

Estudio y medidas sobre un convertidor de potencia en puente completo con modulación PWM unipolar para el control de velocidad de un motor de corriente continua.

1. Introducción

El diagrama de bloques de la figura 1 muestra un variador de velocidad para un motor de corriente continua.

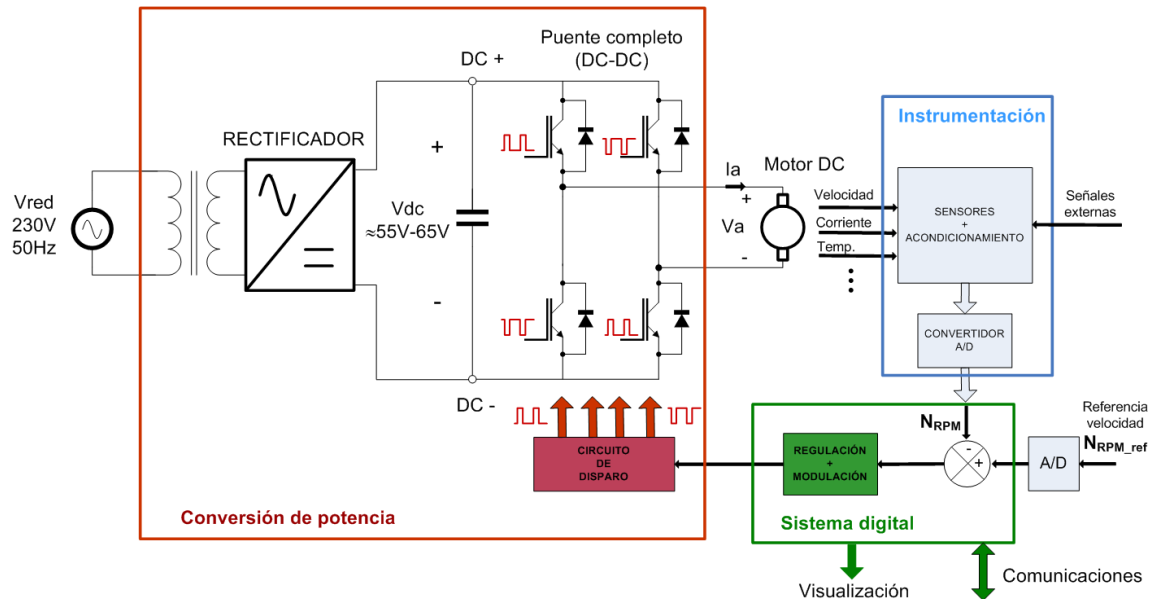


Figura 1. Diagrama de bloques de variador de velocidad para un motor de corriente continua.

La figura 2 muestra un esquema simplificado del sistema, donde se ha hecho énfasis sobre las partes más relevantes involucradas (no se adjunta en este documento el esquemático completo -por su extensión y complejidad- aunque estará disponible, para su consulta, en el laboratorio, durante la realización del ejercicio).

