



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

---

## ES664 - Laboratório de Eletrônica para Automação Industrial

### Relatório - Experimento 4 Acionamento de motor DC

---

*Nome:*

Daniel Dello Russo Oliveira  
Marcelli Tiemi Kian

*RA*

101918  
117892

11 de novembro de 2016

# 1 Objetivos

O experimento tem como objetivo implementar o acionamento de um motor DC através de um retificador controlado e um chopper. Além disso, queremos avaliar o controle de velocidade do motor em malha aberta.

## 2 Experimento

### 2.1 Retificador Monofásico Controlado

Utilizamos um transformador para rebaixar a tensão de 220 V para 24 V, fazendo a ligação da tensão de linha (protegida pelos fusíveis) no primário, obtendo como saída 25.54 V. No secundário, ligamos o circuito na entrada do conversor. Alimentamos e configuramos o cartão de disparos, permitindo configurar  $\alpha$  por meio de um potenciômetro. O esquemático do sistema pode ser visto na figura 1.

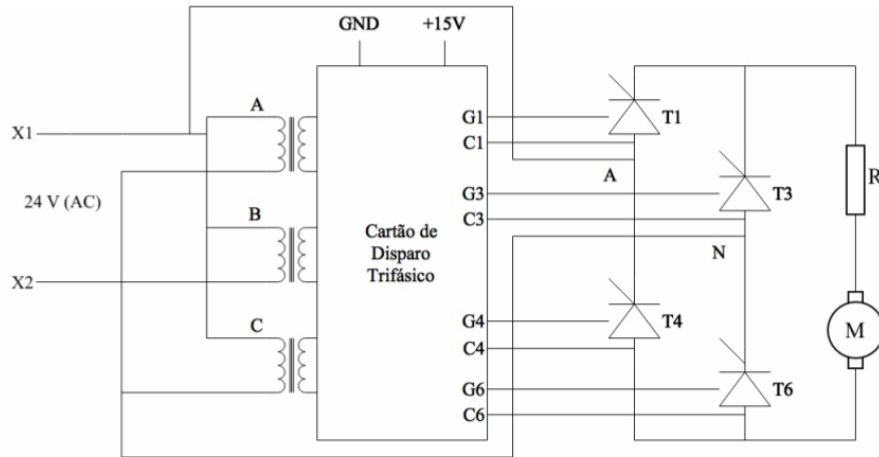


Figura 1: Retificador monofásico controlado de onda completa utilizado para acionar motor DC. (roteiro)

Prosseguimos o experimento com a medição da resistência de armadura do motor:

$$R_a = 7.9 \, \Omega \quad (1)$$

e com a resistência de medição

$$R_R = 3.8 \, \Omega \quad (2)$$

sendo este último valor diferente do sugerido no roteiro ( $0.2\Omega$ ).

Ligamos o circuito e capturamos a forma de onda da tensão de armadura  $v_a$  para  $\alpha = 90^\circ$ , conforme figura 2. Variando os valores de  $\alpha$ , obtivemos os valores da tabela 1. Por um erro de medição, essa tensão medida é na realidade a soma da tensão aplicada sobre a armadura do circuito e sobre o resistor de medição.

Medimos também a tensão no resistor de medição  $R_R$ , para cálculo da corrente de armadura, conforme figura 3 e equação abaixo. Conforme orientado pelo professor, descontinuamos o experimento sem fazer a medição da corrente para outros valores de  $\alpha$ .

$$i_a = \frac{v_R}{R_R} \quad (3)$$

Calculamos o torque no motor a fazendo a substituição nos valores da equação abaixo, em que igualamos a potência mecânica com a potência elétrica (descontando a potência dissipada na armadura), e isolamos a variável de torque.

$$T_m = \frac{v_a * i_a - R_a i_a^2}{\omega_m} \quad (4)$$

Sabemos que:

$$T_m = k_t i_a \quad (5)$$

$$V_e = k_e \omega_m \quad (6)$$

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + V_e \quad (7)$$

Considerando que estamos trabalhando com valores médios e em regime permanente e que a tensão medida inclui a tensão sobre o resistor de medição, podemos escrever as equações acima como:

$$i_a = \frac{V_a - k_e \omega_m}{R_a + R_R} \quad (8)$$

$$T_m = k_t i_a \quad (9)$$

Encontramos, para  $\alpha = 90^\circ$ ,  $k_t = 0,0536 Nm/A$  e  $k_e = 0,0536 Vs/rad$ . Sabemos

que  $k_t$  e  $k_e$  deveriam apresentar o mesmo valor quando escritos no SI então nossos valores fazem sentido. Utilizando as equações 8 e 9 e os valores de  $k_t$  e  $k_e$  calculados (supondo que eles não variam) encontramos a corrente e o torque para cada ângulo de disparo, apresentados na tabela 1.

