



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

Proyecto fin de Grado:

**Diseño del Regulador de velocidad de un
patinete eléctrico**

Autor: Miguel Carrascosa Rodríguez

Director de proyecto: Bruno Lorcet

Julio 2015

Madrid

Agradecimientos:

La realización de este proyecto no habría sido posible sin el apoyo de mi familia.

En especial a mis padres y a mis hermanas por estar siempre presentes en los momentos difíciles.

También quiero expresar un sincero agradecimiento a las dos instituciones universitarias de tan alto prestigio, que me han dado la formación profesional suficiente para seguir adelante: Universidad Pontificia Comillas (ICAI) y Supélec (École Supérieure d'Électricité).

Indice

Resumen del proyecto.....	1
Abstract.....	5
Introducción.....	9
Capítulo I: Análisis del patinete eléctrico	10
Capítulo II: Teoría sobre la máquina de corriente continua con imanes permanentes	12
1. Principio de funcionamiento de la máquina de corriente continua	12
a. <i>Fuerza de Laplace</i>	13
b. <i>Fuerza contraelectromotriz inducida (F.E.M.)</i>	13
c. <i>Escobillas del inducido</i>	14
d. <i>Tipos de motores</i>	14
2. Esquema eléctrico equivalente de la máquina de corriente continua	15
3. Ecuaciones de la máquina de corriente continua	15
4. Característica mecánica del motor	16
5. Pérdidas en el motor	18
Capítulo III: Análisis de la máquina de corriente continua del patinete eléctrico	20
1. Características del motor.....	20
2. Cálculo de los parámetros de la máquina.....	21
a. <i>Determinación de la resistencia interna del inducido</i>	22
b. <i>Determinación de la F.E.M inducida aplicando una tensión al motor de 24 V (en régimen permanente)</i>	23
c. <i>Determinación de la constante eléctrica K_e</i>	23
d. <i>Determinación de la inductancia interna del inducido</i>	23
Capítulo IV: Aceleración controlada del motor: Modelización de un convertidor de potencia DC-DC (chopper de un cuadrante).....	25
1. Teoría del chopper de un cuadrante.....	25
a. <i>Introducción</i>	25
b. <i>Ciclo de trabajo de la señal de onda cuadrada</i>	27
2. Transistor Mosfet con canal de tipo N.....	28
a. <i>Funcionamiento del transistor</i>	28
b. <i>Elección del transistor</i>	30
3. Fases de funcionamiento del chopper.....	31
a. <i>Fase de alimentación</i>	31
b. <i>Fase de “rueda libre”</i>	32
4. Régimen continuo y discontinuo.....	33
5. Resultados experimentales	34

a. <i>Funcionamiento en régimen continuo</i>	35
b. <i>Funcionamiento en régimen discontinuo</i>	37
Capítulo V: Aceleración y frenado regenerativo del motor: Modelización de un convertidor de potencia DC-DC (chopper de dos cuadrantes)	39
1. Introducción.....	39
2. Principio de funcionamiento del chopper dos cuadrantes.....	40
a. <i>Funcionamiento de la máquina de tipo motor (aceleración controlada)</i>	41
b. <i>Funcionamiento de la máquina de tipo generador (frenado controlado)</i>	42
3. Cambio de funcionamiento de la máquina de corriente continua (motor \leftrightarrow generador)	44
4. Estrategia de comanda de los transistores T1 y T2	44
5. Implementación del chopper de dos cuadrantes	46
Conclusión.....	47
ANEXOS	48
ANEXO A.....	49
ANEXO B	53
BIBLIOGRAFÍA	58

Resumen del proyecto

Introducción

Este proyecto está basado en nociones de Electricidad y Energía. Cabe recalcar que haremos uso del campo del Electromagnetismo, aunque sea de una forma indirecta. El núcleo duro de nuestro estudio se basa en la rama eléctrica de la Electrónica de Potencia.

Se trata de manejar el motor de corriente continua de un patinete eléctrico, permitiendo así la regulación de su velocidad según la función que el usuario desee. Nos focalizaremos solo en la aceleración y deceleración controlada de esta máquina.

Es importante destacar la importancia del análisis previo de la máquina eléctrica así como de los componentes del vehículo para poder crear un modelo válido de comanda.

Sin duda, la regulación de la velocidad del motor sería el siguiente paso a dar en este proyecto. Se añadiría consistencia a nuestro prototipo, asegurando una comanda eficaz y sin errores.

Planteamiento del problema

Inicialmente, teníamos la estructura de un patinete eléctrico que funcionaba con dos baterías en serie de 12 voltios y una máquina de corriente continua integrada en él. Con estos elementos, se nos pedía llevar a cabo la electrónica de potencia que permitiese el control de velocidad del vehículo.

Para ello, hemos buscado modelizar un sistema apropiado que permita la regulación de la velocidad a través de una señal de onda cuadrada (señal de control) y de la variación de su ciclo de trabajo.

El trabajo se divide en dos etapas distintas. La primera consiste en realizar un estudio de la máquina eléctrica, para después pasar al diseño del circuito de control de la máquina eléctrica. En primer lugar nos encargamos de la función de aceleración controlada (convertidor DC-DC, chopper de un cuadrante), correspondiente al primer cuadrante de funcionamiento del motor. Más allá, pasaremos a las funciones de aceleración y deceleración controlada (convertidor DC-DC, chopper dos cuadrantes), funcionamiento correspondiente al primero y al cuarto cuadrante del motor.

Tecnología utilizada

La realización del proyecto se ha llevado a cabo en el Departamento de Energía de Supélec (París). Hemos utilizado un motor de corriente continua (de imanes permanentes) con una potencia máxima de 100 vatios, la estructura de un patinete eléctrico con sus correspondientes baterías (2 baterías conectadas en serie, de 12V cada una de ellas), un generador de tensión continua, un generador de señales, dos convertidores de corriente continua-continua (implementados en el departamento de Energía de Supélec), y los aparatos de medida necesarios para la observación de magnitudes eléctricas (osciloscopio, multímetro).

Análisis previo del motor

Dejando a un lado la electrónica de potencia, hemos conectado en primer lugar los bornes de alimentación del patinete a una fuente externa de tensión continua ajustable. De esta forma no nos afectaban las imperfecciones de las baterías y podíamos extraer información de la máquina de corriente continua al variar la tensión del inducido (cálculo de las constantes eléctrica y mecánica, resistencia interna, inductancia interna, etc.).

Variador de velocidad: aceleración controlada del motor (chopper de un cuadrante)

El circuito diseñado está compuesto por un convertidor DC-DC (chopper de un cuadrante) implementado con dos transistores Mosfet con diodos de rueda libre; un condensador de filtrado; un generador de corriente continua; y por la propia máquina eléctrica.

La compuerta del transistor T2 (ver Ilustración 1) se excita con una señal de onda cuadrada, y tiene por función la de transmitir una tensión periódica de onda cuadrada al motor, cuyo valor medio se fija según el ciclo de trabajo de la onda emitida por el generador de señales. El condensador de filtrado permite eliminar el rizado de la corriente que pasa por el generador de tensión, y reducir los saltos de tensión en los transistores. Es una forma de proteger el circuito.

Por otra parte, la compuerta y el surtidor del transistor T2 se conectan (T2 no conduce en ningún caso). Su utilización será necesaria cuando el diodo tenga que conducir corriente (estado bajo de la señal generada en la compuerta del transistor T2).

Nb: El circuito solo funciona con una corriente positiva. Es decir que el generador suministra siempre energía al motor.

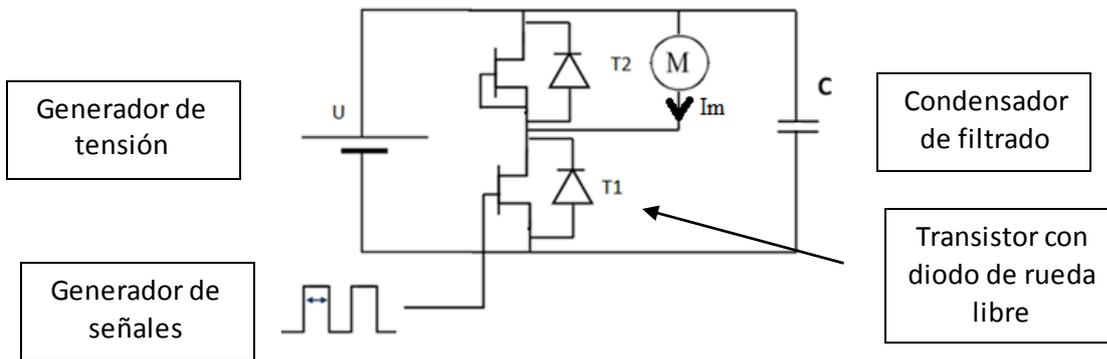


Ilustración 1.a: Esquema eléctrico del chopper de un cuadrante conectado al motor

Variador de velocidad: funciones de aceleración y frenado controlados del motor (chopper de un cuadrante)

Este chopper se usa para la aceleración controlada del motor (suministro de energía del generador al motor) pero también de su frenado regenerativo (suministro de energía del motor al generador).

El circuito diseñado para este tipo funcionamiento del motor consta de un convertidor dc-dc (chopper de dos de dos cuadrantes), implementado con dos transistores (T1 y T2) que conmutan complementariamente; un condensador de filtrado (desempeña la misma función que en el apartado anterior), un generador de corriente continua; y la propia máquina eléctrica.

En este caso, la corriente que pasa por el motor es la que impone el tipo de funcionamiento. Si la corriente es positiva, el funcionamiento es el mismo que el del chopper de un cuadrante. Si no, el transistor T2 y el diodo D1 serán los encargados de la conducción del circuito.

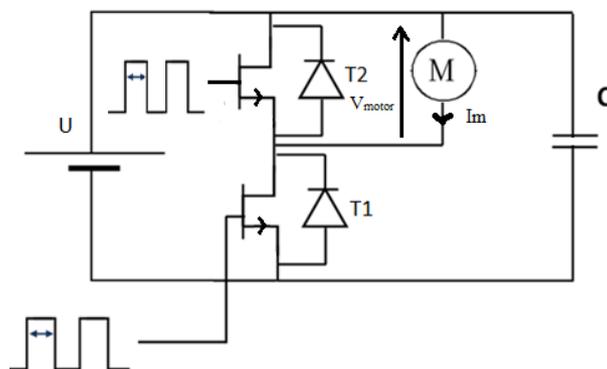


Ilustración 2.a: Esquema eléctrico del chopper de dos cuadrantes

Nb: Las señales de onda cuadrada aplicadas a los dos transistores tienen ciclos de trabajo opuestos ($\alpha_2=1-\alpha_1$).

Resumen

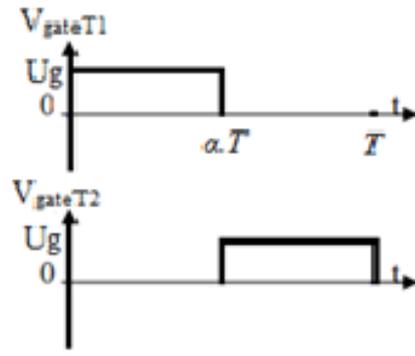


Ilustración 3.a: Señales de onda cuadrada que controlan los transistores T1 y T2

Abstract

Introduction

This project is based on terms of Electricity and Energy. The field of Electromagnetism will be used in an indirect form. The strongest core of the study is found in Power Electronics.

The main issue of the Project is to handle the DC motor of an electrical scooter, allowing this way the regulation of its speed according to the use that the user wishes. The project will focus only in the control of the acceleration and the deceleration of this machine.

It is important to emphasize the importance of a previous analysis of the electrical machine as well as the components of the vehicle to be able to create a valid model to command.

The regulation of the speed of the motor will be the next step in this project. This will give more validity to the prototype, making sure it commands properly and without mistakes.

Proposal of the problem

Initially, we had the structure of an electrical scooter that was working with two batteries in series of 12 volts and a machine of direct current integrated to it. With these elements, it was demanded to carry out the power electronics that allow to control the speed of the vehicle.

For it, it was sought to model an appropriate system that allows the regulation of the speed through a signal of a square wave (signal of control) and the variation of its cycle of work.

The work is divided into two different stages. The first one consists in a study of the electrical machine, followed by a design of the circuit to control the speed. Firstly, it is designed the model to control the acceleration (converter DC-DC, chopper one quadrant), corresponding to the first quadrant of functioning of the motor. Secondly, we will go on with the control of acceleration and deceleration with a converter DC-DC, chopper two quadrants, corresponding to the first one and to the fourth quadrant of the motor.

Technology used

The development of the project has been carried out in the Department of Energy in Supélec (Paris). A DC motor of permanent magnets has been used, with a maximum power of 100W, a structure of an electrical scooter with its corresponding batteries (2 batteries connected in series of 12V each of them), a generator of direct voltage, a generator of signals PWM, two converters of direct-direct current (implemented in the department of Energy in Supélec), and the appropriate devices to measure several magnitudes (oscilloscope, multimeter).

Previous analysis of the motor.

Leaving aside the power electronics, there have been connected firstly the points of the supply of the scooter to an external, constant and adjustable source of voltage. Thus, avoiding the imperfections and losses of the batteries, and extracting information of the machine of direct current thanks to the change in the voltage of the induced element (calculation of the electrical and mechanical constants, internal resistance and inductance, etc.).

Variable-speed drives: function of acceleration controlled of the motor (chopper of one quadrant)

The circuit designed integrates a convertor DC-DC consisting of two MOSFET transistors with free wheel diodes, a capacitor as a filter, a DC generator and the motor.

The function of this circuit is to transmit a variable voltage of squared wave to the motor to change its average value according to the cycle of work of the wave emitted by the generator of signals (connected to the gate of the transistor T1). The capacitor (filter) allows to minimize the variations of current in the motor that are caused by the load (rolls + driving chain) and to obtain curves of voltage and current without noise.

Nb: This chopper only functions with a motor positive current. The energy transmitted goes from the generator to the motor.

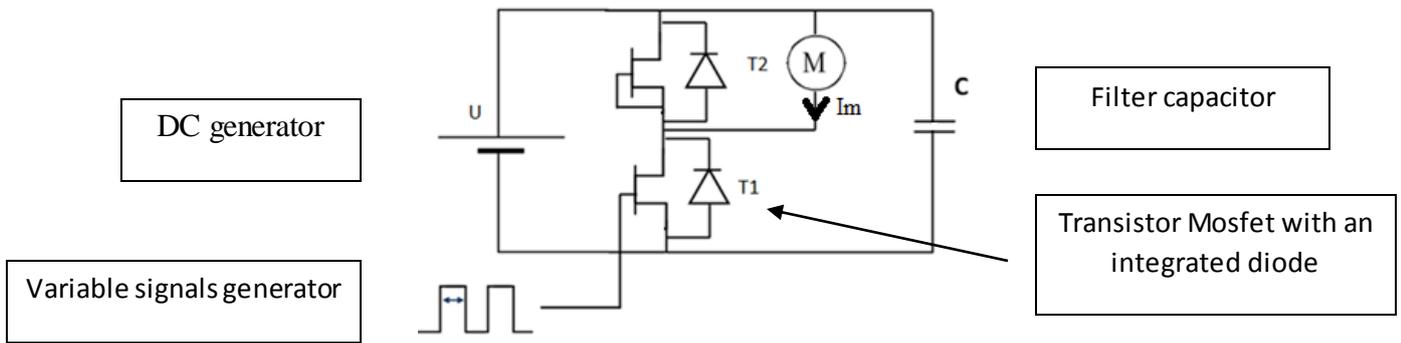


Illustration 1.b: Electrical diagram of the one quadrant chopper

Variable-speed drives: Control of acceleration and deceleration of the motor (one quadrant chopper).

This chopper is used to control the acceleration of the motor (power supplied from generator to motor) but also of its deceleration (power supplied from motor to generator). The circuit designed consists of a converter DC-DC (chopper of two quadrants), implemented with two transistors (T1 and T2) that commute; a capacitor (filter) with the same function as in the previous case, a generator of direct current and the electrical machine. In this case, the current passes through the motor is the one that imposes the type of functioning. If the current is positive, the functioning is the same that that of the chopper of one quadrant. If not, the transistor T2 and the diode D1 will be the managers of the conduction of the circuit.