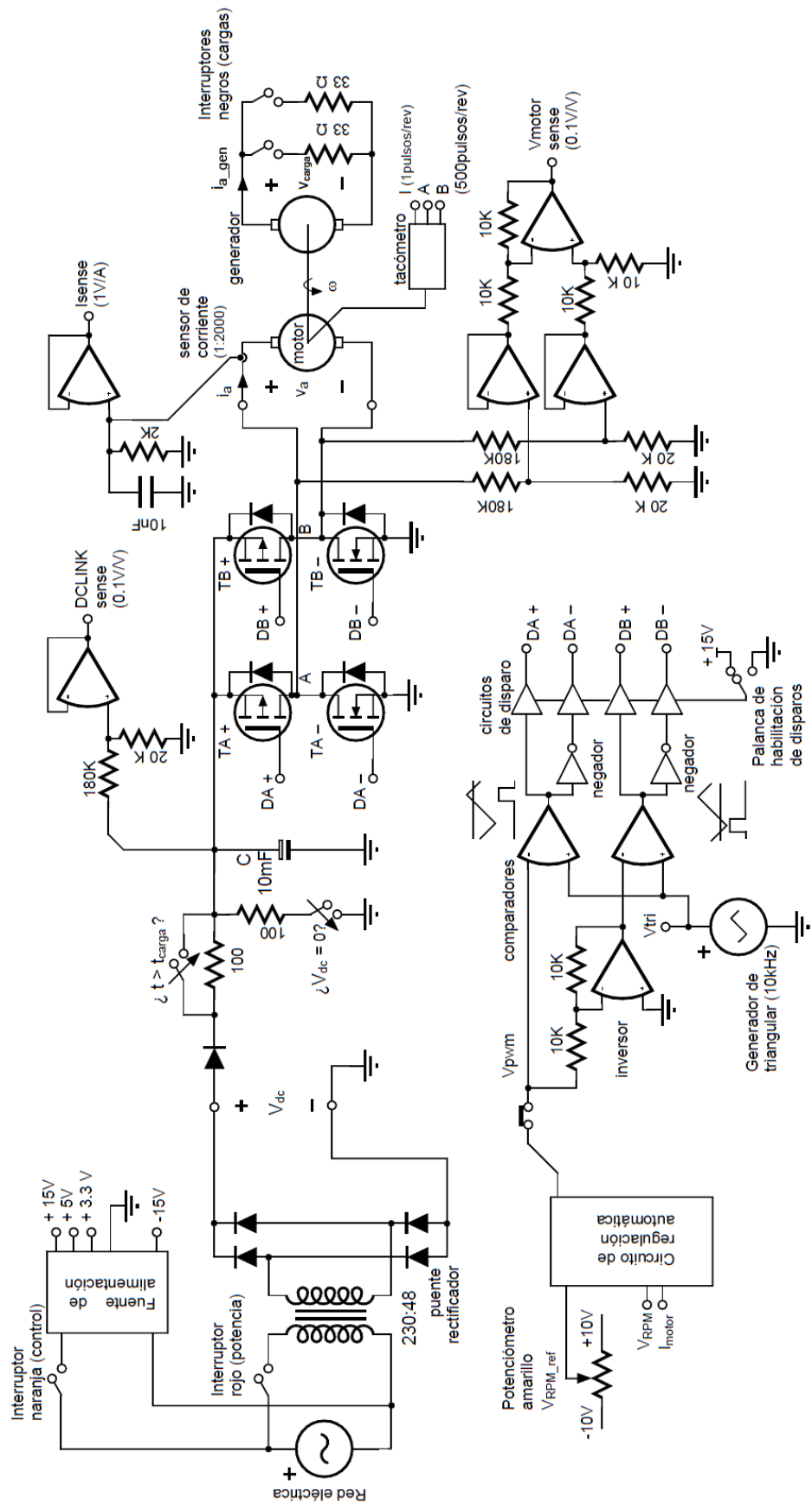


Figura 2. Esquema simplificado de variador de velocidad para motor de corriente continua

2. Descripción funcional de cada uno de los bloques

2.1. Etapa de entrada:

El equipo está aislado de la red eléctrica mediante un transformador reductor de tensión. Un puente de diodos convierte la corriente alterna (entregada por la red de distribución eléctrica) en una tensión rectificada (Vdc), dicha tensión es la que entra en la placa de circuito impreso. Esta parte se pone en funcionamiento al activar el interruptor de color rojo (potencia).

De manera similar, en la fuente de alimentación (aunque no se detallan los componentes empleados) se obtienen las tensiones reguladas (+15, +5, +3.3, -5V) necesarias para el control electrónico. Esta parte se pone en funcionamiento al activar el interruptor de color naranja (control).