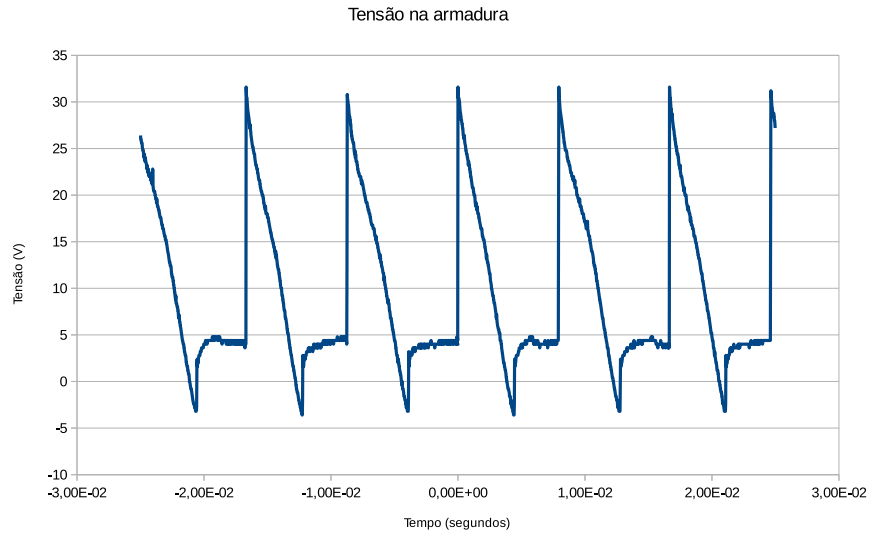


Figura 2: Tensão de armadura do motor DC com retificador controlado para  $\alpha = 90^\circ$

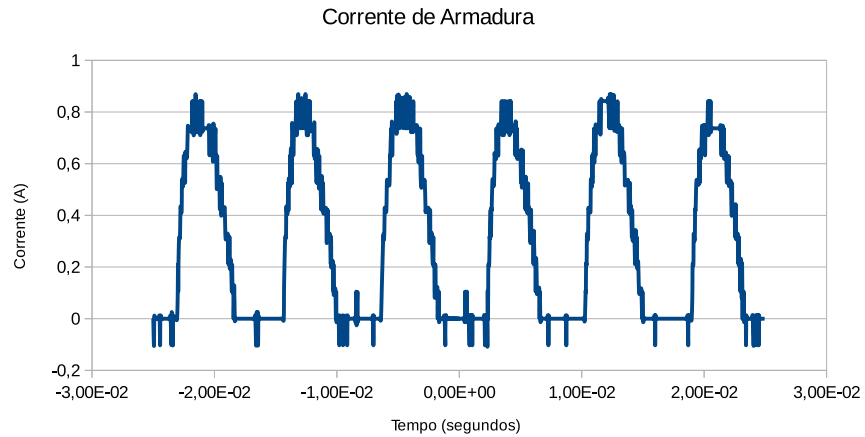


Figura 3: Corrente no resistor de medição para  $\alpha = 90^\circ$

Tabela 1: Tensão de armadura  $v_a$ , velocidade angular  $\omega_m$ , corrente de armadura  $i_a$  e torque  $T_m$  do motor DC para diferentes ângulos de disparo  $\alpha$

$\alpha$	$v_a(V)$	$\omega_m(rpm)$	$i_a(A)$	$T_m(N \cdot m)$
60°	4.81	340	0.248	0.0133
70°	5.9	470	0.279	0.0149
80°	7.12	650	0.297	0.0159
90°	8.5	900	0.295	0.0158
100°	9.8	1150	0.286	0.0153
110°	10.6	1350	0.258	0.0138
120°	11.6	1510	0.267	0.0143

Notamos que a variação da tensão na armadura é abrupta, e que chega a ficar abaixo dos 0 V, efeito introduzido pelo fator indutivo da carga, em alguns momentos. A corrente aplicada no motor chega a zerar em alguns momentos, o que não é desejado no acionamento do motor DC.

Variando o valor de  $\alpha$ , podemos observar que ocorre um aumento na tensão de armadura, e conseqüentemente, aumento na velocidade angular  $\omega_m$ .

