

Presente y futuro de la electrificación de la maquinaria agrícola

Hace ya un par de décadas que la industria automovilística empezó a interesarse por los vehículos de propulsión híbrida como una forma de reducir el consumo de combustible y por tanto las emisiones contaminantes. Como resultado, hoy día es habitual ver circulando por nuestras carreteras automóviles híbridos como el Toyota Prius o el Honda Insight. Ahora le ha llegado el turno a la maquinaria de construcción y a la maquinaria agrícola. Tanto los fa-

bricantes de tractores como los de aperos (abonadoras, sembradoras, etc.) están acometiendo diversos proyectos en relación con la electrificación de la maquinaria agrícola. En este artículo presentamos algunos conceptos de vehículo híbrido y hacemos una introducción a los desarrollos en electrificación de maquinaria agrícola, dejando para un artículo posterior una explicación más exhaustiva del funcionamiento de dichos desarrollos.

G. P. Moreda, M. A. Muñoz y J. Ortiz-Cañavate.

LPF_TAGRALIA. Departamento de Ingeniería Rural. Universidad Politécnica de Madrid

Uno de los indicadores de desarrollo de un país es su grado de electrificación. Así, en los países en vías de desarrollo las instalaciones de riego funcionan aún en muchos casos con bombas accionadas por motores de combustión interna, mientras que en los países desarrollados hace tiempo que para esa aplicación dichos motores fueron sustituidos por motores eléctricos, concretamente por el motor asíncrono trifásico o motor de inducción trifásico (MIT). Más aún, en los países desarrollados, cuando no existe una línea eléctrica cercana a la que conectar el motor, en vez de utilizar una motobomba diésel o de gasolina se recurre a una motobomba eléctrica (electrobomba), y la electricidad necesaria para su funcionamiento se obtiene de un grupo electrógeno que se instala en la misma caseta de bombeo. Es decir, aunque seguramente resultaría más económico una motobomba diésel o de gasolina que una combinación de electrobomba y grupo electrógeno, en la práctica se opta por lo

segundo. La razón principal es que la electricidad generada sirve, además de para alimentar la bomba principal del riego, para la iluminación de la caseta y para el accionamiento de otros pequeños motores eléctricos que pueda haber, como el de la motobomba inyectora de fertilizante líquido o el motor del agitador del tanque de fertilizante líquido.

Centrándonos en la maquinaria agrícola propiamente dicha, según Buning (2010) con la tecnología actual la maquinaria agrícola ha tocado techo, tanto en complejidad como en rendimiento, es decir, que es difícil mejorar aún más las máquinas agrícolas con la tecnología actual. Por mera conveniencia, en este artículo vamos a diferenciar entre el tractor o en su caso otros vehículos agrícolas autopropulsados como vendimiadoras, cosechadoras de cereales y picadoras de forraje autopropulsadas- y el resto de equipos agrícolas que se acoplan al tractor, es decir, sembradoras, abonadoras, barras pulverizadoras de tratamientos fitosanitarios, empacadoras, etc. A estos últimos les vamos a denominar indistintamente maquinaria agrícola específica acoplada al tractor o, simplemente, aperos, asunto que se tratará en un número posterior.

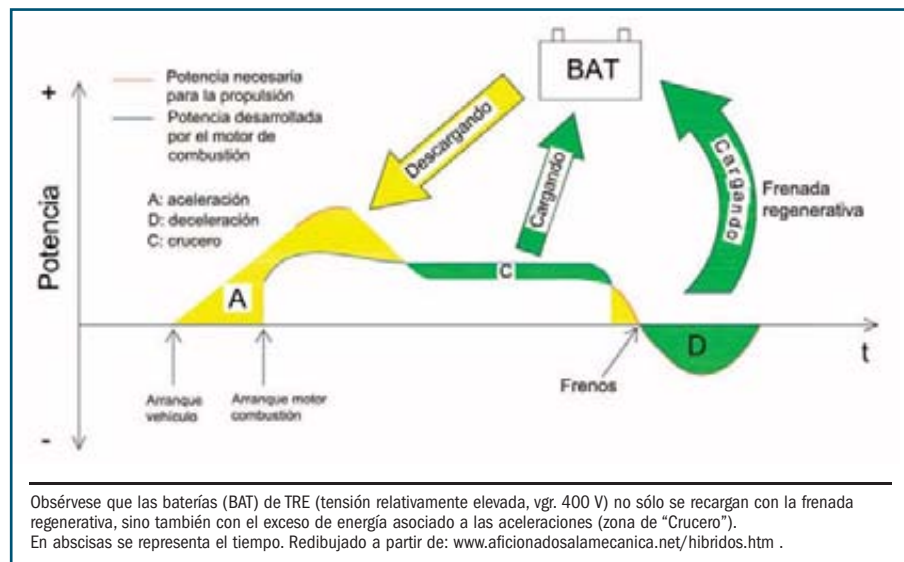
Hablando del tractor, hasta ahora las máquinas eléctricas montadas en este vehículo eran las mismas que en cualquier otro vehícu-