Solo si ambos interruptores están activados el sistema funcionará. **Es importante conectar primero el interruptor de control (naranja) y después el de potencia (rojo) con la palanca de habilitación de disparos en modo “deshabilitación”.**

2.2. Circuito de carga-descarga del condensador principal:

La tensión rectificada (entrada de potencia) debe ser filtrada para que se aproxime a un valor continuo (DC), para lo que se emplea un filtrado capacitivo con un condensador (C) de un valor lo suficientemente elevado. Sin embargo, en el arranque, al encontrarse descargado C, la corriente inicial puede llegar a ser muy elevada (lo que podría provocar la destrucción del puente rectificador); para limitar esa corriente de arranque se interpone una resistencia de 100 Ω que, transcurrido un cierto intervalo (durante el cual el condensador ha pasado a cargarse), es cortocircuitada (para evitar pérdidas de potencia innecesarias) mediante un relé (un relé consiste en un interruptor activado por un electroimán, el circuito electrónico que activa dicho electroimán no está representado en el esquemático).

De la misma manera, al desconectar el sistema (es decir, cuando la tensión de entrada “desaparece”) el condensador (que se encuentra cargado) debe ser descargado, según obliga la normativa. Para ello se conecta una resistencia de descarga en paralelo con el condensador mediante un relé (de nuevo, el circuito que detecta la ausencia de tensión de entrada y actúa sobre el relé no está representado en el esquema).

2.3. Puente en H (etapa de potencia):

Los transistores TA+, TA- son los que conectan el terminal A con V_{dc} o con GND (0 voltios) según se encuentra activado TA+ ó TA-. Los transistores TB+ y TB- actúan de idéntica manera con el terminal B. El objetivo de esta etapa es la de entregar una tensión V_{AB} , sobre el motor, que será igual V_{dc} cuando este activa la diagonal formada por la pareja TA+ y TB-, que valdrá $-V_{dc}$ (con signo negativo) cuando este activa la diagonal formada por la pareja TA- y TB+, y que valdrá 0 si funciona bien solo los 2 transistores superiores, bien solo los 2 transistores inferiores o bien si no funciona ninguno de ellos. Hay que destacar que debe impedirse que funcionen simultáneamente TA+ y TA-, o bien TB+ y TB- porque, en ese caso, existiría un cortocircuito de la tensión de entrada y se destruirían los transistores correspondientes por sobrecorriente (a ello se dedica una parte de la electrónica de control que no aparece recogida en el esquemático de la figura 2.2.)

2.4. Circuito de control encargado de generar la PWM unipolar:

Los disparos de los transistores TA+, TA-, TB+ y TB- son las tensiones que se conectan a las puertas de los mismos (tensiones de disparo) DA+, DA-, DB+ y DB-. Dichas tensiones consisten en pulsos de duración variable que se obtienen por la comparación entre una tensión triangular (generada mediante un circuito basado en amplificadores operacionales que no se muestra en el esquema) y un nivel de tensión (V_{pwm}) que resulta de una tensión que se obtiene por un circuito de regulación automática (realizado mediante amplificadores operacionales y que tampoco se muestra en el esquema) que tiene en consideración una velocidad deseada, V_{rpm_ref} (impuesta por el usuario mediante el potenciómetro amarillo de la placa de control de potencia) así como una tensión que es proporcional a la velocidad de giro (V_{RPM} que se “construye” a partir de la señal entregada por el tacómetro del motor y un circuito no representado en el esquema). Con objeto de limitar sobrecorrientes en el motor, en el circuito de regulación también se utiliza la medida de la corriente de armadura, la, proporcionada por un sensor de corriente efecto Hall. Como se vio en la práctica 1, la es proporcional al par electromagnético ejercido por el motor.

Importante en este circuito es que las salidas de disparo (DA+, DA-, DB+ y DB-) se habilitan o deshabilitan conjuntamente mediante un interruptor de palanca que se encuentra en la placa de circuito impreso (es decir, podemos “parar” o “poner en marcha” el motor mediante ese interruptor –la palanca se encuentra remarcada en la figura 3-).



Figura 3. Posición de la palanca de habilitación de disparos (recuadro amarillo) y del potenciómetro que programa la velocidad de giro del motor (rombo rojo).