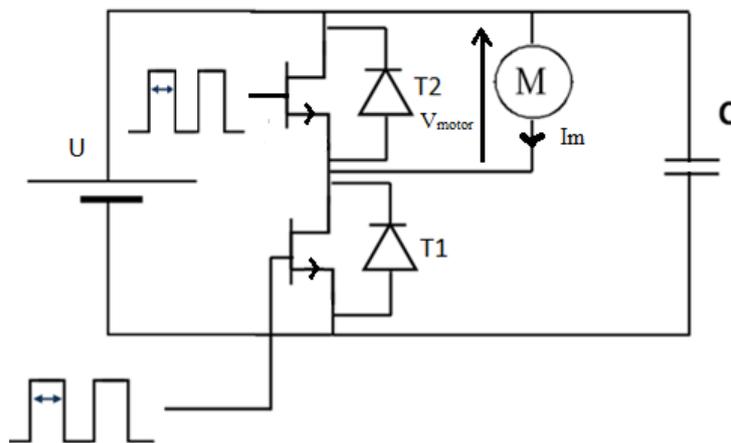


Illustration 2.b: Electrical diagram of the two quadrant chopper

Abstract

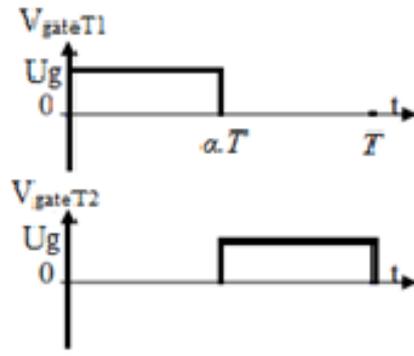


Illustration 3.b: Signals commanding transistors T1 and T2

Introducción

Hemos decidido estudiar un motor del que se está hablando cada vez más. Debido a la crisis del petróleo, toda la tecnología que no tenga que quemar un combustible durante su utilización, es símbolo de futuro e inversión. Este pequeño proyecto es por tanto muy útil en cuanto a la introducción a las nuevas tecnologías.

Si hacemos una pequeña comparación entre los vehículos eléctricos y de combustión, nos damos cuenta que el motor eléctrico es una máquina más compacta, más barata y más simple de diseñar a igualdad de potencia. No es necesario ningún circuito de refrigeración, y apenas necesita mantenimiento. Otro motivo por el cual es muy atractivo para los inversores es su ruido imperceptible durante el uso, así como la fácil regulación de sus vibraciones. Sin embargo, defectos como la falta de autonomía o la velocidad máxima inferior a la de un motor de combustión, hacen de él, una fuente de incertidumbre para el mercado.

El trabajo consiste por tanto en modelizar e implementar el variador de velocidad del motor eléctrico de un patinete. La escuela de ingeniería donde se realiza el estudio (Supélec, París) nos ha proporcionado para ello, la estructura de un patinete con sus dos baterías de 12 V y el motor de corriente continua, propio del vehículo.

Nuestro objetivo será el de llevar a cabo un estudio de la máquina eléctrica, para más tarde realizar dos convertidores de corriente continua-continua (DC-DC) que controlen la aceleración en primer lugar, y más tarde, el frenado y la aceleración.

Las materias técnicas abordadas en este trabajo son:

- **Electrónica de Potencia:** Variación de la velocidad del motor a través del diseño de dos convertidores DC-DC. Elección de transistores para la realización de la electrónica de potencia.
- **Máquinas Eléctricas:** Proyecto basado en un motor eléctrico. Análisis de las constantes y valores nominales que lo definen. Pérdidas asociadas.

Aunque no nos interese en la regulación del motor (parte automática), esta podría formar parte de un trabajo complementario al nuestro, dando validez y consistencia al proyecto.

Capítulo I: Análisis del patinete eléctrico

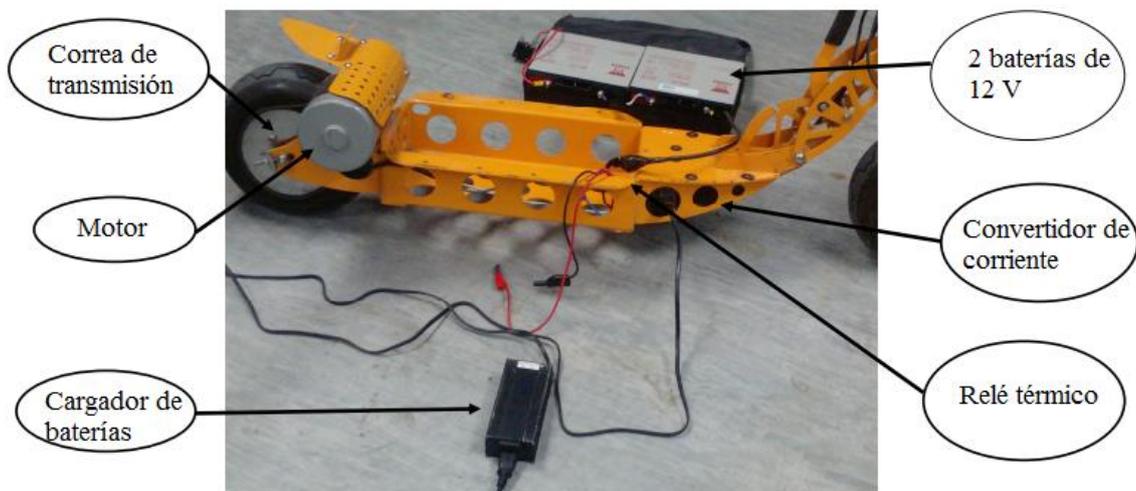


Ilustración 1: Componentes del patinete eléctrico

El patinete eléctrico es un sistema autónomo que funciona con dos baterías en serie de 12V, y posee un convertidor integrado que permite la variación de su velocidad a través de la regulación de la tensión inducida en el motor de corriente continua. La protección térmica está asegurada por un relé que podría ser remplazado en su defecto por un microcontrolador con captador de temperatura.

La transmisión entre el par motor y las ruedas se obtiene a través de una correa de distribución aplicada en dos ruedas dentadas: la del motor posee 13 dientes y de la de la rueda, 75. Esto implica que el motor gire 5,77 ($75/13$) veces más rápido que la rueda.

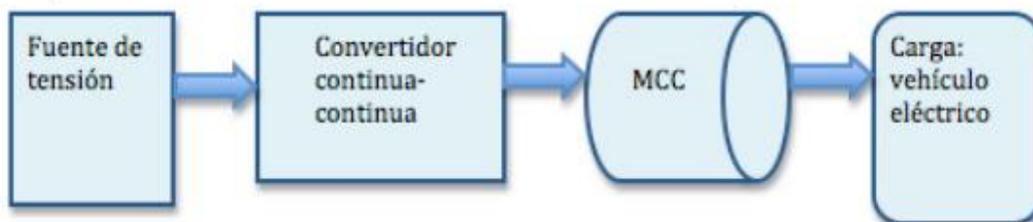


Ilustración 2: Esquema representativo del funcionamiento del patinete

Características del vehículo:

- Peso total: 8kg
- Diámetro ruedas: 20 cm
- Diámetro rueda dentada de la rueda: 8,2 cm
- Diámetro rueda dentada del motor: 1,4 cm
- Velocidad máxima alcanzada : 12 km/h
- Dimensiones: 750 x 160 x 900 mm
- Peso máximo soportado: 80kg

Capítulo II: Teoría sobre la máquina de corriente continua con imanes permanentes

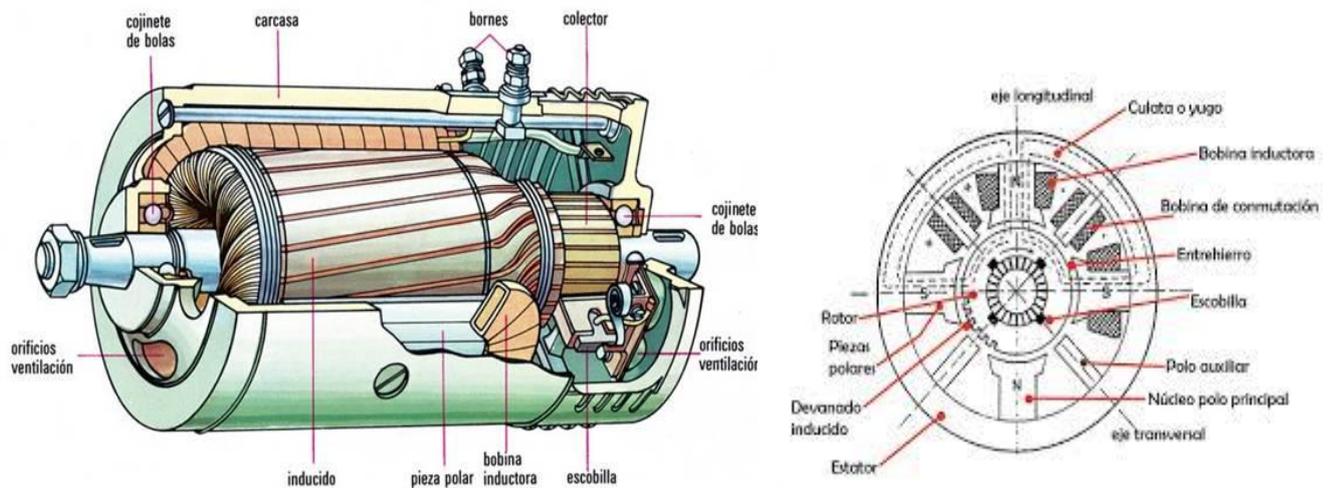


Ilustración 3: Esquemas de un motor de corriente continua con imanes permanentes

1. Principio de funcionamiento de la máquina de corriente continua

La máquina de corriente continua es un aparato que convierte energía eléctrica en mecánica gracias a un movimiento giratorio que se genera por un campo magnético. Puede funcionar en modo generador o motor, según si consume o proporciona potencia.

Además, está compuesto por dos elementos que son el estator y el rotor. El primer componente da soporte al aparato y se denomina inductor. Sus dos imanes permanentes de polos opuestos generan un campo magnético fijo. Por otra parte, el rotor o inducido, está compuesto por conductores en forma de espiras. Estas últimas están sometidas a la fuerza de Laplace (debido al campo generado por el inductor), lo que conlleva a su rotación entorno a un eje. Cuando las espiras giran con una cierta velocidad, el flujo magnético que las atraviesa crea una fuerza electromotriz inducida. Para no invertir su velocidad de rotación a cada medio giro (fuerza de Laplace se invierte debido a la orientación de la espira con respecto al campo magnético), el conjunto colector/escobillas cambia el sentido de la corriente de cada espira, lo que permite una rotación constante del rotor.

a. *Fuerza de Laplace*

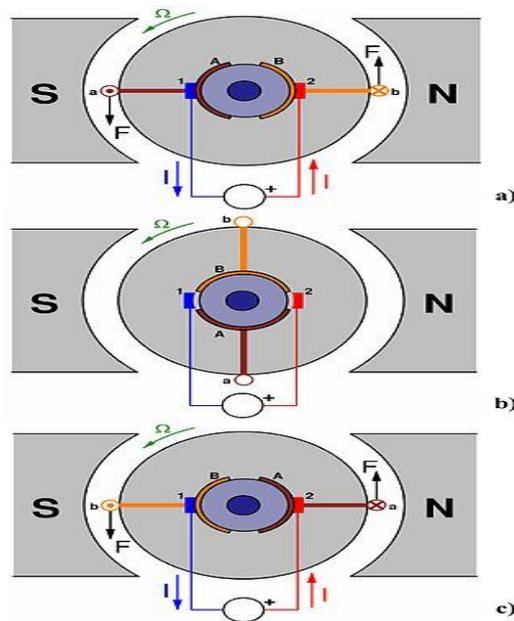


Ilustración 4: Funcionamiento de un motor de corriente continua de dos polos, con una sola bobina y dos delgas en el rotor. 1, 2: Escobillas; A, B: Delgas; a, b: Lados de la bobina conectados a las delgas A y B

Un conductor por el que pasa corriente y atraviesa un campo magnético, sufre una fuerza perpendicular al plano formado por ambos vectores (ley de Laplace), según la regla de la mano derecha.

$$F=B.L.I \quad (1)$$

- F: Fuerza en N
- I: Corriente que pasa por el conductor en A
- L: Longitud del conductor en m

b. *Fuerza contraelectromotriz inducida (F.E.M)*

Al aplicar una tensión externa U en el motor, aparece una corriente que circula por los devanados del inducido (inducido o rotor) I. Al estar en presencia de un campo magnético B constante, se crea un par en cada uno de estos conductores, lo que hace girar el rotor. En consecuencia de este giro (ley de inducción de Faraday), se inducen unas tensiones en los conductores, que se oponen a la tensión aplicada U. Esta tensión recibe el nombre de fuerza contraelectromotriz E.

c. Escobillas del inducido

Las escobillas se encargan de cambiar el sentido de la corriente de las espiras que se encuentran en la zona neutra (plano perpendicular a la recta que pasa por los polos del inductor). El número de escobillas tiene que ser igual al número de polos de la máquina.

d. Tipos de motores

- Motores con estator bobinado (excitación dependiente):

El estator es un bobinado, y existen varias configuraciones para conectar el inducido e inductor de la máquina:

1. Motor de corriente continua con excitación en serie: el devanado del estator y del rotor están conectados en paralelo.
2. Motor de corriente continua con excitación en paralelo: el devanado del estator y del rotor están conectados en paralelo.
3. Motor de corriente continua con excitación compuesta: combinación de ambas configuraciones.

- Motores de imanes permanentes (excitación independiente):

El estator se compone de dos imanes permanentes de polos opuestos. Son más pequeños, más ligeros y más eficaces que los otros tipos de motores. El problema que aparece con este tipo de máquinas es su falta de potencia. Los campos magnéticos alcanzados suelen tener valores pequeños, por lo que no permiten velocidades ni pares muy elevados.



Ilustración 5: Rotor de una pequeña máquina de corriente directa de 12 V, con imanes permanentes, de dos polos, cinco devanados, cinco delgas y dos escobillas.



Ilustración 6: Estator de una máquina de corriente continua con imanes permanentes, de dos polos.

Nb: Para el diseño de nuestro patinete, la potencia de esta máquina será suficiente, porque no necesitamos tener pares ni velocidades muy elevadas.

2. Esquema eléctrico equivalente de la máquina de corriente continua

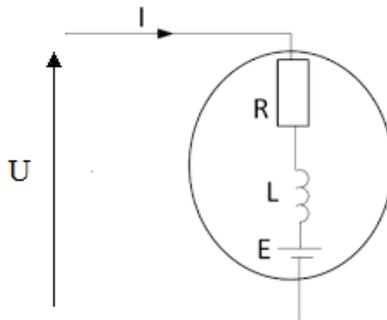


Ilustración 7: Esquema eléctrico de un motor de corriente continua

El motor se puede modelizar por una fuente de tensión E (F.E.M. inducida), una resistencia interna (R) y una inductancia interna (L). La ecuación eléctrica que rige el comportamiento de la máquina es:

$$U = L \cdot \frac{dI}{dt} + R \cdot I + E \quad (2)$$

Si introducimos la ecuación (4) en esta última:

$$U = L \cdot \frac{dI}{dt} + R \cdot I + K \cdot \Omega \quad (3)$$

3. Ecuaciones de la máquina de corriente continua

Este mecanismo da lugar a una tensión inducida (E) en el motor proporcional a la velocidad angular del rotor:

$$E = K \cdot \Phi \cdot \Omega \quad (4)$$

- Φ en Wb (Weber)
- E en V
- Ω en rad/s
- K en V.s/rad

La constante K depende del número de conductores, de la superficie de cada espira y del número de polos de la máquina.