lo automóvil: un generador rotativo de corriente alterna o alternador, un motor de arranque de corriente continua, la electrobomba de alimentación de combustible (es decir, la que toma el gasóleo del depósito y lo reenvía a la bomba de inyección), etc. Conviene recordar que la corriente eléctrica sale finalmente de la carcasa del alternador en forma de DC, por acción de los diodos rectificadores alojados dentro de la propia carcasa del alternador. La ventaja de ubicar los diodos rectificadores dentro de la carcasa del alternador es que de esa forma dichos diodos se enfrían con la corriente de aire producida por el ventilador del alternador, que aparte sirve para enfriar los bobinados del último.

También el resto de la instalación eléctrica del tractor es muy similar a la de un automóvil turismo: un circuito de corriente continua con posibilidad de ser alimentado por dos generadores, uno estático que además de generar puede almacenar energía (la batería de acumuladores electroquímicos de 12 V), y un generador dinámico rotativo o alternador que produce una tensión nominal de 14 V. El alternador no puede almacenar energía, solo genera electricidad en tiempo real; es decir, solo produce electricidad mientras está girando. En los últimos años, la estrategia habitual de funcionamiento del sistema eléctrico del automó-

Figura 1

Funcionamiento de un automóvil híbrido.



vil es que una vez arrancado el motor de combustión y por tanto generando electricidad el alternador, lo primero que se hace es recargar de nuevo la batería, devolviendo así la energía que ha extraído de ella el motor de arranque. Una vez recargada completamente la batería, se la deja reposar, es decir, que los consumos eléctricos a partir de ese momento, y mientras el alternador esté en marcha, son suministrados directamente por el alternador, no por la batería. El alternador lleva un regulador de voltaje para que la tensión de salida se mantenga aproximadamente constante.

Desde hace poco tiempo se viene fraguando un cambio trascendental en el sector de la maquinaria agrícola: el derivado de trasladar al tractor los avances en el sector automovilístico en lo referente a los sistemas de propulsión híbrida. El objetivo principal perseguido con la tecnología de propulsión híbrida es ahorrar combustible, y por tanto también contaminar menos. Para un país como España tan sumamente deficitario en petróleo esto es algo de vital importancia. Pero incluso en los países exportadores de petróleo la tecnología híbrida resulta atractiva, a fin de reducir las emisiones contaminantes.

En el caso de España, es bien conocido que aproximadamente el 95% del petróleo crudo y derivados del petróleo que consumimos es importado. La proporción de petróleo crudo que una vez refinado se destina al sector del transporte en España (camiones, auto-

buses, automóviles, barcos mercantes y aviones fundamentalmente) fue del 71,3% en 2009 (López-Peña *et al.*, 2010). Además, la agricultura y la pesca, es decir, los tractores, cosechadoras y barcos de pesca básicamente, suponen otro 6% más. Es decir, en total se destina aproximadamente un 77% de petróleo al transporte y sector primario (agricultura y pesca). La conclusión es clara: si conseguimos reducir el consumo de combustible de nuestros vehículos, no sólo lo agradecerá la economía del propietario del vehículo, sino también la balanza comercial de nuestro país. Y además reduciremos las emisiones contaminantes.

Definición y tipos de vehículos de propulsión híbrida

Una definición de vehículo híbrido es aquél que combina motores de diferente tipo funcionando de forma conjunta o coordinada para conseguir la propulsión del vehículo. De acuerdo con Arias-Paz (2006), lo más habitual es que se unan un pequeño (o gran) motor de combustión interna y un motor eléctrico. Una segunda definición, más específica que la primera, es: «vehículo híbrido es todo aquel que utiliza un sistema de almacenamiento de energía recargable a bordo y un combustible como fuente de energía para la propulsión del vehículo». En efecto, es condición *sine qua*

non para hablar de vehículo híbrido que el vehículo disponga de baterías de tensión relativamente elevada (TRE), típicamente 400 V, en las que almacenar la energía sobrante. En algún momento posterior la energía almacenada será consumida por uno o varios motores eléctricos para propulsar el vehículo.