2.5. Conexión de las cargas al generador:

El motor se encuentra conectado a un generador (máquina eléctrica de idénticas características) mediante una unión mecánica. Dicho generador puede “rodar en vacío” si no se conecta a ninguna carga. Además, existen 2 resistencias de 33Ω que pueden conectarse (solo una o, en paralelo, las dos) a la salida del generador. El objetivo de este generador y las cargas es simular un trabajo mecánico (de magnitud fija y conocida) ejercido por el motor, de manera que se puede variar el par electromagnético, T_{em} , producido por el motor en el punto de operación. La conexión de una o de las dos resistencias se realiza actuando sobre los interruptores negros en el panel de mandos (al lado de los interruptores rojo y naranja de puesta en marcha de la etapa de potencia y de control).

2.6. Señales relevantes:

- a. **Tacómetro (I,A,B):** El motor dispone de un circuito que proporciona unas señales (pulsos) que son proporcionales a la velocidad de giro. El terminal I entrega una señal que es 1 pulso/revolución y los terminales A y B entregan unas señales (desfasadas 90° una respecto de la otra, de manera que es posible determinar si el motor gira “a derechas” o “a izquierdas”) que son de 500 pulsos/revolución.

Es fácil darse cuenta de que si representamos en el osciloscopio cualquiera de estas dos señales A o B, la frecuencia (f_A o f_B) medida corresponderá con la velocidad RPM según la fórmula $\boxed{\text{RPM} = 0.12 \cdot f_A = 0.12 \cdot f_B}$.

- b. **$V_{\text{motor_sense}}$:** La tensión que aparece en el motor es la diferencia entre los terminales A y B. La manera de determinar dicha tensión es obtener la resta (mediante un operacional) de ambas tensiones y, para que la magnitud no

supere la tensión de alimentación del operacional, previamente, se atenúa a la decima parte mediante un divisor resistivo en cada terminal. Así pues, $V_{\text{motor_sense}}$ expresa la tensión en bornes del motor dividida por 10 (0.1V/V).

- c. **I_{sense}**: La corriente que atraviesa al motor (i_a) se obtiene mediante un sensor de corriente (de efecto Hall) que tiene un factor de conversión de 1:2000 (es decir, por cada amperio que atraviesa al motor a la salida del sensor circula 0.5 mA) de manera que intercalando una resistencia de valor 2000 Ω obtenemos una tensión que es proporcional a la corriente que atraviesa el motor (1V/A).
- d. **V_{RPM}**: La velocidad de giro del motor, además de mediante los pulsos provenientes del tacómetro, puede medirse mediante la tensión continua del terminal V_{RPM} (donde se ha realizado un procesado de la señal proveniente del tacómetro mediante circuitos que no aparecen en el esquema) de manera que $V_{\text{RPM}} = K \cdot \text{RPM}$.
- e. **DCLINK**: Es la tensión en bornes del condensador de entrada (durante el funcionamiento, si se desprecia la caída en el diodo de entrada, dicho valor coincide con V_{dc}), dividida por 10 mediante un divisor resistivo (0.1V/V).

3. Potencia transmitida a las cargas resistivas conectadas al generador

Como ya se describió en la práctica 1 el modelo equivalente de una máquina eléctrica de corriente continua consiste en un circuito LRE donde L_a y R_a son la inductancia del devanado y la resistencia del mismo y la batería E_a es la que expresa la fuerza contraelectromotriz que tiene un valor proporcional a la velocidad de giro.