Por otro lado, es importante destacar que la potencia electromagnética recibida por el motor desde un generador externo es:

$$P_{em} = E \cdot I = T_{em} \cdot \Omega \quad (5)$$

- E: fuerza electromotriz (F.E.M.) inducida en el motor
- I: Corriente que pasa por el motor
- T_{em} : Par que se aplica al motor
- P_{em} : Potencia electromagnética recibida por el motor

De la ecuación (2) deducimos que:

$$T_{em} = K \cdot \Phi \cdot \Omega \quad (6)$$

Como trabajamos con un motor de imanes permanentes, el flujo que se transmite es constante, y por tanto las ecuaciones mecánica y eléctrica nos quedan:

$$T_{em} = K_c \cdot I \quad (7)$$

- K_c en Nm/A

$$E = K_e \cdot \Omega \quad (8)$$

- K_e en V.s/rad

Las constantes K_e y K_c tienen el mismo valor, por lo que:

$$K_e = K_c = K \quad (9)$$

4. Característica mecánica del motor

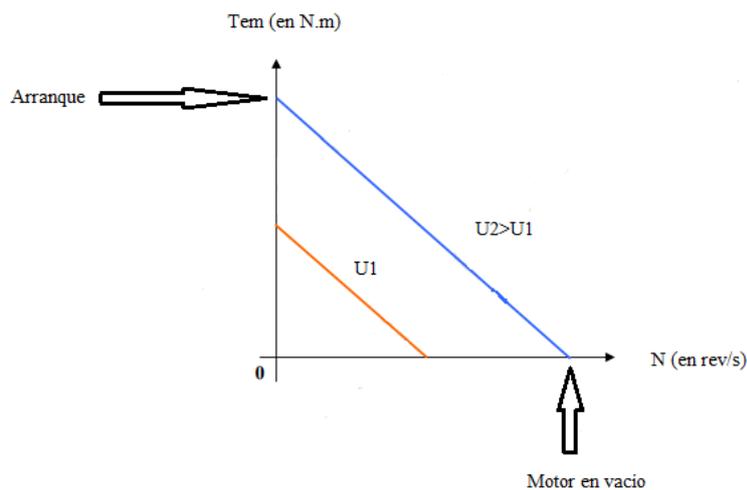


Ilustración 8: Gráfica del par motor-velocidad según la tensión externa aplicada

A tensión aplicada a la máquina corresponde una curva del par motor/velocidad. La pendiente depende exclusivamente de la excitación.

Casos particulares de funcionamiento del motor:

- 1) En vacío, la intensidad de corriente del motor es nula así como el par útil aplicado. Su velocidad se calcula por:

$$\Omega = E/K \quad (10)$$

- 2) Durante el arranque, la velocidad de rotación del motor es nula, y la F.E.M. inducida también. El par de arranque es máximo y en general, la corriente de los enrollamientos del inducido es demasiado elevada para el circuito. Por ello deben tomarse alguna de estas dos medidas de precaución en ese momento:
 - a. Se debe arrancar con una tensión reducida e ir incrementándola poco a poco.
 - b. Se debe intercalar en el circuito del motor un reóstato de arranque.
- 3) En régimen permanente, podemos determinar el punto de funcionamiento del motor conectado a una carga (en el patinete eléctrico serán las ruedas). Simplemente se deben igualar la curva del par resistivo de la carga y la curva del par motor (ambos dependientes de la velocidad de rotación de la máquina). Más tarde, podremos obtener la velocidad de rotación gráficamente como se observa en la siguiente figura.

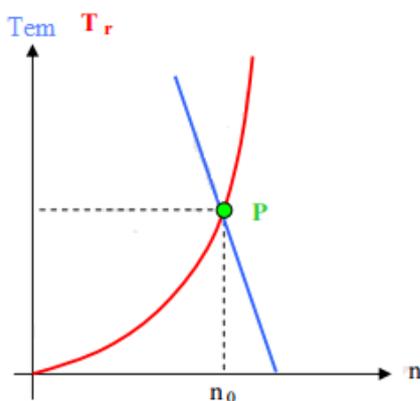


Ilustración 9: Representación gráfica del punto de funcionamiento del motor P

5. Pérdidas en el motor

Es importante conocer las pérdidas del motor para evaluar su rendimiento. Solo de esta forma seremos conscientes de la actividad real de la máquina, y podremos tomar medidas para optimizar su funcionamiento. En la tabla siguiente analizamos los distintos tipos de pérdidas más representativos que existen.

<i>Tipo de pérdidas</i>	<i>Pérdidas magnéticas (P_{hierro})</i>	<i>Pérdidas por el "Effet joule" (P_j)</i>	<i>Pérdidas mecánicas (P_m)</i>
<i>Causas</i>	Nacen del fenómeno de histéresis (campo remanente) y de las corrientes de Foucault (corrientes inducidas en el hierro) que dependen de la inducción B y de la velocidad de rotación del motor Ω .	Resistencia interna del inducido, y del circuito que acompaña al motor.	Rozamiento entre las diferentes piezas rotatorias (transmisión entre la correa de distribución y las ruedas dentadas asociadas)
<i>Medidas de mejora del rendimiento</i>	Utilización de materiales de ciclos cortos de histéresis para el inducido (como el hierro o el silicio) y utilización de láminas transversales para rellenarlo	Para evitar el recalentamiento es importante una buena ventilación del motor.	Se necesita lubricar las zonas de transmisión y utilizar rodamientos que permitan una buena conexión.

Nb: Si el motor trabaja con un flujo constante (como es el caso en las máquinas de imanes permanentes) y a velocidad constante, las pérdidas mecánicas y magnéticas también lo serán. Debido, a estas imperfecciones de la máquina diremos que su rendimiento se halla entre el 80% y el 95%.

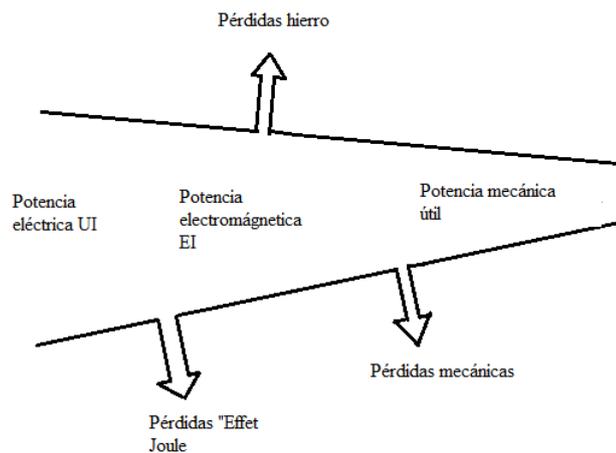


Ilustración 10: Balance energético de un motor de corriente continua

Capítulo III: Análisis de la máquina de corriente continua del patinete eléctrico

En este apartado analizaremos el motor utilizado durante el proyecto. Es necesario determinar correctamente todas las constantes y valores nominales asociados a esta máquina para poder diseñar más tarde el convertidor de corriente continua-continua que regule su velocidad.

1. Características del motor

MODEL: MY6812 by JX Motor Co., Ltd.

TYPE: Brush

VOLTAGE: 24 Volt DC

RATED SPEED: 2300 RPM

RATED CURRENT: 6A

SPROCKET: 3M Belt

OUTPUT: 100 Watts

Descripción del aparato según el fabricante:

“24 volt 100 watt electric scooter motor with a belt sprocket/cog. Compatible with many small electric scooters, including several belt drive versions of the Razor E100. Can also be used on small custom projects requiring a lightweight but powerful 24 volt motor.

Note: This motor is capable of rotation in either the clockwise or counterclockwise direction by reversing the motor's power wires.”



Ilustración 11: Fotografía del motor MY6812

2. Cálculo de los parámetros de la máquina

Para el cálculo de los parámetros del motor, se necesita un generador externo de corriente continua que remplace a las dos baterías conectadas en serie. Esto nos permitirá variar la velocidad del motor según la tensión que apliquemos.

Antes de todo, nos aseguraremos que durante el estudio experimental de la máquina nunca sobrepasamos los valores máximos dados por el constructor. Esto implica no aplicar una tensión mayor de 24 V al motor, una corriente superior a 6 A y no sobrepasar una velocidad angular de 2300 rpm.

La primera condición se verifica cuando el generador DC (0-60V) no pase de los 24V. En caso de sobrepasar este valor, tendríamos un pequeño margen de tensión debido a la resistencia y la inductancia interna de la máquina.

En cuanto a la corriente, no nos supone ningún riesgo el no verificar constantemente su valor. La limitación de corriente de nuestro generador DC es de 1,5 A, inferior a los 6 A que nos impone el constructor. Esta limitación de corriente ha provocado grandes dificultades a la hora de calcular los parámetros internos de la máquina, como es el caso de la resistencia interna del inducido.

Finalmente, dado que la tensión máxima que se aplicará al motor es de 24 V (simulación de las dos baterías en serie, sin ninguna restricción de la electrónica de potencia), es necesario observar, con la ayuda de un taquímetro, la velocidad angular del motor en este punto de funcionamiento. Lo más fácil para ello, es hallar la rotación de la rueda (191 rpm). Al ser la velocidad del motor 5,77 veces superior a la de la rueda, obtenemos una velocidad angular de 1102 rpm, muy inferior al valor máximo de 2300 rpm.

Antes de determinar los parámetros, recordamos las ecuaciones que rigen el funcionamiento del motor son:

Ecuación eléctrica: $U = E + L \cdot di/dt + R \cdot I$

Ecuaciones mecánicas: $E = K \cdot \Omega$

$$T_{em} = K \cdot I$$

a. *Determinación de la resistencia interna del inducido*

La resistencia se calcula en el régimen permanente. Se somete al motor a una tensión constante U , anulando el término di/dt . La bobina no interviene en este caso.

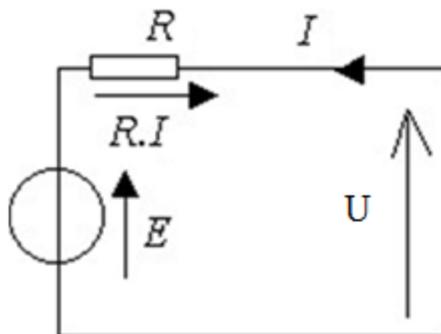


Ilustración 12: Esquema eléctrico del motor en régimen permanente

La ecuación eléctrica del motor nos queda:

$$U = R.I + E \quad (10)$$

Introduciendo la ecuación (5):

$$U = R.I + K.\Omega \quad (11)$$

El siguiente paso será el de anular el término de la tensión inducida en el motor, a través del bloqueo manual de la rueda de tracción.

Obtenemos así una relación lineal entre la tensión del generador y la corriente del inducido. El coeficiente de la pendiente es el valor de la resistencia que buscamos.

$$U = R.I \quad (12)$$

Aplicando una tensión de excitación débil (2V) para evitar la saturación en corriente de nuestro generador de tensión, obtenemos un valor de 1,5 A. Este punto de funcionamiento nos permite hallar la resistencia interna del inducido:

$$R = 1,3 \Omega$$

Nb: El resultado obtenido es una aproximación de la resistencia interna del inducido, puesto que suponemos que las resistencias del generador y de los cables son nulas.

b. Determinación de la F.E.M inducida aplicando una tensión al motor de 24 V (en régimen permanente)

En este apartado queremos conocer el margen de tensión que nos queda cuando imponemos una tensión máxima de 24V (suma de tensiones de las dos baterías puestas en serie).

Una vez que hemos obtenido el valor de la resistencia interna del inducido, es tan fácil como aplicar la ecuación eléctrica de la máquina en régimen permanente:

$$E = U - R.I \quad (13)$$

Sabiendo que $I=0,57$ A (corriente medida con un amperímetro) y $U=24V$, obtenemos una F.E.M inducida en el motor de 23,26V.

Nuestro aparato está protegido de una sobretensión, aunque el margen es pequeño (0,74V).

c. Determinación de la constante eléctrica K_e

Como hemos visto anteriormente, existe una relación lineal entre E y Omega cuya pendiente queda determinada por el coeficiente K_e .

Tomando como referencia el punto de funcionamiento anterior: $E=23,26$ V y $\Omega=1102$ rpm (115,4rad/s), la constante eléctrica nos da un valor de:

$$K_e = K = E/\Omega = 0,20$$

d. Determinación de la inductancia interna del inducido

Con el motor en parado y sin excitación, aplicamos un escalón de tensión de 1,5V al motor.

El circuito responde según la ecuación: $U=R.i + L.di/dt$, siendo la constante de tiempo:

$$\tau = L/R \quad (14)$$

Con el comando “Trigger” del osciloscopio, podemos observar la evolución en el tiempo de la corriente que pasa por el inducido. Además, el método de la tangente nos permite hallar con bastante precisión la constante de tiempo.

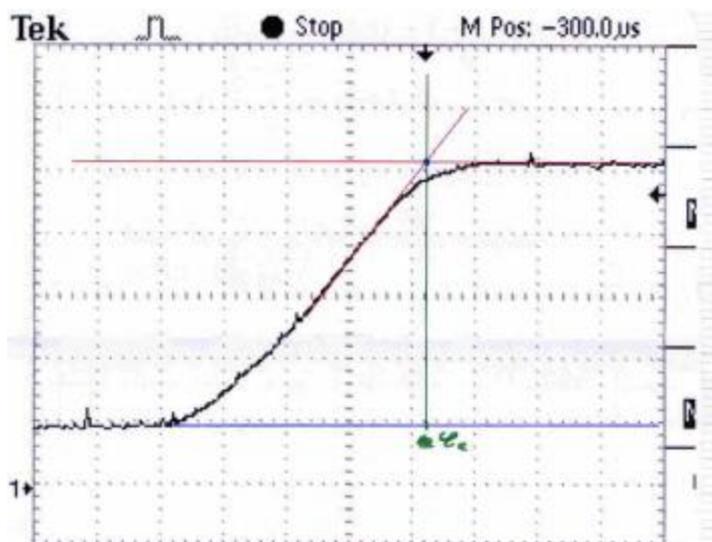


Ilustración 13: Corriente del motor ante un escalón de tensión de 2V

Resultados obtenidos:

$$\tau = 425 \mu S$$

$$L = \tau \times R = 552,5 \mu H$$

Capítulo IV: Aceleración controlada del motor: Modelización de un convertidor de potencia DC-DC (chopper de un cuadrante)

En esta parte del proyecto nos interesamos en la realización de un acelerador adaptado a nuestro motor de corriente continua. El convertidor permite trabajar en el primer cuadrante de la máquina eléctrica (ver ilustración 9). Más adelante, trabajaremos con un circuito que tenga en cuenta la aceleración y deceleración controlada del motor (primer y cuarto cuadrante), pero en ningún caso nos hará falta un chopper de cuatro cuadrantes, dejando así a un lado la marcha atrás del patinete para otro momento.

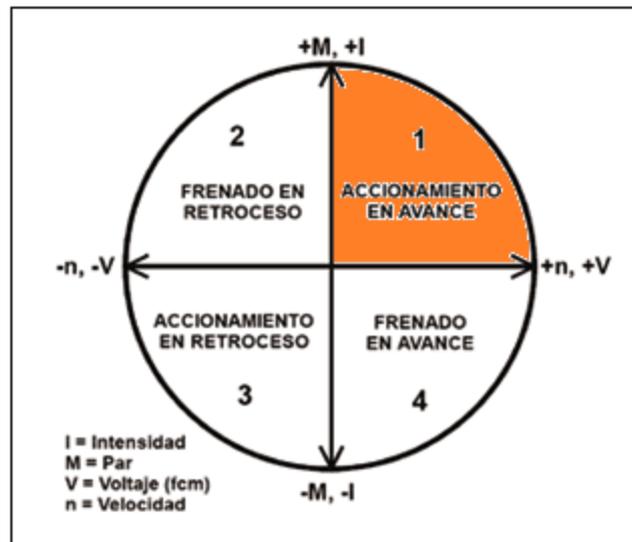


Ilustración 14: Ilustración de los cuadrantes en los que trabaja un motor de corriente continua (zona naranja: cuadrante donde trabaja el chopper)

1. Teoría del chopper de un cuadrante

a. *Introducción*

El chopper (o troceador) de un cuadrante, es un convertidor de potencia DC-DC que nos proporciona a la salida un voltaje continuo menor que el de la entrada. La característica fundamental que nos ha llevado a su realización es su alta eficacia, siendo su rendimiento de 95% (aproximadamente).

Capítulo IV. Aceleración controlada del motor: Modelización de un convertidor de potencia DC-DC (chopper de un cuadrante)

Hemos querido adaptar este circuito a nuestro motor porque las máquinas de corriente continua son capaces de funcionar con una tensión periódica de onda cuadrada. La condición para su debido comportamiento es que el período de dicha señal sea débil con respecto a la constante de tiempo de la máquina.