Se desconsiderarmos o atrito de coulomb, temos que:

$$T_m = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_{wl} \quad (10)$$

Sabemos que a carga acoplada também é da forma:

$$T_{wl} = J_{wl} \frac{d\omega_m}{dt} + B_{wl}\omega_m \quad (11)$$

Considerando que estamos trabalhando em regime permanente, podemos escrever:

$$T_m = (B + B_{wl})\omega_m \quad (12)$$

Encontramos então que (para  $\alpha = 70^\circ$ )

$$B + B_{wl} = 0.0003 N \cdot m \cdot s/rad \quad (13)$$

Simulamos então um sistema com  $R_a = R_a + R_R$  e  $B = B + B_{wl}$  e  $k_t = k_e = 0,0536$  (considerando valores de indutância de armadura e inércia do motor bem baixos pois só nos interessamos no regime permanente) e encontramos a velocidade do motor em função do ângulo de disparo para simulação. Comparamos esse resultado com a curva que aproxima a velocidade do motor em função do ângulo de disparo calculada a partir dos dados apresentados na tabela 1 e

representada na equação 14. Os resultados são apresentados na figura 4.

$$\omega_m[\text{rad/s}] = 289,5 - 2,158\alpha[^\circ] \quad (14)$$

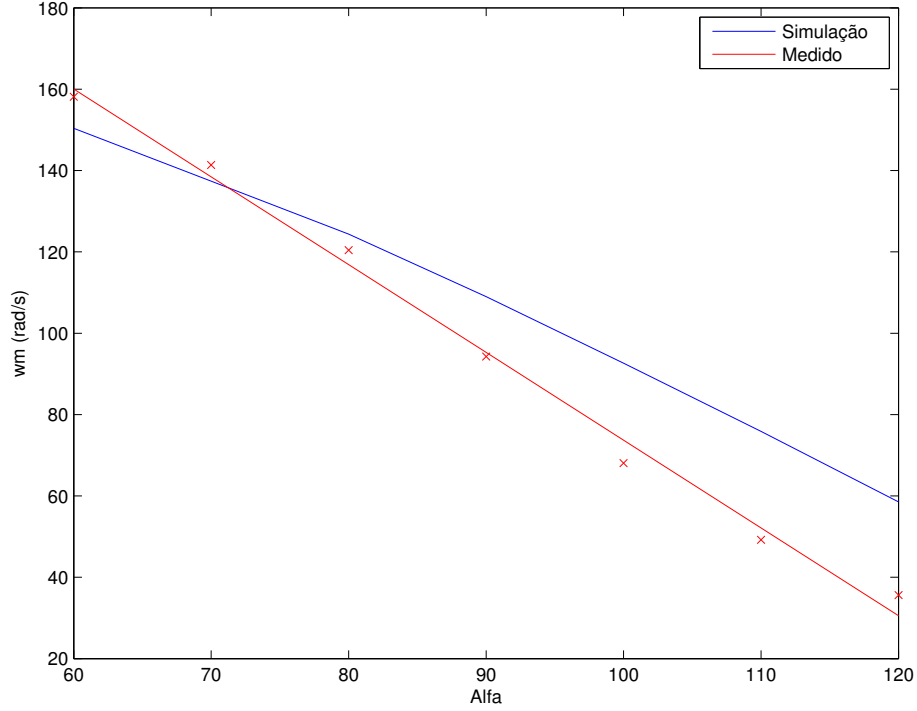


Figura 4: Velocidade em função de  $\alpha$  para retificador medido e simulado

Como podemos ver, nosso modelo medido e simulado difere razoavelmente. Acreditamos que isso acontece pois adotamos uma série de simplificações no cálculo dos parâmetros do motor, além das imprecisões de medidas e diversos outros fatores. A curva linearizada da velocidade em função do ângulo de disparo ainda assim parece ser uma aproximação boa o suficiente dado que nos mantenhemos em um intervalo de valores para  $\alpha$  apropriado.

## 2.2 Conversor Step-Down

Para o experimento com o conversor step-down, configuramos as tensões da fonte DC e pulsos do gerador de sinal. Ligamos o lado alto do conversor em 12 V, e o lado baixo na armadura do motor em série com o resistor de medição.

Alimentamos o circuito de acionamento do conversor com 15 V e ligamos o gerador de sinal nos cabos indicados por "BUCK" e "GND".