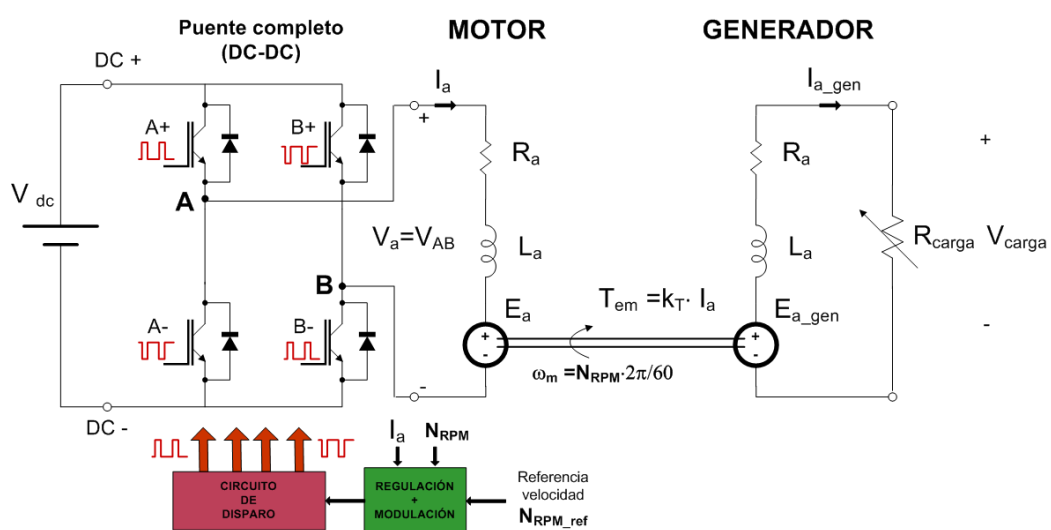


Figura 4. Diagrama de bloques de la etapa de potencia del prototipo de prácticas.

En este ejercicio, en el que se trabaja sobre un sistema real, vamos a tener en cuenta la potencia mecánica necesaria para mover el conjunto mecánico motor-generator, que es independiente de la carga eléctrica que se conecta al generador, es decir, se debe tener en cuenta ese par resistente puramente mecánico.

En estas circunstancias ya no se puede afirmar que la potencia eléctrica útil en el motor $P_{Ea} = I_a \cdot E_a$ sea igual a la potencia útil en el generador $P_{Ea_gen} = I_{a_gen} \cdot E_{a_gen}$, es decir, sucede que $P_{Ea} \neq P_{Ea_gen}$, pues parte de P_{Ea} se utiliza para mover el conjunto mecánico y el resto se disipa en las resistencias de la parte del generador (R_a y R_{carga}) (es decir, aunque $E_a = E_{a_gen} \dots I_a \neq I_{a_gen}$).

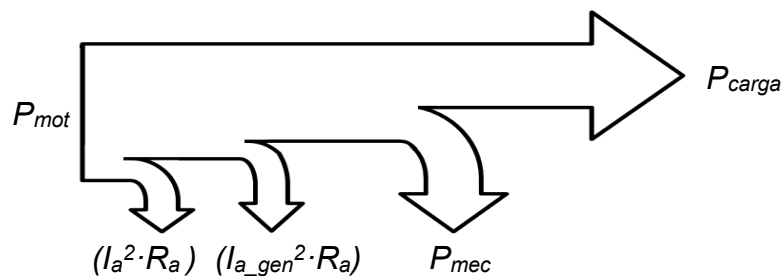


Figura 5. La potencia entregada al motor no se transfiere íntegramente a la carga porque se debe tener en consideración la potencia mecánica consumida en mover el conjunto y las pérdidas óhmicas en las resistencias de los devanados de motor y generador.

En este caso el balance de potencias obliga a la siguiente formulación

$E_a = E_{a_gen} = k_{RPM} \cdot N_{RPM}$	(1)
$E_{a_gen} = (R_a + R_{carga}) \cdot I_{a_gen}$	(2)
$V_{carga} = I_{a_gen} \cdot R_{carga}$	(3)
$P_{carga} = I_{a_gen}^2 \cdot R_{carga}$	(4)
$P_{motor} \approx P_{carga} + P_{mec} + (I_a^2 \cdot R_a) + (I_{a_gen}^2 \cdot R_{a_gen})$	(5)
$P_{motor} \approx I_a^2 \cdot R_a + I_a \cdot E_a$	(6)
$V_a = E_a + R_a \cdot I_a$	(7)
$ V_a = D \cdot V_{dc}$	(8)

Datos: $K_{rpm} = 0.01134 \text{ V/RPM}$ $R_a = 1.1 \Omega$ $V_{dc} = 60$

La figura 6 muestra una gráfica que relaciona la potencia mecánica del conjunto frente a la velocidad de giro, válida para las cargas $R_{carga} = 33 \Omega$ y $R_{carga} = 16.5 \Omega$.