Los vehículos híbridos no sólo recargan las baterías de TRE mediante la frenada regenerativa, sino que también lo hacen con el exceso de energía asociado a las aceleraciones, ya que a menudo durante la marcha del vehículo se acelera de más para vencer las resistencias que se oponen al avance del vehículo (figura 1).

Vehículos híbridos serie

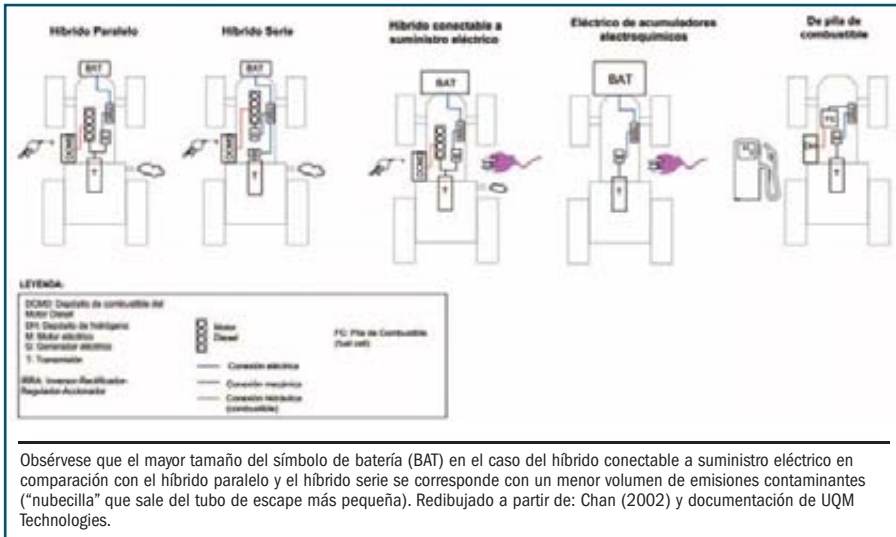
Tradicionalmente (Arias-Paz, 2006) se consideran dos tipos de automóviles híbridos: el serie y el paralelo (figura 2), aunque según Chan (2002) hay más, por ejemplo el serie-paralelo, y otros. Para no extendernos demasiado, nos vamos a centrar en los dos tipos considerados tradicionalmente.

En el caso del híbrido serie, la transmisión eléctrica y la mecánica están claramente separadas. Básicamente lo que ocurre es que el motor de combustión se utiliza para accionar un gran generador de corriente alterna, constituyendo el conjunto por tanto un grupo electrógeno. Este diseño se viene utilizando desde hace décadas en el sector ferroviario, en las locomotoras diésel o diésel-eléctricas. En estas locomotoras las ruedas son accionadas por motores eléctricos, alimentados por baterías alimentadas a su vez por un generador accionado por un motor diésel. De esa forma, dichas locomotoras híbridas o semi-eléctricas pueden circular por vías carentes de tendido eléctrico.

Otro ejemplo bien conocido de este tipo de vehículo con central eléctrica a bordo son los grandes volquetes o *dumpers* utilizados en minería. Algunos de estos *dumpers* llevan motores diésel de hasta 2.725 kW (unos 3.700 CV). En estos mega-camiones el motor diésel acciona un generador eléctrico y a partir de ahí todo funciona con electricidad: los motores eléctricos en las ruedas, la bomba del cilindro oleohidráulico para bascular la caja del camión, etc., y aunque también se podría acoplar la bomba del circuito oleohidráulico al cigüeñal, se prefiere acoplar al último únicamente el generador eléctrico, y la bomba accionarla por medio de un motor eléctrico. En el híbrido serie de la figura 2 se ha represen-

Figura 2

Esquema simplificado de diferentes tipos de vehículo híbrido y eléctrico.



