga	Ciclista que se deja llevar
Red	Cadena de la bicicleta
Tensión	Tensión de la cadena
Frecuencia de red	Ritmo de pedaleo
Potencia activa	Potencia de pedaleo
Potencia reactiva	Inclinación lateral

Figura 3. Analogía del tándem. Visto desde arriba, el ciclista rojo pedalea y se inclina a la izquierda para compensar los efectos del azul que se deja llevar y se inclina al lado contrario



maniobra de reenganche a la red es complicada puesto que debe sincronizarse exactamente con ella. Igual que nuestro desafortunado ciclista deberá ser muy cuidadoso al colocar otra vez los pies sobre los pedales.

También la energía reactiva puede ser representada en esta analogía. Una carga inductiva puede imaginarse como uno de los muchachos que se inclina hacia un lado de la bicicleta, por ejemplo hacia la derecha. Este cambio no afecta a la cantidad de energía necesaria para mantener la bicicleta a velocidad constante —no afecta a la frecuencia del sistema—. Sin embargo, el desequilibrio que se produce debe compensarse para evitar que la bicicleta pudiera caer. Para ello, uno de los adultos debe inclinarse hacia el lado contrario. Esto equivale a que una central genere energía reactiva. También puede con vencerse a otro niño para que se ladee hacia el lado contrario, lo que sería como instalar una batería de condensadores, que es una carga que genera reactiva. Las semejanzas entre ambas situaciones son varias: la compensación tiene que ser instantánea y exacta y es preferible hacerla cerca de donde se produce el desequilibrio; el adulto que se inclina pedalea peor y obliga a los demás a pedalear más —igual que una central al generar más potencia reactiva es capaz de

generar menos potencia activa—; y se produce un aumento de pérdidas en el sistema —en el caso de la bicicleta por haber más rozamiento con el aire— (Tabla 4 y Figura 3).

Otros detalles, como las características de distintos tipos de centrales de generación, la presencia de armónicos en la red o el control frecuencia-potencia también pueden ser explicados por medio de esta comparación. Sin embargo hay aspectos, como por ejemplo las pérdidas de potencia activa en la red, que no tienen una equivalencia sencilla.

La energía reactiva es como la espuma de la cerveza

Uno de los aspectos más misteriosos para los no especialistas en sistemas eléctricos es la energía reactiva, ya mencionada en apartados anteriores. Es difícil explicar en qué consiste esta especie de “energía fantasma” que circula por las redes eléctricas pero de la que no se obtiene ningún provecho, ya que no se convierte en otro tipo de energía útil. Sin embargo, las industrias han de pagar por el consumo que realizan de dicha energía reactiva además de por la energía realmente consumida (que denominamos activa).

Una imagen interesante y que resulta muy popular para ilustrar el concepto es la de la espuma de la cerveza. Una caña bien tirada tiene que tener una cierta cantidad de espuma. Sin la capa blanca efervescente, la bebida no está en su punto. Sin embargo la espuma no tiene la utilidad de refrescarnos como la cerveza, a pesar de que ocupa un cierto volumen en la jarra. De igual forma, la energía reactiva circula por las redes eléctricas, obligando a diseñarlas de mayor tamaño, sin aportar ninguna utilidad.

Otra analogía más formal es la de la cuesta arriba (Figura 4). Supongamos que vamos caminando por el monte y nuestro navegador GPS nos indica que para llegar a nuestro destino, tenemos que avanzar exactamente cuatro kilómetros hacia el norte. Sin embargo, el terreno tiene un cierto ángulo de inclinación, por lo que para desplazarnos un kilómetro en la dirección deseada, deberemos caminar una distancia mayor, puesto que, a la vez que avanzamos, nos vemos obligados a subir. La distancia recorrida es, por tanto, mayor que un kilómetro. Se puede calcular como la hipotenusa de un triángulo rectángulo, cuya base es un kilómetro y la altura es precisamente la diferencia de cota que hemos tenido que ascender sin pretenderlo. En este caso la equivalencia funciona para hacer los cálculos, basta con sustituir la distancia que

se desea recorrer por la energía real –activa–, la altura que nos hemos visto en la necesidad de subir por la energía reactiva y la distancia recorrida de forma efectiva por la denominada energía aparente, mayor que la real, pero que es para la que tendremos que dimensionar nuestra red por culpa de la reactiva. El ángulo de inclinación de la cuesta coincide con el utilizado para definir el factor de potencia $-\cos\phi$, que nos da una medida de cuánta energía activa estamos consumiendo en relación con la energía aparente.