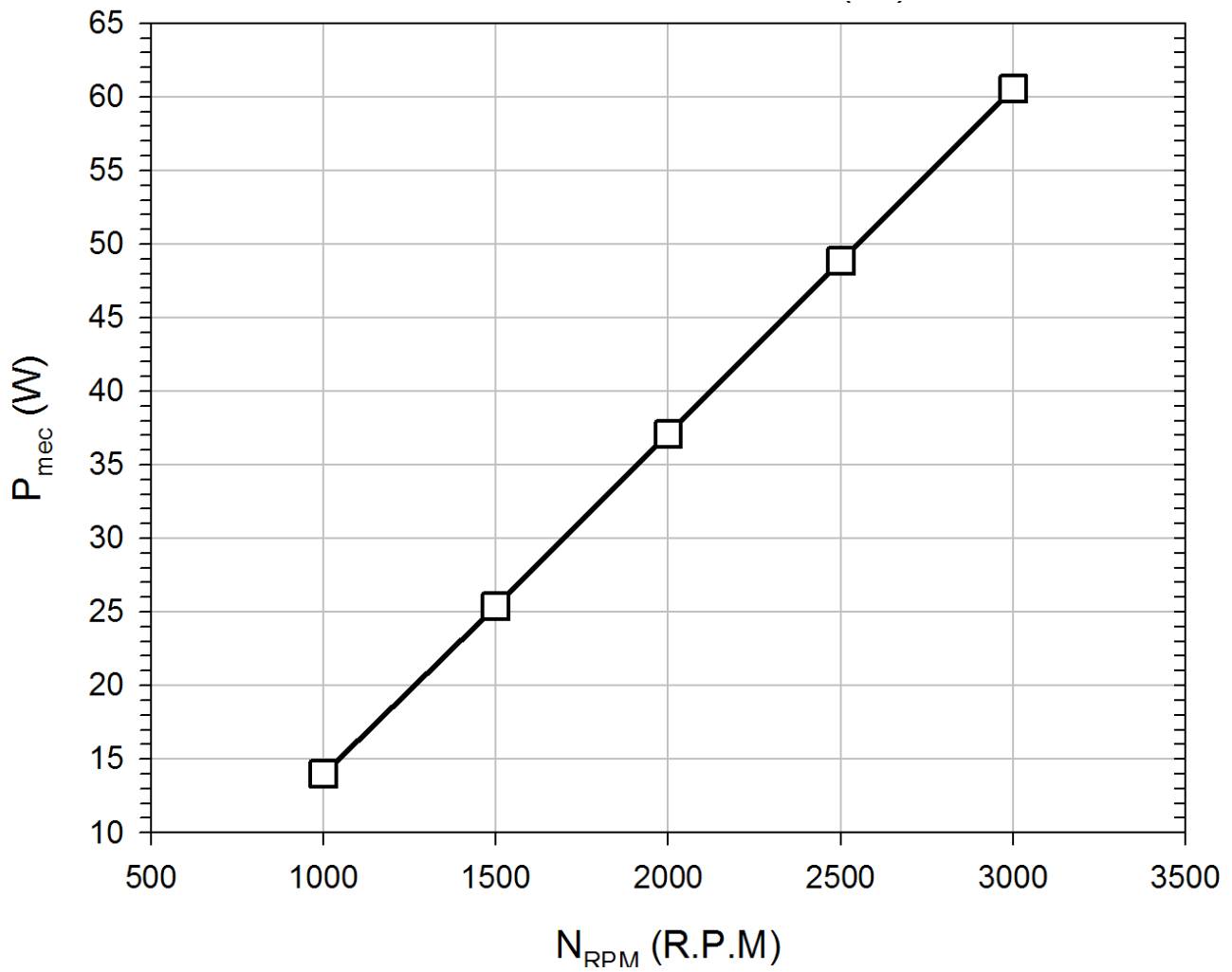


Figura 6. Potencia mecánica del conjunto motor-generator (válidas para las R_{carga} de estudio). La regresión lineal de los datos sigue la fórmula $P_{mec} = 0.0234 \cdot N_{RPM} - 9.66$ (regresión válida solo para N_{RPM} en el rango expresado: 1000 ... 3000 rpm).