Vehículo híbrido paralelo

En el caso del automóvil híbrido paralelo la tarea de la propulsión es compartida por ambos motores, el de combustión y el eléctrico. Este tipo de híbrido es el que ha tenido mayor difusión hasta la fecha en los automóviles. Como se puede ver en la **figura 2**, una diferencia importante entre el híbrido serie y el paralelo es que el último no lleva generador de TRE. Según UQM Technologies, socio comercial de John Deere, el ahorro de combustible en el automóvil híbrido paralelo oscila entre el 15% y el 45%; en el híbrido en serie entre 45% y 50%, y en el híbrido conectable a suministro eléctrico (**figura 2**) entre 60% y 75%. No obstante, hay que tener en cuenta que en el caso del híbrido conectable a suministro eléctrico no solo tenemos el input del combustible, sino también el de la energía eléctrica "repostada".

Vehículos puramente eléctricos

Para completar el panorama de vehículos híbridos y eléctricos, conviene mencionar que en pequeños tractores y maquinaria de jardinería autopropulsada existen desde hace

tado un caso simplificado de transmisión mecánica convencional accionada por un solo motor eléctrico, pero también existe la posibi-

lidad de disponer de un motor eléctrico en cada una de las cuatro ruedas del vehículo, como en los *dumpers* mineros.

Acceda a todos los lugares



Anchuras de trabajo:
1,05 – 1,5 m

5GV

años en el mercado modelos puramente eléctricos, alimentados por baterías de acumuladores electroquímicos, que una vez descargadas hay que recargar antes de poder continuar utilizando la máquina.

Una alternativa de vehículo puramente eléctrico es el basado en la tecnología de pila de combustible. La pila de combustible es un generador eléctrico que utiliza H_2 y O_2 (este último contenido en el aire aspirado del exterior) para producir electricidad, y que como residuo solo emite vapor de H_2O –la reacción química es la inversa a la de la electrólisis del agua–. Los vehículos de pila de combustible no llevan baterías de acumuladores electroquímicos, como se puede apreciar en la **figura 2**.

Aunque en la **figura 2** se ha representado un surtidor de hidrógeno molecular (H_2), existe también la posibilidad de generar el H_2 a bordo del vehículo, a partir por ejemplo de gasolina, mediante reformado, un proceso utilizado en las refinerías de petróleo. De esta forma se facilita la extensión de los vehículos de pila de combustible, ya que incorporando el *reformer* o generador de H_2 a bordo del vehí-

culo se puede seguir utilizando como combustible primario un combustible estándar, como la gasolina. Algunos inconvenientes del *reformer* son: el peso que añade al vehículo, el espacio que ocupa –si bien en los últimos años el volumen ocupado por el *reformer* se ha reducido drásticamente–, y en tercer lugar, que lo que se emite por el tubo de escape del vehículo de pila de combustible equipado con *reformer* ya no es sólo vapor de H_2O como en el caso de repostar H_2 directamente, sino también CO_2 .

Desarrollos en electrificación de maquinaria agrícola

Dentro de la tecnología híbrida y eléctrica actualmente en tractores podemos mencionar unos cuantos desarrollos. Por un lado tenemos el accionamiento eléctrico de elementos auxiliares del motor diésel, con objeto de conseguir un funcionamiento más eficiente, independizando en gran medida elementos como el ventilador de refrigeración del motor, bomba del agua, compresor de aire acondi-

cionado, compresor para el frenado neumático de remolques, etc., del cigüeñal.

Este camino, que podemos denominar ligeramente híbrido es el que ha emprendido, como pionero, John Deere, con su modelo 7530 E-Premium (donde la letra E corresponde a eléctrico). Este tractor puede generar hasta 20 kW mediante un alternador de 400 V accionado por el cigüeñal del motor diésel del tractor. El calificativo de ligeramente híbrido es porque no se llega a utilizar uno o más motores eléctricos directamente para la propulsión del tractor. No obstante, este tractor presenta la utilidad adicional de disponer de dos tomacorrientes (o servicios eléctricos externos), uno monofásico 230 VAC y otro trifásico 400 VAC, para poder accionar alguna herramienta eléctrica con el tractor parado; es decir, hallándose el tractor detenido, sin avanzar, pero con el motor de combustión en marcha. Por ejemplo, se puede conectar al tomacorriente trifásico un equipo o máquina de electrosoldadura por arco.

El siguiente paso dado por John Deere en cuanto a su desarrollo del tractor híbrido se

res.



5GF

Anchuras de trabajo: 1,5 a 2,0 m y superiores



5GH

Altura: hasta 78 cm



Foto 1. Vista trasera del tractor JD 6210 RE. En la parte superior de la imagen se pueden apreciar los dos tomacorrientes para servicios eléctricos externos. Fuente: John Deere.