Para implementar el troceador, hemos necesitado:

- 2 transistores Mosfet con canal de tipo N (con diodo de rueda libre integrado).
- 1 generador de tensión continua
- 1 condensador polarizado de 2,2 uF
- 1 generador de señales variables
- 1 placa electrónica
- Aparatos de medida (taquímetro, multímetro, osciloscopio)

Con estos elementos, el modelo eléctrico realizado fue el siguiente:

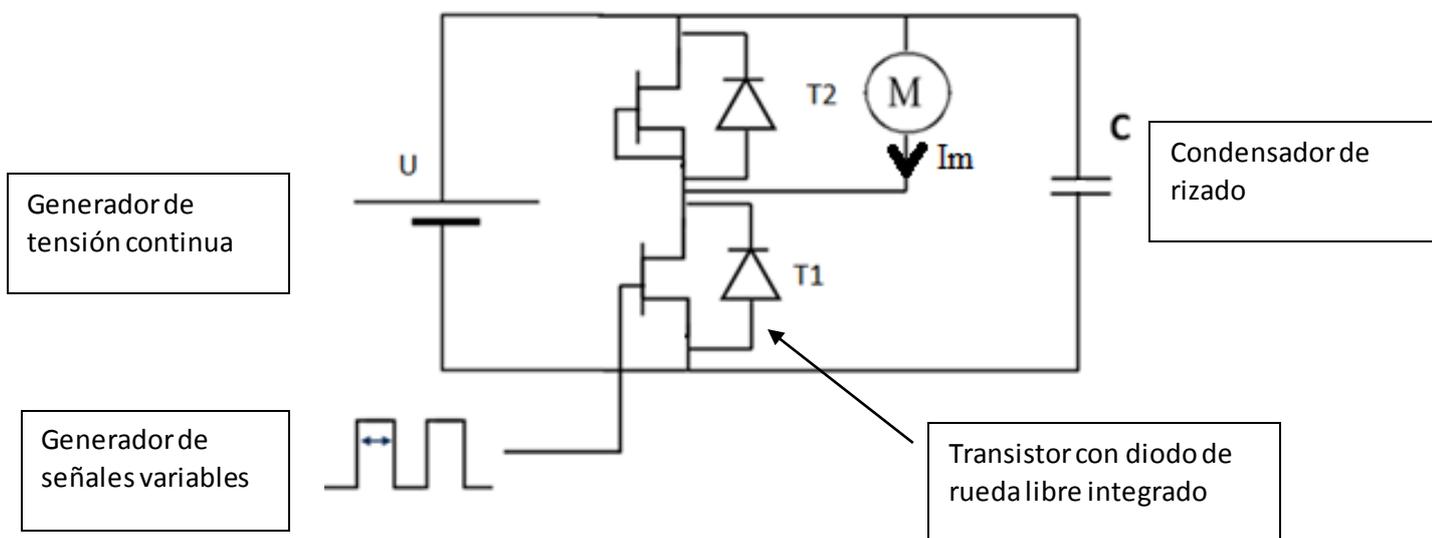


Ilustración 15: Esquema representativo del chopper de un cuadrante aplicado al motor de corriente continua

Nb: Para comprender la realización del chopper hace falta distinguir la tensión U del generador y la tensión V_{motor} que recibe el motor. Esta última dependerá del ciclo de trabajo de la onda cuadrada y del valor de U .

b. Ciclo de trabajo de la señal de onda cuadrada

Los transistores sirven como interruptores que conmutan según el valor de la señal periódica de onda cuadrada, aplicada por el generador de señales variables en la compuerta del transistor T1. Esta señal se caracteriza por un ciclo de trabajo α (valor comprendido entre 0 y 1), que relaciona el tiempo en el que la señal se encuentra en estado activo y el periodo de la misma.

$$\alpha = \tau/T \quad (15)$$

- α : Ciclo de trabajo de la señal
- τ : Duración en la que la señal se encuentra en nivel alto
- T: Período de la señal de onda cuadrada

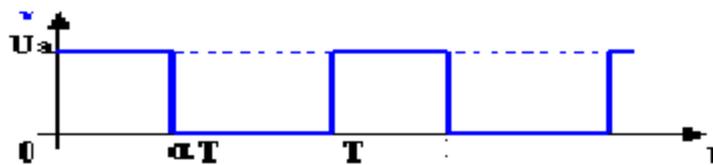


Ilustración 16: Señal de onda cuadrada con ciclo de trabajo α .

El ciclo de trabajo de la señal de onda cuadrada nos permite transmitir una tensión media variable al motor que depende del ciclo de trabajo de la onda cuadrada (la velocidad también cambiará según el ciclo de trabajo puesto que $E=Ke \cdot \Omega$). La tensión media V_{motor} se calculará de la siguiente manera:

$$V_{motor} = \alpha \cdot U \quad (16)$$

- V_{motor} : Tensión media aplicada al motor
- U: Tensión generada por la fuente de tensión continua
- α : Ciclo de trabajo

Además, existe una relación lineal entre la tensión inducida del motor (E) y su velocidad de rotación. Cuanto más débil sea el valor de la tensión media suministrada a la máquina, menor será su velocidad.

2. Transistor Mosfet con canal de tipo N

a. *Funcionamiento del transistor*

El transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor o Mosfet se utiliza para conmutar o amplificar señales (a nosotros nos interesará su primera función). Este componente tiene tres terminales accesibles desde el exterior, aunque físicamente está compuesto de cuatro partes distintas: surtidor S, drenador D, compuerta G y substrato B (conectado internamente a la compuerta, por ello los transistores tienen tres terminales accesibles).

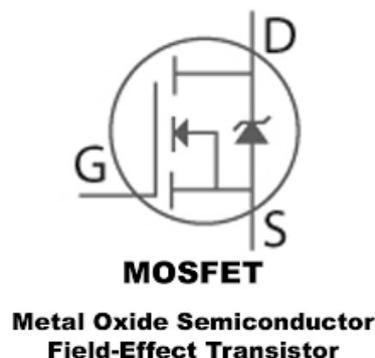


Ilustración 17: Símbolo de un transistor NMOS con enriquecimiento de canal n (diodo de “rueda libre” integrado)

El componente que usaremos es de tipo N (NMOS) con enriquecimiento de canal n, y tiene la característica siguiente: para su conmutación es necesario que la corriente fluya del drenador al surtidor y que la tensión del primero sea superior a la del surtidor. En su símbolo (ver ilustración 11), la flecha nos indica hacia donde debe ir la corriente y cuál es la posición del drenador y del surtidor. Además, este tipo de elementos no tienen capa de material N, y por tanto se requiere de una tensión positiva entre la compuerta y el surtidor para crear uno.

El Mosfet lleva además integrado un diodo denominado de “rueda libre”. Su función es crucial para conducir corriente en ambos sentidos.

Por otra parte, no debemos olvidar que la conmutación del transistor no es perfecta, y existe un pequeño retardo de tiempo cuando se comanda. Para pasar del estado de conducción al estado de circuito abierto, se consume un diferencial de tiempo que

llamaremos t_r . Cuando esto sucede a la inversa, transcurre un tiempo t_f ($t_r \approx t_f \approx 50\text{ns}$). Aunque se trate de valores ínfimos, tenemos que tenerlos en cuenta a la hora de implementar nuestros circuitos. En nuestro caso, debemos asegurarnos que la frecuencia de la onda cuadrada aplicada en la compuerta del transistor T1 sea siempre mucho mayor que el tiempo de conmutación. Por el contrario, nuestro convertidor no funcionará como es debido, y no podremos obtener los resultados deseados.

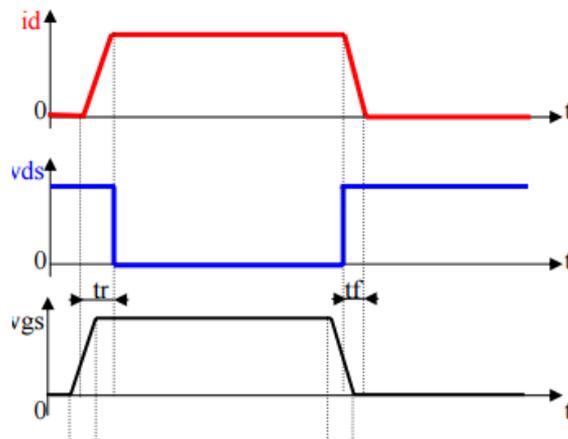


Ilustración 18: Gráficas teóricas de la tensión compuerta-surtidor y de la corriente del transistor

Por otro lado, el funcionamiento de un transistor Mosfet se puede dividir en tres regiones distintas, dependiendo de las tensiones de cada uno de sus terminales.

Región de corte:

$$\text{Condición: } V_{GS} < V_{TH} \quad (17)$$

- V_{TH} : Tensión de umbral de transistor
- V_{GS} : Tensión compuerta-surtidor

En esta región, el dispositivo se comporta como un circuito abierto, por donde no pasa la corriente. No hay conducción entre el surtidor y el drenador.

Región lineal u óhmica:

$$\text{Condiciones: } V_{GS} > V_{TH}, \text{ y } V_{DS} < (V_{GS} - V_{TH}) \quad (18)$$

- V_{DS} : Tensión drenador-surtidor

Al ser V_{GS} mayor que la tensión de umbral, aparece una región de agotamiento que separa al surtidor del drenador. Si esta tensión crece lo suficiente, aparecerá un canal de

conducción. En caso de existir una diferencia de tensión entre drenador y surtidor menor que la tensión de umbral, tendremos una corriente que pasará. Podemos decir que el transistor funciona como una resistencia controlada por la tensión de compuerta.

Región activa:

$$\text{Condiciones: } V_{GS} > V_{TH}, \text{ y } V_{DS} > (V_{GS} - V_{TH}) \quad (19)$$

Cuando generamos una tensión entre el drenador y surtidor que supera un cierto límite, la corriente no se interrumpe, pero su valor se hace independiente de la diferencia de potencial entre surtidor y compuerta.

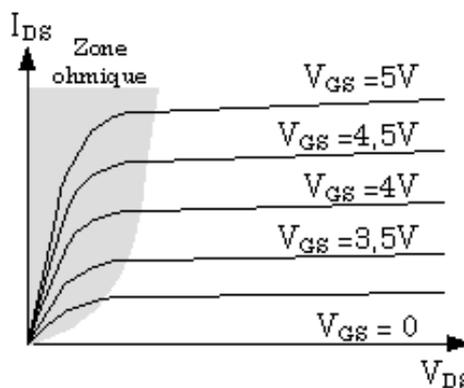


Ilustración 19: Funcionamiento de un transistor NMOS (región óhmica y activa)

b. Elección del transistor

Para realizar nuestro convertidor deberemos elegir un tipo de transistor que corresponda con las restricciones del circuito. El transistor debe ser capaz de soportar una tensión de 24V, una corriente de 1,5 A y una potencia de 36W. Además, lo ideal para no tener pérdidas ni sobrecalentamiento del transistor es que su resistencia interna sea lo más pequeña posible. Por ello hemos decidido hacer uso del transistor BUZ10A (ver Anexo A), que cumple con estos criterios de selección:

- $I_{dmax}=17A$
- $R_{ds}=0,12\Omega$
- $V_{dsmax}=50V$

Nb: Otra ventaja de este componente es su fácil utilización. Cada terminal tiene apuntada una letra que nos permite saber si se trata del drenador (D), del surtidor (S) o la compuerta (G).

3. Fases de funcionamiento del chopper

Distinguiremos ahora dos fases de trabajo distintas: la fase de alimentación (generador suministra potencia al motor) y la fase de “rueda libre” (el motor no está excitado y gira libremente).

a. Fase de alimentación

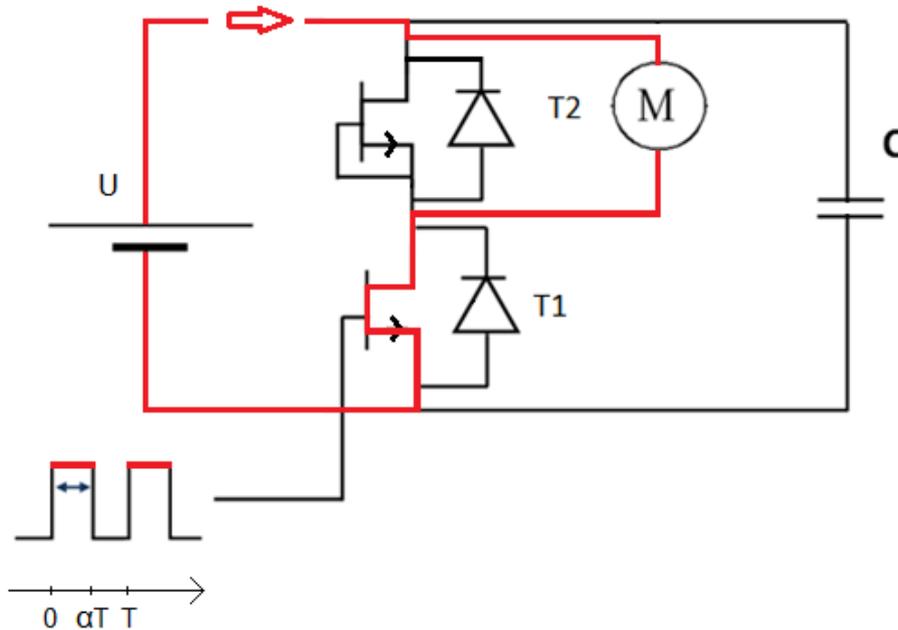


Ilustración 20: Representación del sentido de la corriente en la fase de alimentación

Al situarnos en el estado activo de la señal periódica de onda cuadrada, y suponiendo que este valor cumple la condición siguiente, el transistor conmuta y el motor consume potencia (fase de aceleración):

$$V_{GT1} > V_{TH} \quad (20)$$

- V_{GT1} : Señal aplicada a la compuerta del transistor T1 (señal periódica de onda cuadrada)
- V_{TH} : Tensión de umbral del transistor

En este tipo de funcionamiento, el transistor T2 no entra en juego, puesto que su compuerta está conectada al surtidor. Se comporta como un circuito abierto. Sin embargo, su utilidad será analizada más tarde cuando el diodo de rueda libre tenga que actuar.

El condensador de rizado tiene la función de rizar la corriente que pasa por el generador y de proteger los semiconductores ante posibles sobretensiones. Con ello podemos proteger la fuente de tensión ante picos de corriente generados por la máquina de corriente continua, pero también asegurarnos de que los transistores no están sometidos a grandes cambios de tensión.

Lo importante es que la máquina de corriente continua reciba una tensión media que rija la velocidad del motor.

b. Fase de “rueda libre”

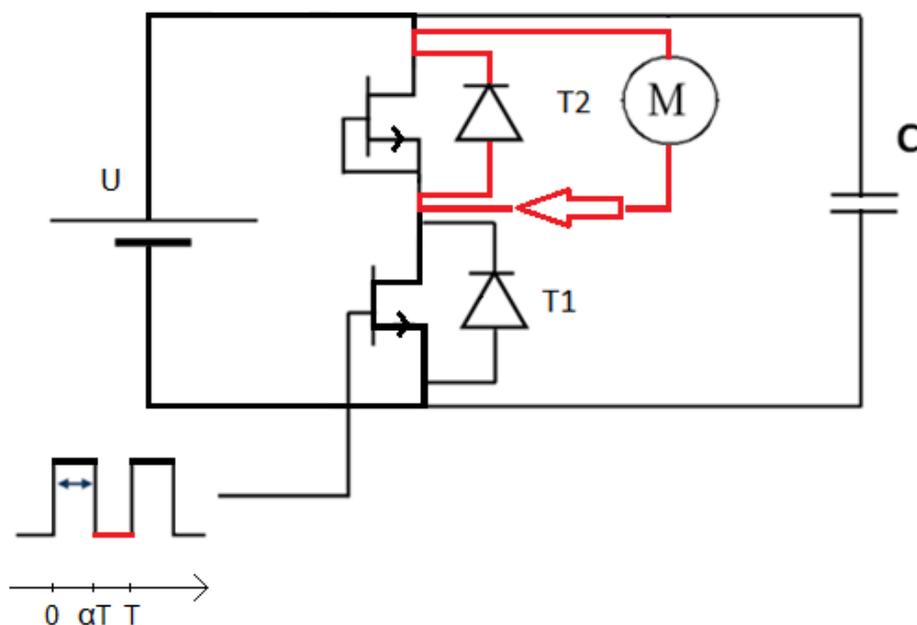


Ilustración 21: Representación del sentido de la corriente en la fase de rueda libre

Ahora nos interesa la parte baja de la señal de onda cuadrada. En este estado, el circuito funciona a través de la conducción del diodo de rueda libre del transistor $T2$. Al ser la tensión de compuerta del transistor $T1$ inferior a su tensión de umbral V_{TH} , el transistor $T2$ se abre. Sin embargo, la corriente que pasa por la inductancia interna del motor (por analogía la corriente del motor) se opone a grandes saltos. Ello obliga al diodo de rueda libre del transistor $T2$ a conducir, permitiendo así la descarga de la inductancia.