Utilizamos o mesmo motor do caso anterior, mas outra resistência de medição:

$$R_S = 5.3 \, \Omega \quad (15)$$

Ligamos o circuito e capturamos a forma de onda da tensão de armadura  $v_a$  para  $D = 50\%$ , conforme figura 5. Variando os valores de  $D$ , obtivemos os valores da tabela 2. Prosseguimos o experimento registrando os valores de tensão na resistência de medição. A forma de onda para a corrente  $i_a$  é mostrada na figura 6, para realizar o cálculo de  $i_a$ , utilizamos equação a seguir.

$$i_a = \frac{v_R}{R_S} \quad (16)$$

Para cálculo do torque, utilizamos a equação 4, levando em consideração apenas a conservação de energia e que os termos indutivos da carga seriam anulados uma vez que estamos trabalhando com valores médios e em regime permanente.

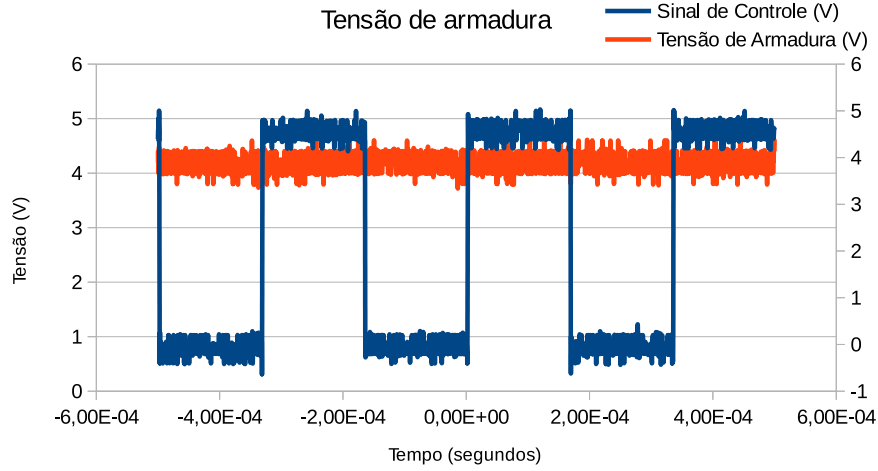


Figura 5: Tensão de armadura do motor DC com chopper em step-down para  $D = 50\%$

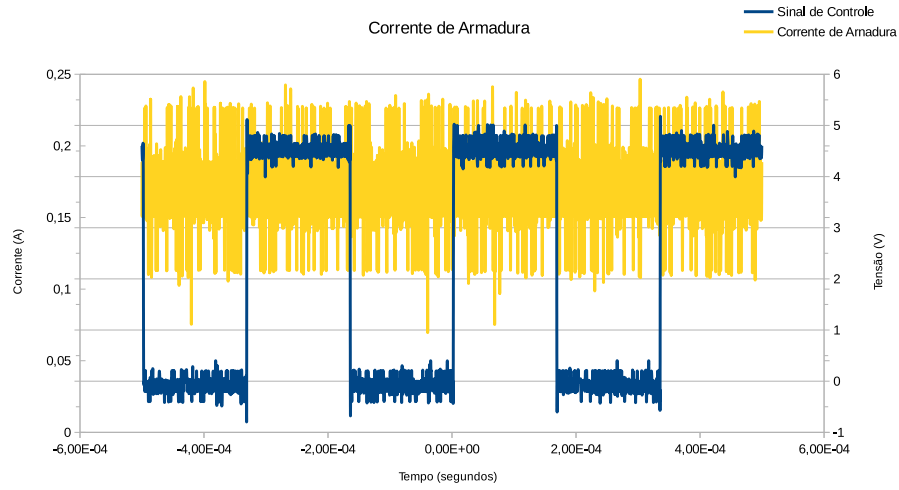


Figura 6: Corrente no resistor de medição para  $D = 50\%$

Tabela 2: Tensão de armadura  $v_a$ , velocidade angular  $\omega_m$ , corrente de armadura  $i_a$  e torque  $T_m$  do motor DC para diferentes duty-cycles  $D$

$D$	$v_a(V)$	$\omega_m(rpm)$	$i_a(A)$	$T_m(N \cdot m)$
20%	-	-	-	-
30%	2.18	102	0.117	0.0137
40%	3.08	234	0.143	0.0114
50%	4.32	390	0.170	0.0124
60%	5.4	574	0.192	0.0124

Como podemos ver a tensão e a corrente aplicada sobre o motor se mantém praticamente constantes, fator altamente desejável no controle desses dispositivos pois assim nossa velocidade e torque apresentarão menos variações.