COLECCIÓN DE RESULTADOS A ENTREGAR EN EL EJERCICIO PRÁCTICO

Definiendo las siguientes magnitudes como

f_A = frecuencia del terminal A del tacómetro (se mide con el osciloscopio)

V_{dc} = tensión en bornes del condensador (recordemos que el punto de medida en la placa de circuito impreso DCLINK tiene una relación 0.1V/V que deberá corregirse al anotar la medida –multiplicar por 10-).

V_{rpm} = tensión proporcional a la velocidad de giro

V_{a_mot} = tensión media en bornes del motor (recordemos que el punto de medida en la placa de circuito impreso V_{motor} tiene una relación 0.1V/V que deberá corregirse. Además, el punto de medida da un valor instantáneo del cual deberá realizarse el promedio para anotar el valor).

I_{a_motor} = corriente que atraviesa el motor (aquí el valor de medida de la tensión del punto I_{sense} tiene una relación 1V/A por lo que la medida a anotar es directa)

V_{carga} = tensión en bornes de la carga (se debe medir directamente en los bornes roscados de la carga, por simplicidad puede emplear el polímetro)

t_{ON} = intervalo de tiempo en que funcionan los transistores (se mide con el osciloscopio, preferiblemente empleando los cursores, sobre la tensión V_{motor} que está en la placa de circuito impreso)

T = periodo de repetición (se mide con el osciloscopio, empleando los cursores, sobre la tensión V_{motor} que está en la placa de circuito impreso, no debería variar entre señales adyacentes ni para N_{rpm} distintos)

a) Tomar las siguientes medidas, empleando los instrumentos de medida adecuados

$$R_{carga} = 33 \Omega$$

N_{RPM}	f_A (kHz)	V_{rpm}	V_{dc}	t_{ON}	T	V_{a_mot}	I_{a_mot}	V_{carga}
1000	8.33							
1500	12.50							
2000	16.67							
2500	20.83							
3000	25.00							

$$R_{\text{carga}} = 16.5 \, \Omega$$

N_{RPM}	f_A (kHz)	V_{rpm}	V_{dc}	t_{ON}	T	$V_{\text{a_mot}}$	$I_{\text{a_mot}}$	V_{carga}
1000	8.33							
1500	12.50							
2000	16.67							
2500	20.83							
3000	25.00							

A partir de los datos obtenidos:

b) Determinación de la constante de proporcionalidad K en $V_{\text{RPM}} = K \cdot \text{RPM}$

$$R_{\text{carga}} = 33 \, \Omega$$

N_{RPM}	V_{rpm}	K
1000		
1500		
2000		
2500		
3000		

$$R_{\text{carga}} = 16.5 \, \Omega$$

N_{RPM}	V_{rpm}	K
1000		
1500		
2000		
2500		
3000		

c) Confirmar que se cumple $V_a = D \cdot V_{\text{dc}}$ (Nota: D indica el ciclo de trabajo)

$$R_{\text{carga}} = 33 \, \Omega$$

N_{RPM}	D	$D \cdot V_{\text{dc}}$	$V_{\text{a_mot}}$
1000			
1500			
2000			
2500			
3000			

$$R_{\text{carga}} = 16.5 \, \Omega$$

N_{RPM}	D	$D \cdot V_{\text{dc}}$	$V_{\text{a_mot}}$
1000			
1500			
2000			
2500			
3000			

d) Confirmar que las pérdidas óhmicas en las resistencias de los devanados son depreciables y que se cumple el balance aproximado de potencias $P_{motor} \approx P_{carga} + P_{mec}$

$R_{carga} = 33 \Omega$

NRPM	P _{mot}	P _{carga}	P _{mot} - P _{carga}
1000			
1500			
2000			
2500			
3000			

$R_{carga} = 16.5 \Omega$

NRPM	P _{mot}	P _{carga}	P _{mot} - P _{carga}
1000			
1500			
2000			
2500			
3000			

Representar sobre la gráfica los valores de (P_{mot}- P_{carga}) para ambas cargas