En esta fase de funcionamiento, el par aplicado a la máquina favorece su rotación.

Nb: El transistor $T2$ no conmuta en ningún caso, dado que el terminal de la compuerta y el surtidor están unidos en todo momento, por lo que no se cumple la condición de conmutación ($V_{GT2} > V_{TH}$).

4. Régimen continuo y discontinuo

El convertidor tiene dos tipos de funcionamiento: la conducción continua y la conducción discontinua.

El primero de los dos funcionamientos aparece cuando la corriente no se anula en fase de “rueda libre”. La descarga de la inductancia en el circuito no es lo suficientemente rápida para que la corriente se anule. El motor reduce su velocidad de forma controlada, y el par aplicado impide que haya un frenado excesivo. Esto se debe a la ecuación mecánica que relaciona el par aplicado al motor y la corriente que circula por él.

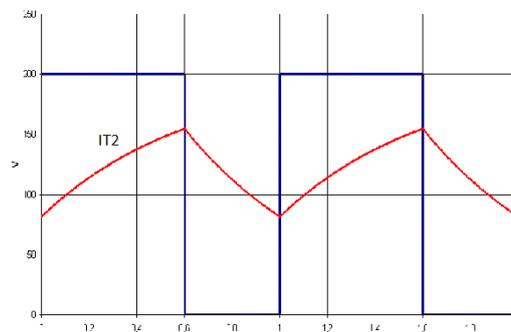


Ilustración 22: Gráficas teóricas de la corriente (curva roja) y de la tensión (curva azul) del motor en régimen de conducción continua

El otro tipo de funcionamiento, la conducción discontinua, aparece cuando la frecuencia de la señal de onda cuadrada disminuye demasiado, o cuando el ciclo de trabajo es demasiado pequeño (α tiende a 0). A la bobina del inducido del motor le dará tiempo a descargar su energía almacenada (durante la fase de alimentación) durante la fase de rueda libre. Cuando esto suceda, el diodo del transistor T2 se abrirá, y la tensión en el motor será igual a su tensión inducida:

$$V_{\text{motor}} = E \quad (21)$$

Este tipo de régimen implica una reducción de velocidad en el motor, porque la corriente que pasa por él es nula, así como el par aplicado.

Nb: Una solución para reducir el fenómeno de conducción discontinua es la de colocar una inductancia en serie con el dispositivo eléctrico, para reducir el rizado de su corriente.

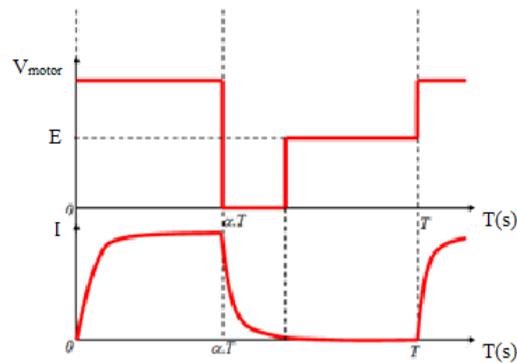


Ilustración 23: Gráficas teóricas de la corriente y de la tensión del motor en régimen de conducción discontinua

5. Resultados experimentales

Para la parte experimental, hemos fijado la tensión del generador en 24V (simulación del efecto de las dos baterías de 12V puestas en serie). Nos interesa variar el ciclo de trabajo de la señal de onda cuadrada, para ver el cambio de velocidad del motor. La frecuencia de esta onda nos permite ver los regímenes de conducción y discontinua. Teóricamente, al disminuir el ciclo de trabajo de la onda de comanda (a frecuencias altas), deberíamos percibir en el osciloscopio la presencia del régimen discontinuo. Sin embargo, por falta de precisión del circuito y aparición de ruidos, no hemos podido captar este resultado en el osciloscopio.

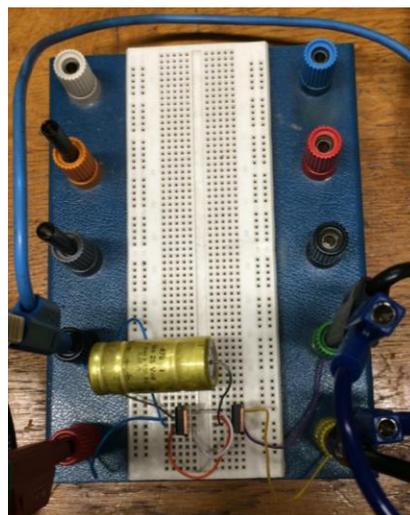


Ilustración 24: Fotografía del chopper de un cuadrante implementado en el laboratorio

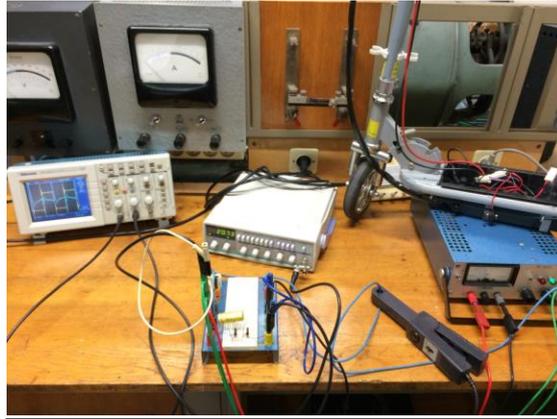


Ilustración 25: Fotografía del convertidor de potencia DC-DC implementado en el laboratorio

a. Funcionamiento en régimen continuo

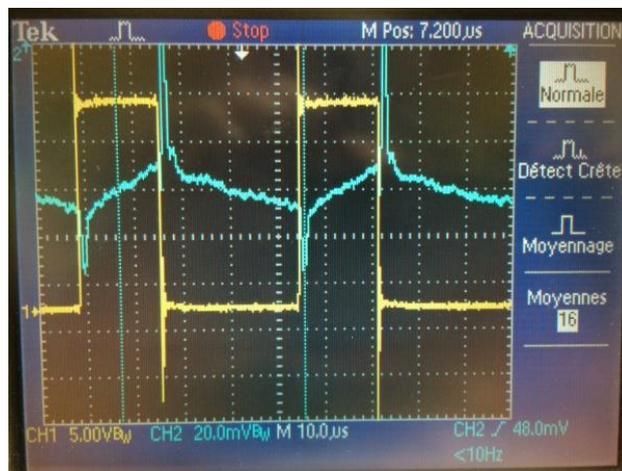


Ilustración 26: Gráficas de la tensión (curva amarilla) y de la corriente (curva azul) del motor en régimen de conducción continua, con $f=21,3$ KHz y $\alpha < 0,5$

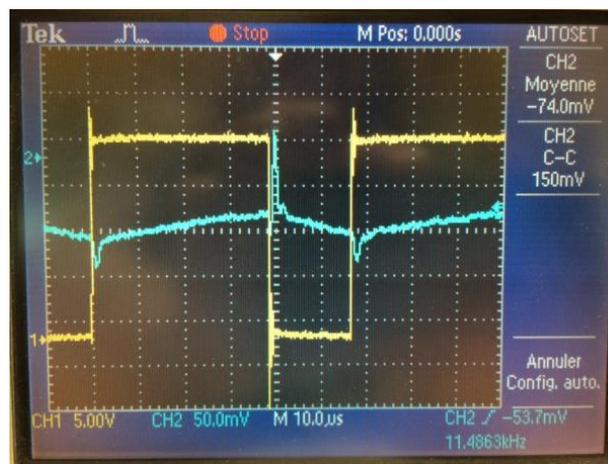


Ilustración 27: Gráficas de la tensión (curva amarilla) y de la corriente (curva azul) del motor en régimen de conducción continua, con $f=17$ KHz y $\alpha > 0,5$

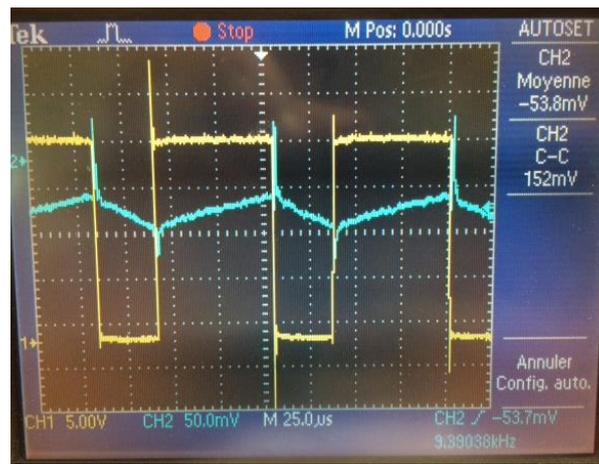


Ilustración 28: Gráficas de la tensión (curva amarilla) y de la corriente (curva azul) del motor en régimen de conducción continua, con $f=10,4$ KHz y $\alpha > 0,5$

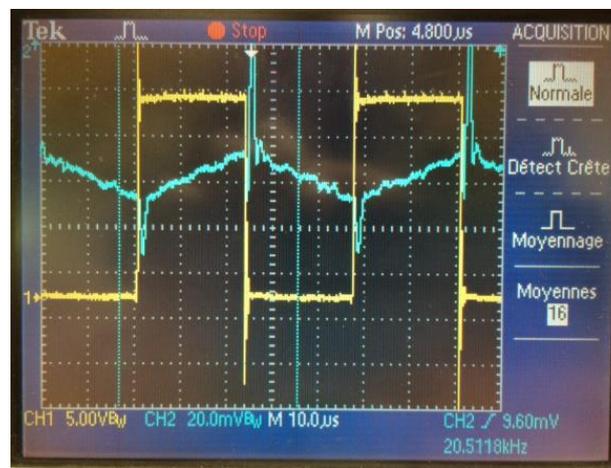


Ilustración 29: Gráficas de la tensión (curva amarilla) y de la corriente (curva azul) del motor en régimen de conducción continua, con $f=25$ KHz y $\alpha=0,5$

Análisis de los resultados:

A frecuencias altas, trabajábamos en régimen continuo como era de esperar. Cuando disminuíamos demasiado el valor del ciclo de trabajo de la onda cuadrada, las curvas contenían mucho ruido, y no veíamos el régimen discontinuo. Sabiendo que la constante de tiempo del circuito RL del motor es de 500 uS, al tomar un periodo de la señal de onda cuadrada inferior a 100uS, la bobina no conseguía descargar su energía lo suficiente para que la corriente se anulase. Por otro lado, el rizado de la corriente hubiese menor si hubiésemos colocado una inductancia en serie con el motor.

b. Funcionamiento en régimen discontinuo

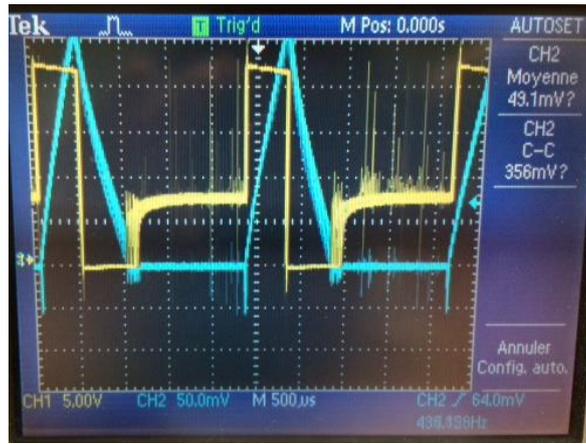


Ilustración 30: Gráficas de la tensión (curva amarilla) y de la corriente (curva azul) del motor en régimen de conducción discontinua, con $f=433\text{Hz}$ y $\alpha < 0,5$



Ilustración 31: Gráficas de la tensión (curva amarilla) y de la corriente (curva azul) del motor en régimen de conducción discontinua, con $f=433\text{Hz}$ y $\alpha > 0,5$



Ilustración 32: Gráficas de la tensión (curva amarilla) y de la corriente (curva azul) del motor en régimen de conducción discontinua, con $f=433\text{Hz}$ y $\alpha = 0,5$



Ilustración 33: Gráficas de la tensión (curva azul) y de la corriente (curva amarilla) del motor en régimen de conducción discontinua, con $f=870\text{Hz}$ y $\alpha=0,5$

Análisis de los resultados:

Al disminuir lo suficiente la frecuencia de la señal de onda cuadrada, siendo $T > 5 \tau$ (orden de magnitud), nos damos cuenta que para el valor del ciclo de trabajo que sea, el fenómeno de conducción discontinua aparece. Sin embargo, cuanto menor es este coeficiente α , mayor es el tiempo de corriente nula.

Relación entre la velocidad de rotación del motor y la tensión inducida en el motor:

Frecuencia y ciclo de trabajo de la señal de onda cuadrada	Velocidad angular de la rueda (en rpm) → taquímetro	Velocidad angular de la rueda (en rad/s) → taquímetro	Velocidad de rotación de la rueda (en rad/s) → taquímetro	Tensión inducida E a partir de las gráficas (en V)	Velocidad de rotación del motor (en rad/s) → calculada a partir de la tensión inducida E ($\Omega = E/K_e$)
$f=433\text{Hz}, \alpha < 0,5$	65	6,8	39,2	7,5	37,5
$f=433\text{Hz}, \alpha > 0,5$	147	15,4	88,9	17	85
$f=433\text{Hz}, \alpha = 0,5$	123	12,9	74,4	15	75
$f=870\text{Hz}$ y $\alpha = 0,5$	88	9,2	53,0	10	50

La relación entre la velocidad angular del motor y su tensión inducida se cumple experimentalmente, aunque haya un pequeño error entre los valores de velocidad medidos por el taquímetro y los tomados a partir de la tensión inducida.

Capítulo V: Aceleración y frenado regenerativo del motor: Modelización de un convertidor de potencia DC-DC (chopper de dos cuadrantes)

1. Introducción

En este capítulo estudiaremos el funcionamiento de un convertidor capaz de controlar la aceleración y el frenado regenerativo del motor de corriente continua. Los componentes del chopper serán los mismo que hemos utilizado anteriormente. Lo que cambia es la comanda del transistor T2, cuya compuerta ya no está conectada al surtidor, sino que es una señal de onda cuadrada complementaria a la del transistor T1. Este nuevo convertidor de potencia nos permite, en régimen permanente, la inversión de la corriente del motor. Cuando su energía cinética sea mayor que la energía proporcionada por el generador, el motor será capaz de suministrar energía a la fuente de corriente continua. El par aplicado al motor, al estar directamente relacionado con su corriente, cambiará de sentido, provocando de esta forma el frenado controlado de este último.

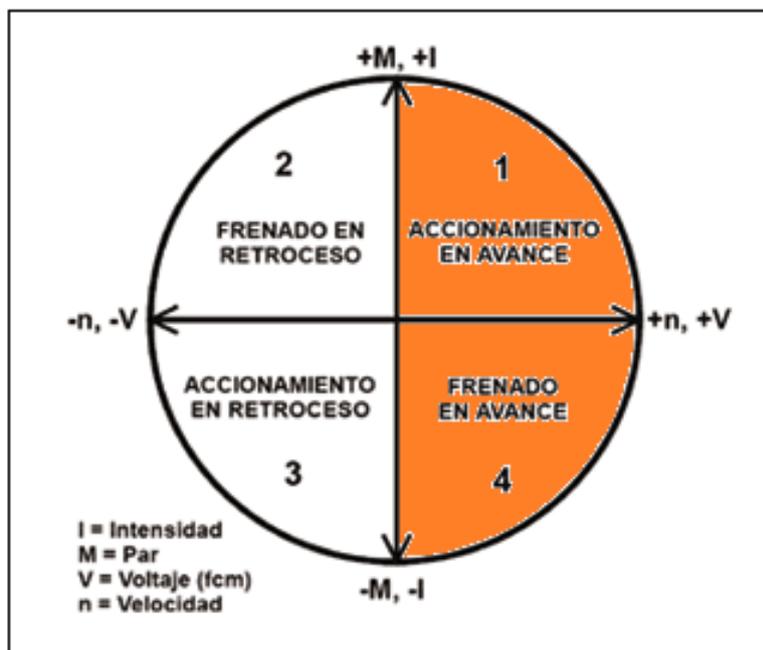


Ilustración 34: Ilustración de los cuadrantes en los que trabaja un motor de corriente continua (zona naranja: cuadrantes donde trabaja el chopper)

La utilidad adicional de este convertidor de potencia con respecto al de un cuadrante es el ahorro de energía cuando el motor pasa a modo generador. Este funcionamiento se da sobre todo en pendientes de bajada, donde el motor se acelera por su propia inercia. En este caso, la tensión contraelectromotriz aumenta según la velocidad de la máquina. A través del convertidor de potencia, se produce un frenado regenerativo en el motor y un suministro de energía a las baterías.