Después de alcanzar el final de la cuesta y sobre todo si hace sol, una buena idea para reponernos del esfuerzo es tomar una jarra de cerveza bien tirada, con su espumita.

Un condensador es como un muelle

El funcionamiento de los circuitos eléctricos con elementos lineales (como resistencias, condensadores y autoinducciones) es igual que el de algunos dispositivos mecánicos. Esta semejanza, con la que se cierra este artículo, se conoce como analogía electro-mecánica y es más detallada desde el punto de vista técnico que el resto de las presentadas. Se utiliza, por ejemplo, para modelar algunos transductores. La analogía es formal porque la evolución de las variables eléctricas es idéntica a la evolución de las variables mecánicas debido a que los fenómenos están regidos por las mismas ecuaciones diferenciales. Esta equivalencia resulta muy útil en las clases tanto de mecánica como de electricidad. Resulta muy revelador, además de ciertamente curioso, descubrir comportamientos idénticos en ámbitos tan distintos.

Supongamos un circuito RCL serie, formado por una resistencia, un condensador y una bobina. Se trata de un circuito básico, con un comportamiento oscilante y amortiguado y que tiene la propiedad de ser capaz de seleccionar determinadas frecuencias, por lo que puede utilizarse como sintonizador.

Hay dos alternativas posibles para hacer equivalente este fenómeno a un dispositivo mecánico: la llamada analogía de tipo I representa la tensión mediante una fuerza y la corriente mediante una velocidad, mientras que la de tipo II hace la correspondencia al contrario.

En la analogía de tipo I, las fuerzas equivalen a tensiones y la velocidad a la intensidad. Conviene aclarar que, para que este primer enfoque funcione correctamente, el criterio de signos que ha de tomarse en los elementos



del circuito debe ser generador para el condensador y la resistencia, pero receptor para la autoinducción. Es decir, estableciendo un sentido como positivo para la intensidad, en el condensador y en la resistencia se considera positiva la tensión cuando es mayor en el terminal por el que sale esta intensidad. Para la bobina, se considera lo contrario: tensión positiva cuando es mayor en el borne por el que entra. En otras palabras, en la autoinducción el producto de tensión e intensidad da como resultado potencia consumida mientras que en los otros dos elementos es igual a la potencia generada.

El dispositivo equivalente al circuito RCL es una masa unida a un punto fijo mediante dos elementos que actúan en paralelo: un muelle y un amortiguador (Figura 5). En este artilugio la velocidad a la que se desplazan la masa, el amortiguador y el extremo derecho del muelle es la misma para los tres. Igualmente la intensidad que atraviesa los tres elementos del circuito es la misma. Curiosamente, cada elemento mecánico tiene su equivalente en el circuito eléctrico. El muelle, por ejemplo, realiza sobre la masa una fuerza opuesta y proporcional a su desplazamiento, que es la integral de la velocidad; análogamente, el condensador presenta entre sus bornes una tensión proporcional a la integral de la intensidad, que es la carga que acumula. De forma semejante, se puede establecer el paralelismo entre los distintos elementos según muestra la Tabla 5.

La correspondencia también funciona desde un punto de vista energético: la energía que almacena el condensador es proporcional a su tensión al cuadrado, que es la integral de la intensidad que lo atraviesa; de forma equivalente la que acumula el muelle es proporcional al cuadrado de su desplazamiento, que es la integral de su velocidad. También la energía acumulada en la bobina es proporcional al cuadrado de la intensidad, igual que lo es la que acumula la masa al cuadrado de la velocidad. Finalmente, la resistencia