Foto 2. "Mangueras" trifásicas conectadas a los tomacorrientes para servicios eléctricos externos del tractor JD 6210 RE. Fotografía cortesía de Rubén García (John Deere).

presentó en Agritechnica 2011. Se trata del modelo JD 6210 RE. En este tractor, la potencia eléctrica para usos externos se halla disponible no solo con el tractor estático, sino también en dinámico, mientras se desplaza por el campo. Con este avance se posibilita la conexión al tractor de aperos de accionamiento eléctrico.

En las **fotos 1 y 2** se puede apreciar la parte trasera del tractor JD 6210 RE. Las dos "mangueras" rojas de cable eléctrico son trifásicas. Esto constituye otra diferencia respecto al 7530 E-Premium, en el que de los dos tomacorrientes, uno era monofásico y el otro tri-

fásico. Ahora, en el JD 6210 RE, el fabricante ha optado por dos tomacorrientes trifásicos, ya que los motores eléctricos que habrá que accionar en los aperos serán casi siempre trifásicos.

No obstante, aún no está dicha la última palabra en este asunto, ya que existe una discusión abierta sobre si los motores eléctricos del futuro serán únicamente los MIT que se han venido utilizando a nivel industrial durante las últimas décadas, o bien puede haber hueco para el motor de DC sin escobillas o de conmutación electrónica (*brushless DC motor*), motor este último tradicionalmente re-

servado para pequeñas potencias. Es decir, el motor eléctrico que "reinará" en el futuro será en principio uno de esos dos, o los dos. No desde luego el motor de DC con escobillas (*brushed DC motor*), pero el *brushless DC motor* podría irrumpir en la gama de moderada y gran potencia. Si esto se cumple, cabría también la posibilidad de unos servicios eléctricos externos del tractor de DC, como alternativa a los que han empezado a implementarse actualmente, que son de AC trifásica. Los *brushless DC motors* pueden tener rendimientos tan altos como el MIT. El inconveniente que se les atribuye es el elevado coste de



Foto 3. Tractor NH² de New Holland, con generador eléctrico de pila de combustible alimentada con H₂. Presentado en la feria Agritechnica 2011.

Figura 3

Principales elementos del tractor NH²: 1, depósito de H₂; 2, generador eléctrico de pila de combustible; 3, motores eléctricos. Fuente: Documentación New Holland.



Profesionales de la transmisión de potencia



BONDIOLI Y PAVESI - IBERICA S.A.

Autopista de Barcelona - PG. Malpica, CL. F. nº1- Apartado 5062 - 50057 ZARAGOZA - Tel.: 976 588 150 - Telefax: 976 574 927
E-mail bondiolipavesi@bypy-iberica.com - www.bondioli-pavese.com

los imanes permanentes que incorporan –habitualmente en el rotor– cuando tengan que ser grandes, para motores de potencia elevada.

New Holland, por su parte, ha apostado por el tractor totalmente eléctrico, con generador eléctrico de pila de combustible, y con hidrógeno molecular (H₂) como combustible (**foto 3 y figura 3**). En un juego de palabras, el nombre dado a este prototipo es NH² (NH de New Holland y H₂ de gas hidrógeno). Este desarrollo de New Holland se enmarca en un ambicioso y ecológico concepto de producción del hidrógeno necesario para el funcionamiento del tractor en la propia explotación agropecuaria.

En la pasada feria Agritechnica 2011 celebrada en Hannover (Alemania), se expuso la actualización del NH². Dicha actualización está realizada sobre la base del tractor NH T6.140. En comparación con la primera generación del tractor NH², la potencia ofrecida por la pila de combustible sube de 50 kW a 100 kW. El nuevo NH² cuenta con un motor eléctrico para la propulsión-tracción y otro para trabajos con la TDF y servicios auxiliares. El depósito de hidrógeno puede contener hasta 8,2 kg de H₂ a presión, lo que le confiere al tractor una autonomía de unas 3 horas (Agrótécnica, noviembre 2011).