2. Principio de funcionamiento del chopper dos cuadrantes

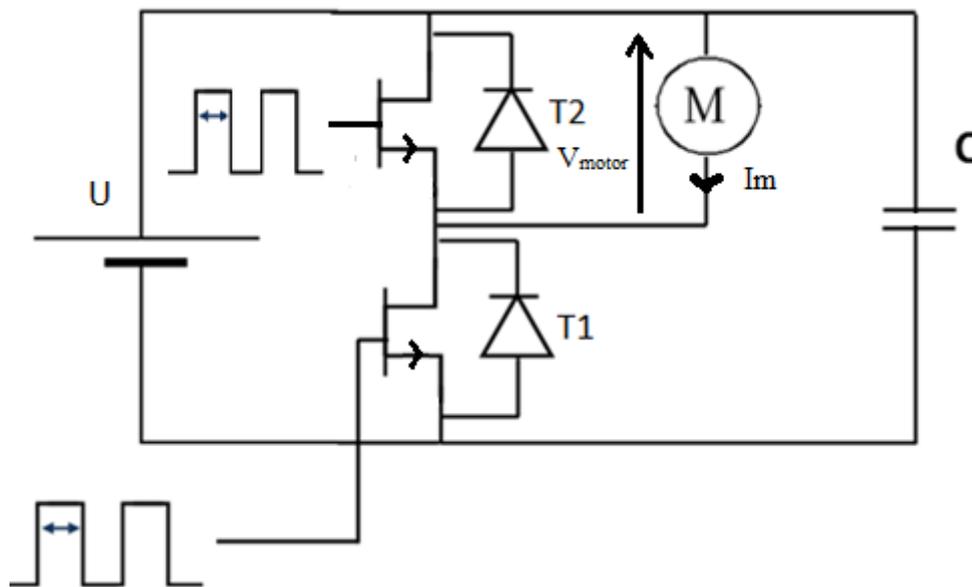


Ilustración 35: Esquema eléctrico del chopper dos cuadrantes aplicado al motor de corriente continua

Los transistores y los diodos de rueda libre elegidos para la modelización de este convertidor son los mismos que en el capítulo anterior. Hemos fijado el generador de corriente continua en 24V para simular el efecto de las dos baterías puestas en serie.

Como hemos explicado antes existen dos tipos de funcionamiento del circuito:

- Transporte de energía desde el generador hacia al motor (funcionamiento de la máquina de tipo motor).
- Transporte de energía desde el motor hacia el generador (funcionamiento de la máquina de tipo generador).

a. *Funcionamiento de la máquina de tipo motor (aceleración controlada)*

Este tipo de funcionamiento es el mismo que hemos visto con el chopper de un cuadrante. El generador suministra energía al motor e impone su velocidad de rotación.

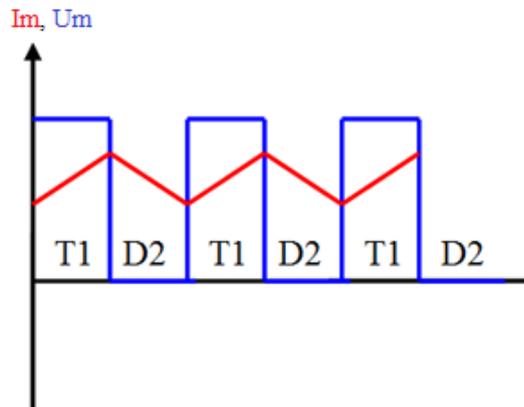


Ilustración 36: Gráficas teóricas de la tensión y de la corriente de la máquina de corriente continua en funcionamiento motor

Fase de alimentación:

Este fenómeno lo hemos estudiado anteriormente cuando modelizamos el chopper de un cuadrante. El transistor T1 conduce un cierto tiempo en el estado activo de la señal de onda cuadrada, y depende del valor de su ciclo de trabajo. Cuando ello sucede, la inductancia interna del motor se carga, y este último recibe un par que acelera su movimiento.

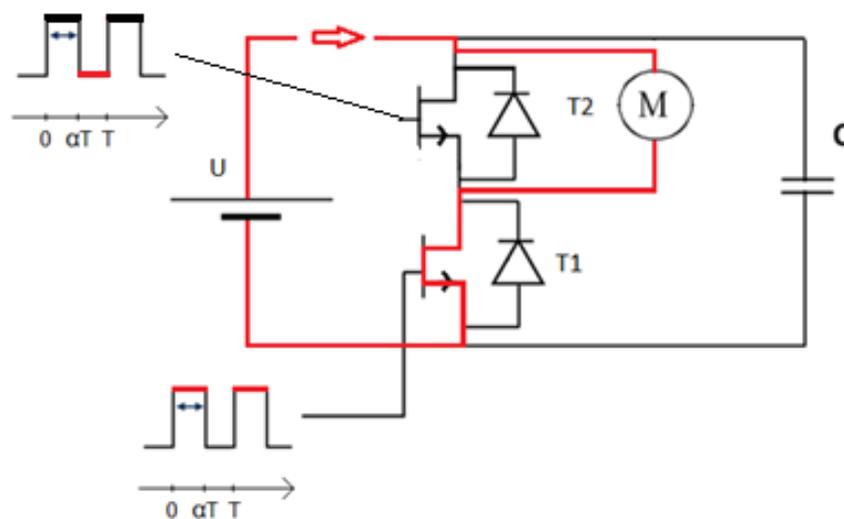


Ilustración 37: Representación del sentido de la corriente en la fase de alimentación (aceleración controlada)

Fase de “rueda libre”:

Cuando la señal de onda cuadrada, aplicada al transistor T1, se encuentra en su estado bajo, la parte inferior del circuito se abre, permitiendo la descarga de la inductancia. En esta fase, imponemos la conducción del diodo D2.

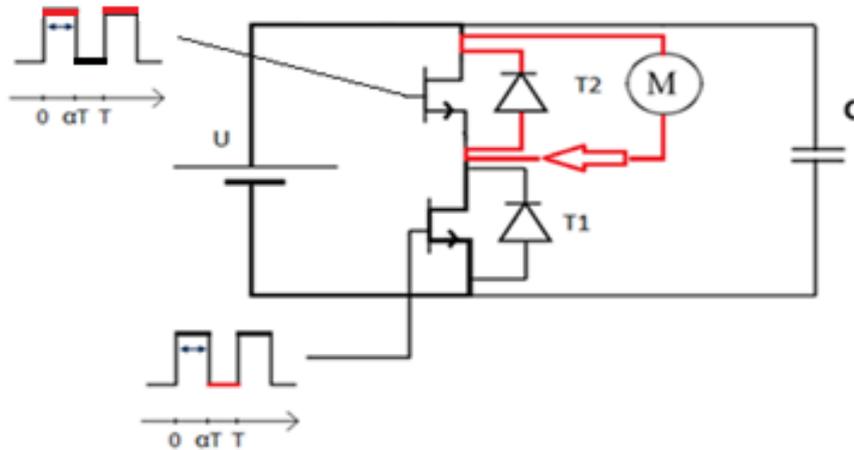


Ilustración 38: Representación del sentido de la corriente en la fase de rueda libre (aceleración controlada)

b. Funcionamiento de la máquina de tipo generador (frenado controlado)

El principio de funcionamiento es el mismo que en el caso anterior, solo que la corriente se dirige en el sentido opuesto. Se necesita por tanto que el transistor T2 y el diodo D1 entren en juego.

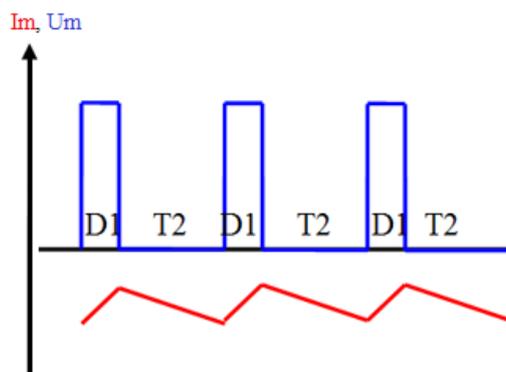


Ilustración 39: Gráficas teóricas de la tensión y de la corriente de la máquina de corriente continua en funcionamiento generador

Fase de alimentación:

Capítulo V. Aceleración y frenado regenerativo del motor: Modelización de un convertidor de potencia DC-DC (chopper de dos cuadrantes)

El transistor T2 conduce un cierto tiempo en el estado activo de la señal de onda cuadrada, y depende del valor de su ciclo de trabajo. Cuando esto sucede, la inductancia interna del motor se carga, y este último recibe un par que frena su movimiento.

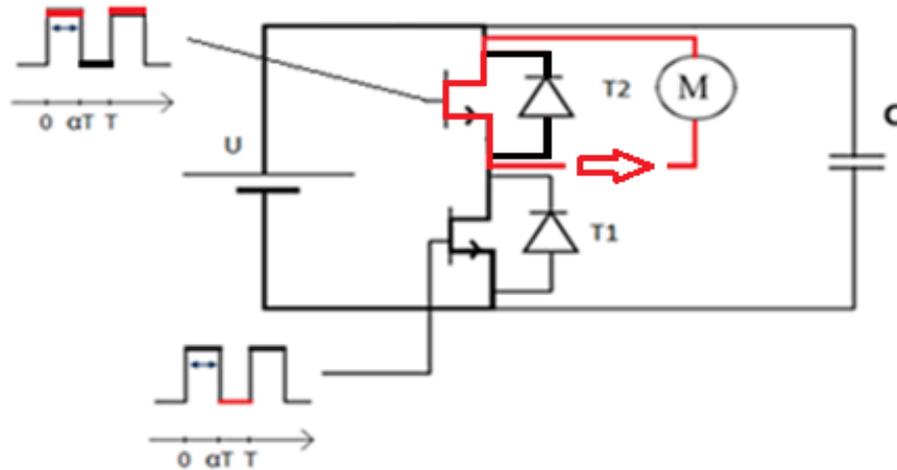


Ilustración 40: Representación del sentido de la corriente en la fase de alimentación (frenado controlado)

Fase de rueda libre:

Cuando la señal de onda cuadrada, aplicada al transistor T2, se encuentra en su estado bajo, la parte superior del convertidor (T2 y D2) se abre, permitiendo la descarga de la inductancia en el circuito. En esta fase, se obliga al diodo D1 a conducir corriente y el par aplicado al motor sigue frenando su movimiento.

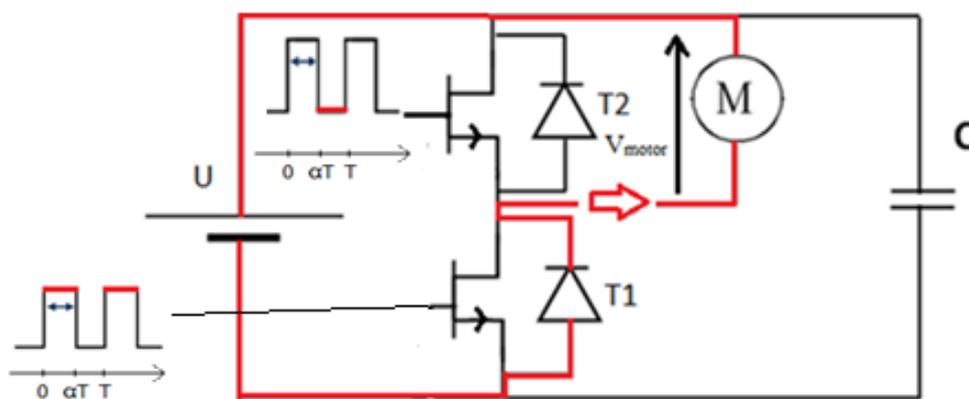


Ilustración 41: Representación del sentido de la corriente en la fase de alimentación (frenado controlado)

3. Cambio de funcionamiento de la máquina de corriente continua (motor \leftrightarrow generador)

Para pasar de un funcionamiento a otro es necesario que la corriente en el motor se anule. Antes hablábamos de conducción discontinua cuando esto sucedía, ahora este régimen supondrá un cambio de funcionamiento en el sistema.

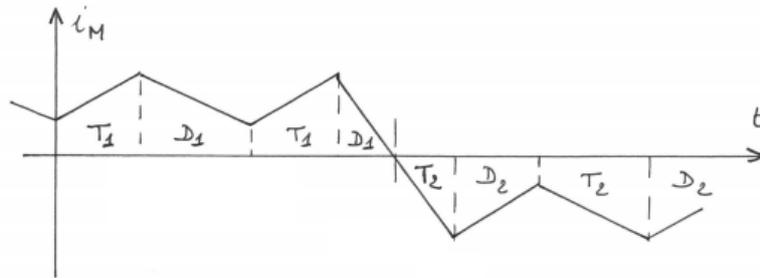


Ilustración 42: Gráfica de la corriente de la máquina eléctrica con transición de funcionamiento (motor - generador)

4. Estrategia de comanda de los transistores T1 y T2

El transistor T2 se excitará entre 0 y ALPHA.T, y se hará lo propio con el transistor T1 entre ALPHA.T y T. El signo de la corriente será el que imponga el tipo de funcionamiento del circuito. Por ejemplo, si el transistor T2 se activa siendo la corriente que pasa por el motor positiva (máquina de corriente continua en modo motor), será el diodo D1 que conducirá. Sin embargo, si el transistor T2 se activa siendo la corriente que pasa por el motor negativa (máquina de corriente continua en modo generador), será por este componente que pase la intensidad. Algunos ejemplos de funcionamiento de comanda de los transistores T1 y T2:

Capítulo V. Aceleración y frenado regenerativo del motor: Modelización de un convertidor de potencia DC-DC (chopper de dos cuadrantes)

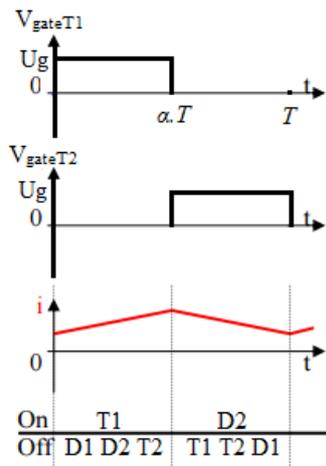


Ilustración 43: Corriente del motor durante las fases de alimentación y de rueda libre (funcionamiento tipo motor). V_{gateT1} , V_{gateT2} : señales de onda cuadrada aplicadas en las compuertas del transistor T1 y T2 respectivamente.

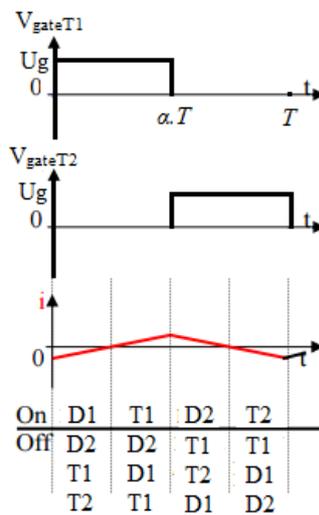


Ilustración 44: Corriente del motor durante las fases de alimentación y de rueda libre (funcionamiento mixto: motor y generador). V_{gateT1} , V_{gateT2} : señales de onda cuadrada aplicadas en las compuertas del transistor T1 y T2 respectivamente.