Figura 5. Analogía electromecánica de tipo I

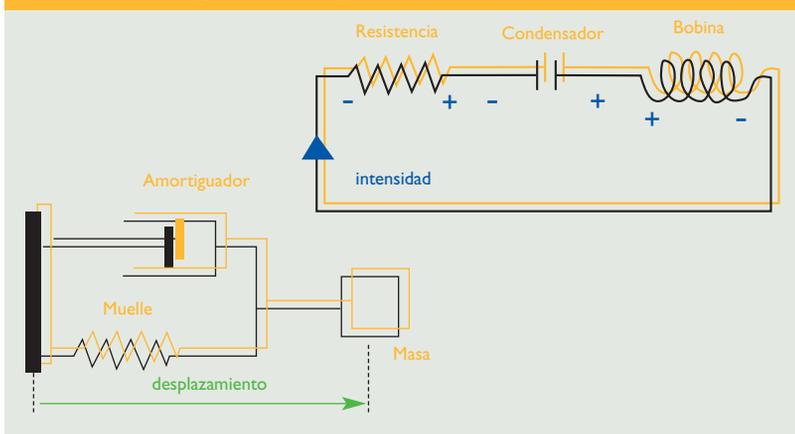


Tabla 5. Analogía electromecánica

Elemento eléctrico	Analogía tipo I	Analogía tipo II
Intensidad	Velocidad	Fuerza
Tensión (bobina)	Fuerza (sobre la masa)	Velocidad (del muelle)
Tensión (condensador)	Fuerza (muelle)	Velocidad (de la masa)
Condensador	Muelle	Masa
Bobina	Masa	Muelle
Resistencia	Amortiguador	Amortiguador

disipa una potencia que se calcula como el producto de tensión por intensidad y la energía que extrae del sistema mecánico en forma de calor el amortiguador es el producto de velocidad y fuerza.

En definitiva, eligiendo adecuadamente las propiedades de los elementos mecánicos, si cargamos el condensador y estudiamos la evolución de la intensidad en el circuito, observaremos con asombro que oscila de forma idéntica a como lo hace la masa después de separarla de su posición de equilibrio.

En cuanto a la analogía de tipo II, en este caso la fuerza se hace semejante a la corriente y las velocidades a las tensiones eléctricas. Ahora el dispositivo equivalente es un muelle conectado en serie con un amortiguador y con una masa. De forma similar a la expuesta, se llega a la conclusión de que, en esta ocasión, la masa se corresponde con el condensador; y el muelle con la bobina. El amortiguador y la resistencia siguen representando el mismo papel. Además, se puede comprobar que esta equivalencia también es consistente si se analiza desde la óptica de la energía (Tabla 5).

Este segundo planteamiento tiene la ventaja de que conserva la topología del circuito eléctrico en el dispositivo mecánico. Los elementos se conectan uno a continuación del

otro en ambas representaciones. Sin embargo, hay casos en los que se prefiere la primera analogía porque da una mejor idea de los flujos energéticos.

Conclusiones

Hemos visto unas cuantas comparaciones y ejemplos que permiten explicar algunos detalles sobre la electricidad evitando un enfoque demasiado especializado. Si repasamos las analogías presentadas veremos que son variadas y sugerentes: la tensión puede ser semejante a la altura de un depósito o de un caballo de feria, a las galletas que caben en un camión, a la tensión mecánica en la cadena de una bicicleta, a la fuerza que ejerce un resorte o a la velocidad con que se mueve una masa. Y la potencia reactiva también puede ser comparada con una lista diversa de elementos: se parece a lo que se inclina un ciclista hacia un lado cuando pedalea, a camiones que retiran cajas de transporte, a la espuma de la cerveza, o a la inclinación de una cuesta arriba.

Vivimos en un mundo en el que la divulgación de los conocimientos científicos es cada vez más importante. En nuestro caso particular, igualmente lo es la difusión de la ciencia de la electricidad, que además reviste una dificultad extra frente a otras ramas al ser a menudo complicada de visualizar. Este trabajo pretende aportar una colección de imágenes que resulten útiles para llevar a cabo esa tarea. Hacer estos conocimientos comprensibles a un público no especialista no los trivializa sino que los dignifica, haciéndolos más accesibles a la sociedad, al servicio de la cual, a fin cuentas, deben estar. ■

Bibliografía

- Cogdell, J.R.: *Fundamentos de Circuitos Eléctricos*, Pearson Educación, México, 2000.
- Fassbinder, S., De Watchter, B.: *The Electrical System as a Tandem Bicycle*, Septiembre 2005. <http://www.leonardo-energy.org/Files/ElectricityTandem.pdf>
- Hewitt, P.G.: *Física conceptual*, Pearson Educación, México, 2004.
- Söder, L.: *Explaining Power System Operation to Non-Engineers*, IEEE Power Engineering, abril 2002.
- Terhardt, E.: *Zur Anwendung der elektro-mechanischen beziehungsweise -akustischen Analogien auf elektroakustische Wandler*. In: Fortschritte der Akustik (DAGA'93), DPG, Bad Honnef, 494-497, 1993 (*Sobre la aplicación de analogías electromecánicas y/o acústicas a transductores electroacústicos*). Resumen en inglés: <http://www.mmk.ei.tum.de/persons/ter/top/emanalogy.html>
- Wood, A.J., Wollenberg, B.F.: *Power Generation, Operation & Control*. John Wiley and Sons, Nueva York, 1996.