El fabricante bielorruso Belarus ha diseñado un tractor híbrido cuyo aspecto más llamativo quizá sea la tdf delantera accionada por motor eléctrico. Deutz ha colaborado con Weyhausen y Heinzmann en el diseño de una pala cargadora con ruedas híbrida. Caterpillar también comercializa ya un bulldozer híbrido, el D7E, mientras que en Agritechnica 2005 Case IH presentó su prototipo de tractor híbrido, en el que las baterías recargadas parcialmente con frenada regenerativa iban situadas en el lugar habitual de los contrapesos delanteros, sustituyendo a éstos. En los últimos años también se ha pensado, o incluso algún fabricante ya lo está llevando a efecto, en sustituir la pareja bomba-motor hidráulico de la transmisión CVT o de infinitas marchas, introducida por Fendt, por una pareja generador-motor eléctrico.

En cuanto a aperos, Pellenc Ibérica presentó en FIMA 2010 un cabezal de pre-poda (**foto 4**) para montaje en vendimiadora, con los discos de corte accionados por motores eléctricos y girando a una velocidad de 4.000 r/min. Esa elevada velocidad de giro se traduce en un corte más limpio de los sarmientos, y



Foto 4. Cabezal de pre-poda para viña, montaje sobre vendimiadora. Observarse los discos de corte accionados por sendos motores eléctricos. Novedad técnica presentada por Pellenc Ibérica en FIMA 2010 (Zaragoza).

fue el principal motivo para que el fabricante optara por sustituir los motores hidráulicos por eléctricos. Aunque con los motores hidráulicos se podría llegar a conseguir esa elevada velocidad, habría que colocar para una transmisión multiplicadora en el eje del motor hidráulico. Eso aumentaría el espacio ocupado por el accionamiento y además el par en el disco de corte disminuiría; es decir, los discos girarían tan rápido como en el caso del motor eléctrico, con lo que el corte sería igual de limpio, pero al reducirse el par, habría sarmientos gruesos que quedarían sin cortar. No obstante, para subsanar ese inconveniente, en caso de seguir utilizando motores oleohidráulicos, se podría aumentar el par de los mismos incrementando su cilindrada; pero de nuevo estaríamos ante un aumento del espacio ocupa-

do. Siguiendo con los aperos, Rauch ha diseñado una abonadora de doble disco, concretamente el modelo Axis-EDR, en la que cada disco es accionado por un motor eléctrico de 10 kW funcionado a 400 V, mientras que el agitador y el dosificador son accionados tam-

bién eléctricamente, pero a partir de la instalación convencional de 12 VDC del tractor. En cuanto a maquinaria agrícola específica no acoplada al tractor, Agco presentó en AgConnect 2010 (Orlando, Florida, EE.UU) un prototipo de pulverizador autopropulsado, el RoGator E-sprayer, cuya característica más destacable es la utilización de motores eléctricos en las ruedas motrices del vehículo.

Por último, hemos de decir que la cosechadora de cereales, al ser una especie de fábrica móvil, se adapta muy bien al accionamiento eléctrico de sus diferentes órganos de trabajo. Es decir, si en el cigüeñal del motor diésel de una cosechadora de cereal montamos un gran generador eléctrico, podremos accionar los diferentes elementos de trabajo por medio de motores eléctricos de velocidad variable, con lo que nos ahorraremos los variadores mecánicos de velocidad tradicionales. La forma habitual de variar de forma controlada la velocidad de MIT es alimentarlo por medio de un variador electrónico de frecuencia y tensión (VEFT) que se intercala entre la línea eléctrica de suministro y el motor. Los VEFT son aparatos de electrónica de potencia que constan básicamente de las siguientes conexiones:

- Una entrada de potencia eléctrica, que es la que se conecta al suministro eléctrico con el que vamos a hacer funcionar el MIT.
- Una salida de potencia eléctrica, que es la que alimenta al motor.
- Una entrada de señal para recibir órdenes de un controlador.

Por último, otra característica importante de los VEFT es que suelen incorporar dentro un relé térmico para proteger al motor eléctrico, por lo que no es necesario instalar un relé térmico externo. Sin embargo, sí que es conveniente insertar entre la línea de suministro y el VEFT un contactor. El VEFT habitualmente está construido utilizando transistores de alta potencia (*insulated gate bipolar transistors*, IGBTs). ●

Nota de los autores

En este artículo nos referimos a las tensiones de 230 V y 400 V, que según el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión (REBT) son baja tensión (BT), como “tensión relativamente elevada” (TRE), para recalcar que existe una gran diferencia en cuanto a peligrosidad para el usuario entre la muy baja tensión de seguridad (MBTS) de 12 V, tensión tradicional utilizada en la instalación eléctrica de automóviles y tractores, y 230-400 V.