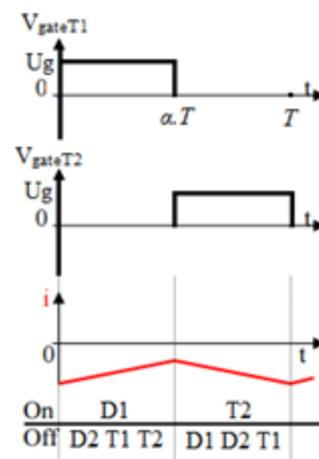


Ilustración 45: Corriente del motor durante las fases de alimentación y de rueda libre (funcionamiento generador). V_{gateT1} , V_{gateT2} : señales de onda cuadrada aplicadas en las compuertas del transistor T1 y T2 respectivamente.

5. Implementación del chopper de dos cuadrantes

El chopper reversible en corriente se implementará haciendo uso del circuito integrado IR2113 (ver Anexo B). Su función es la de realizar dos señales de onda cuadrada complementarias, a partir de la señal emitida por el generador de señales variables. Gracias a ello dirigiremos los transistores T1 y T2 de tal forma que obtengamos una comanda como la del apartado anterior.

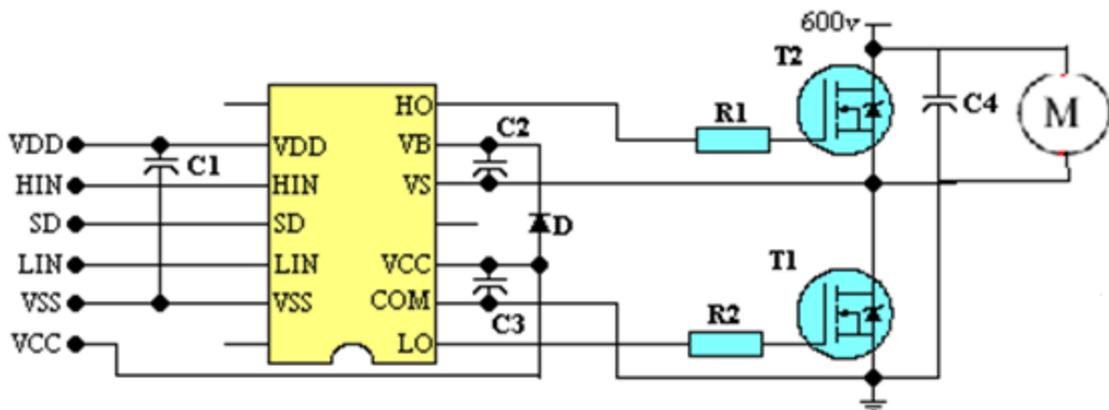


Ilustración 46: Esquema teórico del chopper de dos cuadrantes

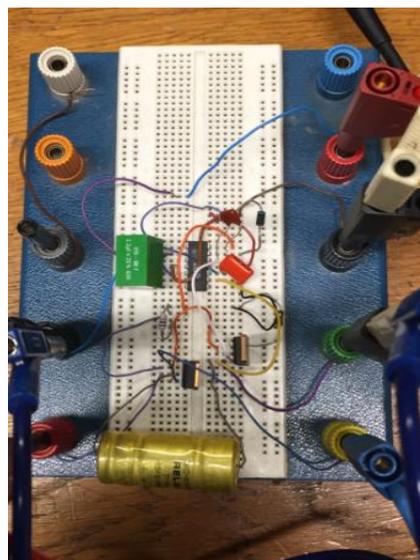


Ilustración 47: Fotografía del chopper de dos cuadrantes realizado en el laboratorio

Conclusión

Este proyecto ha supuesto un pequeño acercamiento al mundo de los motores eléctricos, a través del estudio de un patinete eléctrico. Hemos conseguido manejar y controlar una máquina de corriente continua, en dos de sus cuatro cuadrantes de trabajo (primero y cuarto). Sólo nos ha interesado la aceleración y el frenado controlados en un sentido de rotación del rotor.

En primer lugar, hemos tenido que analizar el motor que se nos había facilitado, para poder más tarde implementar los circuitos de comanda de los convertidores de potencia (choppers de uno y dos cuadrantes).

Los resultados obtenidos con el chopper un cuadrante corresponden con la teoría, como se puede apreciar en la tabla de cálculo de velocidades (apartado IV.5.b). El circuito implementado permite imponer una velocidad al motor a través de una tensión media aplicada entre sus bornes, con un funcionamiento de esta última de tipo motor.

Por otro lado, el chopper dos cuadrantes nos ha creado crea más problemas en cuanto la comanda de los transistores. El circuito integrado utilizado para ha sido el IR2113, permitiendo la conducción de cada uno de los transistores de forma complementaria. Este troceador se encarga de la aceleración y del frenado controlado de la máquina, donde el motor suministra o reciba potencia del generador según el tipo de funcionamiento. Este convertidor es por último, más seguro y eficiente que el anterior, debido a un control constante de velocidad en la máquina, así como un consumo de energía sostenible a lo largo del tiempo. Sin embargo, su implementación ha sido más peliaguda.

Por último, solo recalcar que para completar el trabajo se podría llevar a cabo una regulación del motor, lo que daría precisión y seguridad a nuestros convertidores de potencia.

ANEXOS

ANEXO A

7929237 0029646 2 T-39-11



BUZ10A

**N - CHANNEL ENHANCEMENT MODE
POWER MOS TRANSISTOR**

SGS-THOMSON

30E D

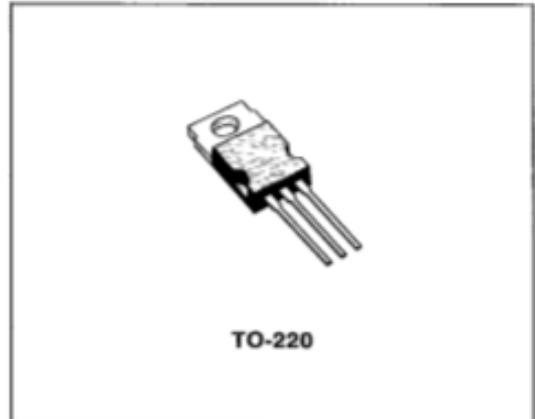
TYPE	V _{DS}	R _{DS(on)}	I _D
BUZ10A	50 V	0.12 Ω	17 A

- HIGH SPEED SWITCHING
- LOW R_{DS(ON)}
- EASY DRIVE FOR COST EFFECTIVE APPLICATIONS.

INDUSTRIAL APPLICATIONS:

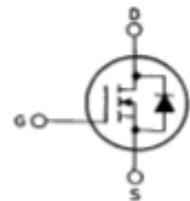
- AUTOMOTIVE POWER ACTUATOR DRIVES
- MOTOR CONTROLS
- DC-DC CONVERTERS

N - channel enhancement mode POWER MOS field effect transistor. Easy drive and very fast switching times make this POWER MOS transistor ideal for high speed switching circuits in applications such as power actuator driving, motor drives including brushless motors, hydraulic actuators and many other uses in automotive and automatic guided vehicle applications. It is also used in DC/DC converters and uninterruptible power supplies.



TO-220

**INTERNAL SCHEMATIC
DIAGRAM**



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

V _{DS}	Drain-source voltage (V _{GS} = 0)	50	V
V _{DGN}	Drain-gate voltage (R _{GS} = 20 KΩ)	50	V
V _{GS}	Gate-source voltage	±20	V
I _D	Drain current (continuous) T _c = 30°C	17	A
I _{DM}	Drain current (pulsed)	65	A
P _{tot}	Total dissipation at T _c < 25°C	75	W
T _{stg}	Storage temperature	-55 to 150	°C
T _j	Max. operating junction temperature	150	°C
	DIN humidity category (DIN 40040)	E	
	IEC climatic category (DIN IEC 68-1)	55/150/56	

June 1988

1/4

163

BUZ10A ■ 7929237 0029647 4 ■ T-39-11

THERMAL DATA S G S-THOMSON 30E D

$R_{thj - case}$	Thermal resistance junction-case	max	1.67	°C/W
$R_{thj - amb}$	Thermal resistance junction-ambient	max	75	°C/W

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_j = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified)

Parameters	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
------------	-----------------	------	------	------	------

OFF

$V_{(BR) DSS}$	Drain-source breakdown voltage	$I_D = 1 \text{ mA}$	$V_{GS} = 0$	50		V
I_{DSS}	Zero gate voltage drain current ($V_{GS} = 0$)	$V_{DS} = \text{Max Rating}$	$T_j = 125^\circ\text{C}$		250	μA
		$V_{DS} = \text{Max Rating}$			1000	μA
I_{GSS}	Gate-body leakage current ($V_{DS} = 0$)	$V_{GS} = \pm 20 \text{ V}$			± 100	nA

ON

$V_{GS(th)}$	Gate threshold voltage	$V_{DS} = V_{GS}$	$I_D = 1 \text{ mA}$	2.1		4	V
$R_{DS(on)}$	Static drain-source on resistance	$V_{GS} = 10 \text{ V}$	$I_D = 10 \text{ A}$			0.12	Ω

DYNAMIC

g_{fs}	Forward transconductance	$V_{DS} = 25 \text{ V}$	$I_D = 10 \text{ A}$	3.0			mho
C_{iss}	Input capacitance	$V_{DS} = 25 \text{ V}$	$f = 1 \text{ MHz}$			2000	pF
C_{oss}	Output capacitance	$V_{GS} = 0$				800	pF
C_{rss}	Reverse transfer capacitance					300	pF

SWITCHING

$t_d(on)$	Turn-on time	$V_{DD} = 30 \text{ V}$	$I_D = 3.0 \text{ A}$			45	ns
t_r	Rise time	$R_{GS} = 50 \Omega$	$V_{GS} = 10 \text{ V}$			90	ns
$t_d(off)$	Turn-off delay time					170	ns
t_f	Fall time					140	ns

7929237 0029648 6

BUZ10A

SGS-THOMSON

30E D

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Continued)

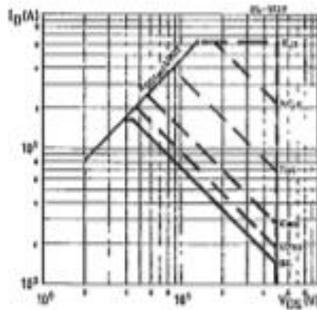
T-39-11

Parameters	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
------------	-----------------	------	------	------	------

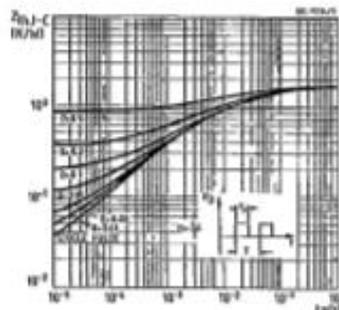
SOURCE DRAIN DIODE

I_{SD}	Source-drain current	$T_c = 25^\circ\text{C}$		17	A
I_{SDM}	Source-drain current (pulsed)			65	A
V_{SD}	Forward on voltage	$I_{SD} = 34\text{ A}$	$V_{GS} = 0$	1.5	V
t_{rr}	Reverse recovery time			150	ns
Q_{rr}	Reverse recovered charge	$I_{SD} = 17\text{ A}$	$di/dt = 100\text{A}/\mu\text{s}$	1.0	μC

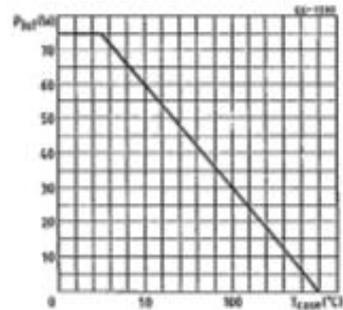
Safe operating areas



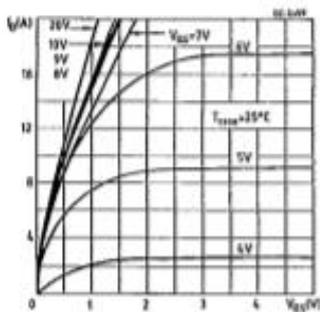
Thermal impedance



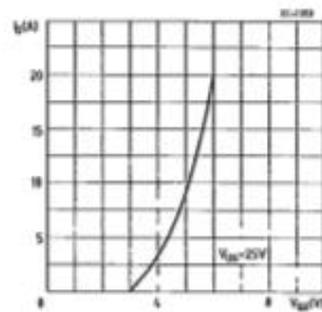
Derating curve



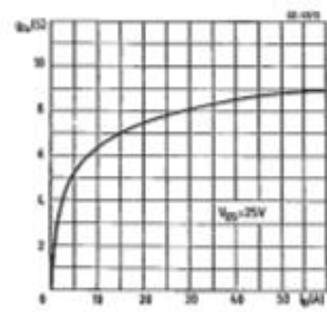
Output characteristics



Transfer characteristics



Transconductance



BUZ10A

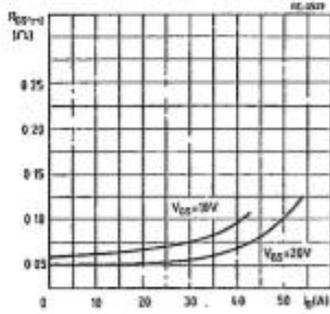
7929237 0029649 8

T-39-11

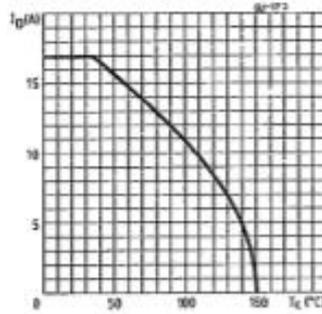
SGS-THOMSON

30E D

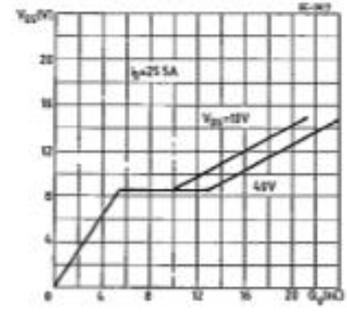
Static drain-source on resistance



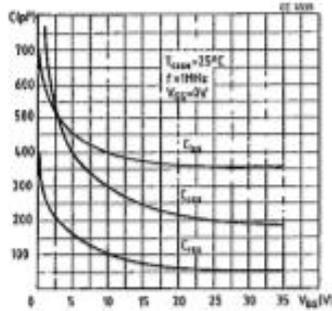
Maximum drain current vs temperature



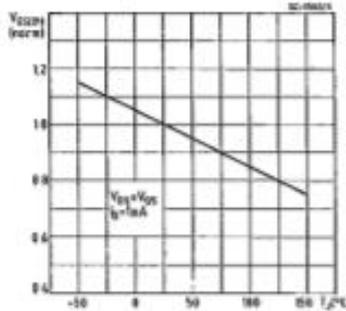
Gate charge vs gate-source voltage



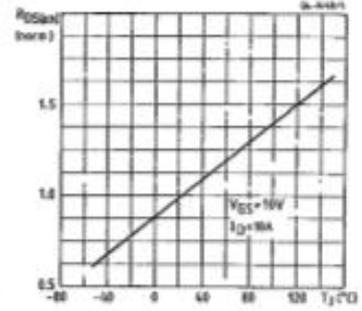
Capacitance variation



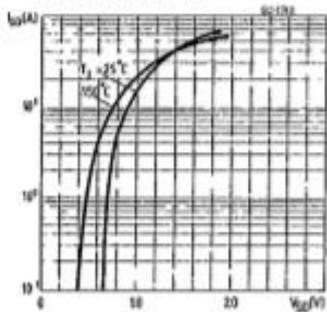
Gate threshold voltage vs temperature



Drain-source on resistance vs temperature



Source-drain diode forward characteristics



ANEXO B



Data Sheet No. PD60147 Rev.T

IR2110(S)/IR2113(S) & (PbF)

HIGH AND LOW SIDE DRIVER

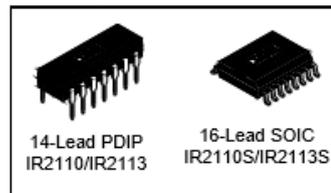
Features

- Floating channel designed for bootstrap operation
Fully operational to +500V or +600V
Tolerant to negative transient voltage
dV/dt immune
- Gate drive supply range from 10 to 20V
- Undervoltage lockout for both channels
- 3.3V logic compatible
Separate logic supply range from 3.3V to 20V
Logic and power ground $\pm 5V$ offset
- CMOS Schmitt-triggered inputs with pull-down
- Cycle by cycle edge-triggered shutdown logic
- Matched propagation delay for both channels
- Outputs in phase with inputs
- Also available LEAD-FREE

Product Summary

V_{OFFSET} (IR2110)	500V max.
(IR2113)	600V max.
$I_{O+/-}$	2A / 2A
V_{OUT}	10 - 20V
$t_{on/off}$ (typ.)	120 & 94 ns
Delay Matching (IR2110)	10 ns max.
(IR2113)	20ns max.

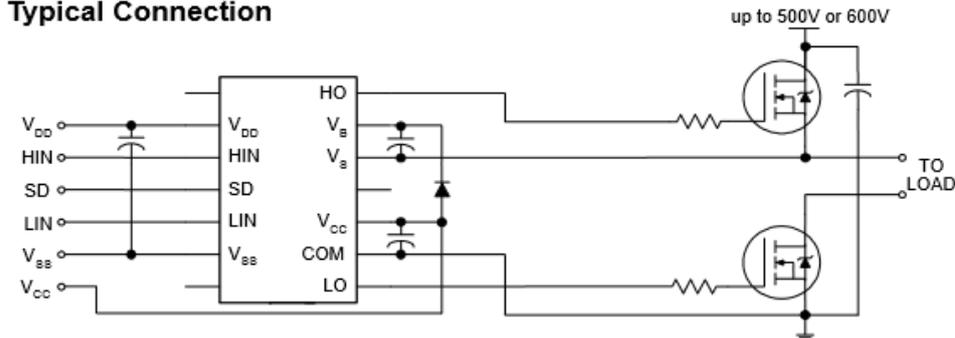
Packages



Description

The IR2110/IR2113 are high voltage, high speed power MOSFET and IGBT drivers with independent high and low side referenced output channels. Proprietary HVIC and latch immune CMOS technologies enable ruggedized monolithic construction. Logic inputs are compatible with standard CMOS or LSTTL output, down to 3.3V logic. The output drivers feature a high pulse current buffer stage designed for minimum driver cross-conduction. Propagation delays are matched to simplify use in high frequency applications. The floating channel can be used to drive an N-channel power MOSFET or IGBT in the high side configuration which operates up to 500 or 600 volts.

Typical Connection



(Refer to Lead Assignments for correct pin configuration). This/These diagram(s) show electrical connections only. Please refer to our Application Notes and DesignTips for proper circuit board layout.

IR2110(S)/IR2113(S) & (PbF)

Absolute Maximum Ratings

Absolute maximum ratings indicate sustained limits beyond which damage to the device may occur. All voltage parameters are absolute voltages referenced to COM. The thermal resistance and power dissipation ratings are measured under board mounted and still air conditions. Additional information is shown in Figures 28 through 35.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units	
V _B	High side floating supply voltage (IR2110)	-0.3	525	V	
	(IR2113)	-0.3	625		
V _S	High side floating supply offset voltage	V _B - 25	V _B + 0.3		
V _{HO}	High side floating output voltage	V _S - 0.3	V _B + 0.3		
V _{CC}	Low side fixed supply voltage	-0.3	25		
V _{LO}	Low side output voltage	-0.3	V _{CC} + 0.3		
V _{DD}	Logic supply voltage	-0.3	V _{SS} + 25		
V _{SS}	Logic supply offset voltage	V _{CC} - 25	V _{CC} + 0.3		
V _{IN}	Logic input voltage (HIN, LIN & SD)	V _{SS} - 0.3	V _{DD} + 0.3		
dV _S /dt	Allowable offset supply voltage transient (figure 2)	—	50		V/ns
P _D	Package power dissipation @ T _A ≤ +25°C	(14 lead DIP)	—	1.6	W
		(16 lead SOIC)	—	1.25	
R _{THJA}	Thermal resistance, junction to ambient	(14 lead DIP)	—	75	°C/W
		(16 lead SOIC)	—	100	
T _J	Junction temperature	—	150	°C	
T _S	Storage temperature	-55	150		
T _L	Lead temperature (soldering, 10 seconds)	—	300		

Recommended Operating Conditions

The input/output logic timing diagram is shown in figure 1. For proper operation the device should be used within the recommended conditions. The V_S and V_{SS} offset ratings are tested with all supplies biased at 15V differential. Typical ratings at other bias conditions are shown in figures 36 and 37.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units
V _B	High side floating supply absolute voltage	V _S + 10	V _S + 20	V
V _S	High side floating supply offset voltage (IR2110)	Note 1	500	
	(IR2113)	Note 1	600	
V _{HO}	High side floating output voltage	V _S	V _B	
V _{CC}	Low side fixed supply voltage	10	20	
V _{LO}	Low side output voltage	0	V _{CC}	
V _{DD}	Logic supply voltage	V _{SS} + 3	V _{SS} + 20	
V _{SS}	Logic supply offset voltage	-5 (Note 2)	5	
V _{IN}	Logic input voltage (HIN, LIN & SD)	V _{SS}	V _{DD}	
T _A	Ambient temperature	-40	125	

Note 1: Logic operational for V_S of -4 to +500V. Logic state held for V_S of -4V to -V_{BS}. (Please refer to the Design Tip DT97-3 for more details).

Note 2: When V_{DD} < 5V, the minimum V_{SS} offset is limited to -V_{DD}.

Dynamic Electrical Characteristics

V_{BIAS} (V_{CC} , V_{BS} , V_{DD}) = 15V, C_L = 1000 pF, T_A = 25°C and V_{SS} = COM unless otherwise specified. The dynamic electrical characteristics are measured using the test circuit shown in Figure 3.

Symbol	Definition	Figure	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
t_{on}	Turn-on propagation delay	7	—	120	150	ns	$V_S = 0V$
t_{off}	Turn-off propagation delay	8	—	94	125		$V_S = 500V/600V$
t_{sd}	Shutdown propagation delay	9	—	110	140		$V_S = 500V/600V$
t_r	Turn-on rise time	10	—	25	35		
t_f	Turn-off fall time	11	—	17	25		
MT	Delay matching, HS & LS turn-on/off	(IR2110) (IR2113)	—	—	—		10 20

Static Electrical Characteristics

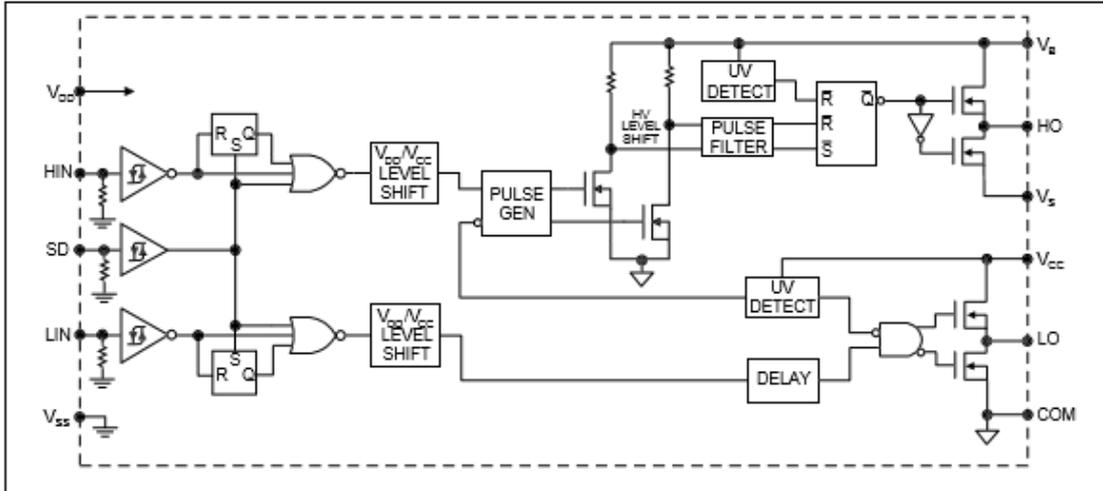
V_{BIAS} (V_{CC} , V_{BS} , V_{DD}) = 15V, T_A = 25°C and V_{SS} = COM unless otherwise specified. The V_{IN} , V_{TH} and I_{IN} parameters are referenced to V_{SS} and are applicable to all three logic input leads: HIN, LIN and SD. The V_O and I_O parameters are referenced to COM and are applicable to the respective output leads: HO or LO.

Symbol	Definition	Figure	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
V_{IH}	Logic "1" input voltage	12	9.5	—	—	V	
V_{IL}	Logic "0" input voltage	13	—	—	6.0		
V_{OH}	High level output voltage, $V_{BIAS} - V_O$	14	—	—	1.2		$I_O = 0A$
V_{OL}	Low level output voltage, V_O	15	—	—	0.1		$I_O = 0A$
I_{LK}	Offset supply leakage current	16	—	—	50	μA	$V_B = V_S = 500V/600V$
I_{QBS}	Quiescent V_{BS} supply current	17	—	125	230		$V_{IN} = 0V$ or V_{DD}
I_{QCC}	Quiescent V_{CC} supply current	18	—	180	340		$V_{IN} = 0V$ or V_{DD}
I_{QDD}	Quiescent V_{DD} supply current	19	—	15	30		$V_{IN} = 0V$ or V_{DD}
I_{IN+}	Logic "1" input bias current	20	—	20	40	μA	$V_{IN} = V_{DD}$
I_{IN-}	Logic "0" input bias current	21	—	—	1.0		$V_{IN} = 0V$
V_{BSUV+}	V_{BS} supply undervoltage positive going threshold	22	7.5	8.6	9.7	V	
V_{BSUV-}	V_{BS} supply undervoltage negative going threshold	23	7.0	8.2	9.4		
V_{CCUV+}	V_{CC} supply undervoltage positive going threshold	24	7.4	8.5	9.6		
V_{CCUV-}	V_{CC} supply undervoltage negative going threshold	25	7.0	8.2	9.4		
I_{O+}	Output high short circuit pulsed current	26	2.0	2.5	—	A	$V_O = 0V$, $V_{IN} = V_{DD}$ $PW \leq 10 \mu s$
I_{O-}	Output low short circuit pulsed current	27	2.0	2.5	—		$V_O = 15V$, $V_{IN} = 0V$ $PW \leq 10 \mu s$

IR2110(s)/IR2113(S) & (PbF)

International
IR Rectifier

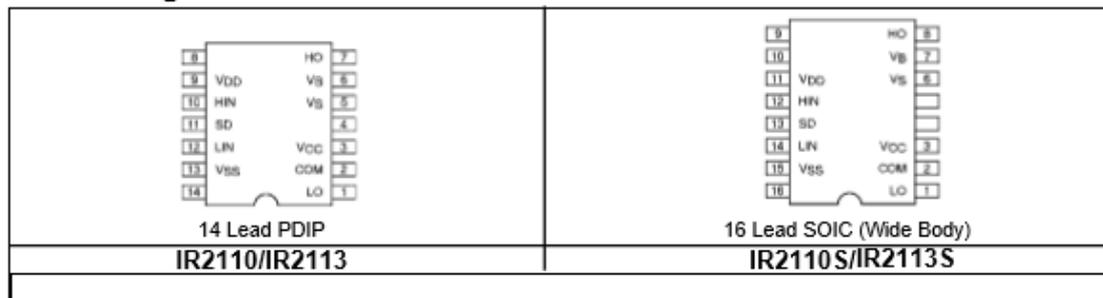
Functional Block Diagram



Lead Definitions

Symbol	Description
VDD	Logic supply
HIN	Logic input for high side gate driver output (HO), in phase
SD	Logic input for shutdown
LIN	Logic input for low side gate driver output (LO), in phase
VSS	Logic ground
VB	High side floating supply
HO	High side gate drive output
VS	High side floating supply return
VCC	Low side supply
LO	Low side gate drive output
COM	Low side return

Lead Assignments



IR2110(S)/IR2113(S) & (PbF)

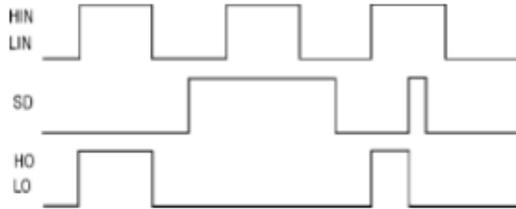


Figure 1. Input/Output Timing Diagram

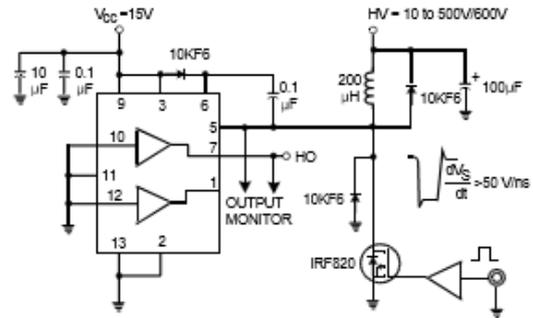


Figure 2. Floating Supply Voltage Transient Test Circuit

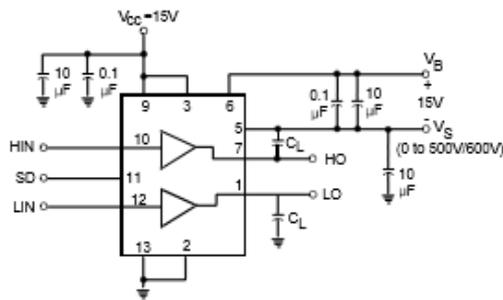


Figure 3. Switching Time Test Circuit

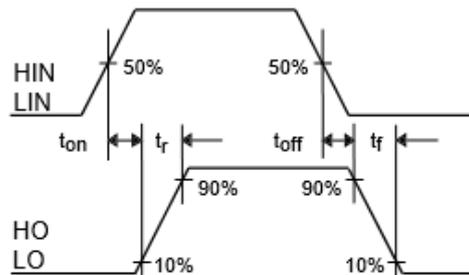


Figure 4. Switching Time Waveform Definition

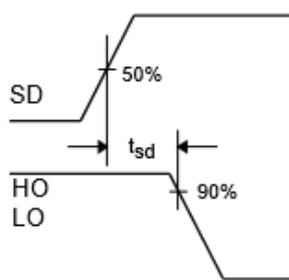


Figure 5. Shutdown Waveform Definitions

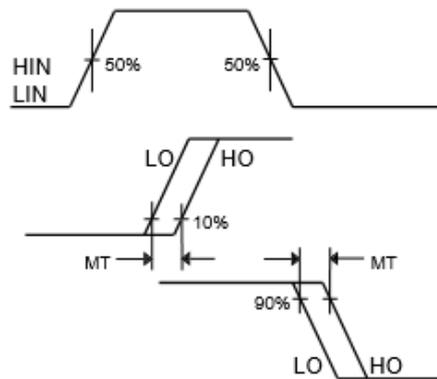


Figure 6. Delay Matching Waveform Definitions

BIBLIOGRAFÍA

Libros:

- Georges Pierron – “Principes et composants de l'électrotechnique” - Polycopié Supélec, 2009.
- Charif Karimi, Bruno Lorcet - “Électronique de puissance” – Polycopié Supélec, 2008.
- Jean-Partial Demesson du Turcher – “Automatique” – Polycopié Supélec, 2011

Otras fuentes bibliográficas :

- François Bernot. Hacheurs : Fonctionnement.
(<http://197.14.51.10:81/pmb/collections/Techniques%20de%20ingenieur/ticd3/e5/e3964.pdf>)
- <http://www.lgtrempart.fr/pedagogie/cpge-ats/cours-exo/Hacheurs.pdf>
- Jérôme Cros. Hacheurs Réversibles et Onduleurs-redresseurs MLI.
(http://wcours.gel.ulaval.ca/2012/a/GEL4102/default/5notes/hach_ond.pdf)
- M. Garnero, La conversion DC-DC: Les Hacheurs.
(<http://garnero.michel.free.fr/Docs-isen/ENP/1-Hacheurs.pdf>)
- M. Boitier & M. Baget. Étude d'une trotinette électrique.
(http://vincent.boitier.free.fr/LPCCSEE/BE/trotinette/compte%20rendus/projet_trottinette.pdf)
- Nicolas Martin. Commande pour trotinette électrique.
(http://pepitone.kevin.free.fr/PEPITONE_Kevin/Projets_files/Rapport_Trottinette.pdf)
- Victor Galera Ortega, Simulación convertidores DC-DC.
(<http://sauron.etse.urv.es/public/PROPOSTES/pub/pdf/197pub.pdf>)
- <http://www.monsterscooterparts.com/24v10mowsp.html>