

Acionamento de Motores de Corrente Contínua

Prof. Clovis Antonio Petry.

Florianópolis, julho de 2021.

Curso Básico de Acionamentos Eletrônicos

O material do curso está disponível em:

1. Moodle para os alunos matriculados na disciplina;
2. Página do professor;
3. Canal no youtube do professor.



<https://moodle.ifsc.edu.br>



www.ProfessorPetry.com.br



<https://www.youtube.com>

Agenda

Esta aula está organizada em:

1. Quadrantes de operação das máquinas de corrente contínua:
 - Circuito elétrico equivalente e símbolo do motor de corrente contínua;
 - Quadrantes de operação da máquina elétrica de corrente contínua;
 - Circuitos básicos para acionamento de motores de corrente contínua.
2. Elementos de circuitos de acionamento de motores:
 - Elementos de proteção;
 - Dispositivos eletromecânicos e eletromagnéticos;
 - Semicondutores;
 - Circuitos integrados;
 - Conversores ca-cc e cc-cc.
3. Circuitos de acionamento de motores de corrente contínua:
 - Acionamento com chaves e relés;
 - Acionamento com transistores;
 - Acionamento com circuitos integrados;
 - Exemplos de projetos de circuitos de acionamento de motor.



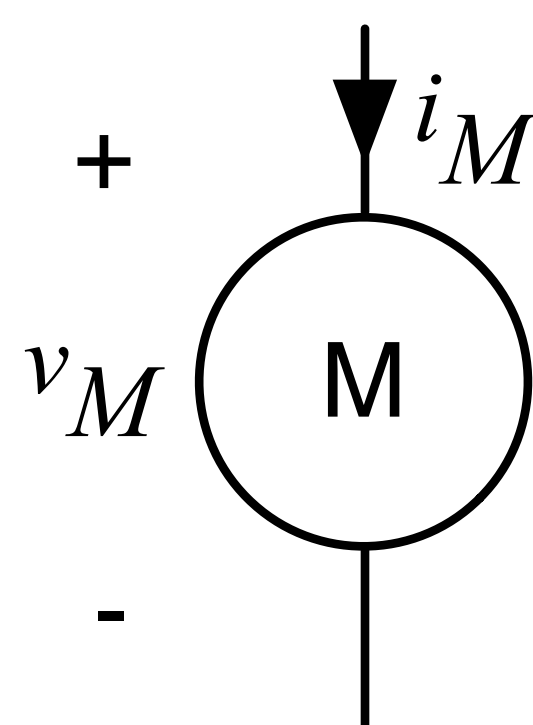
Os circuitos de acionamento permitem que se controle o motor elétrico nos seus diferentes modos de operação.



Funcionamento das máquinas de corrente contínua

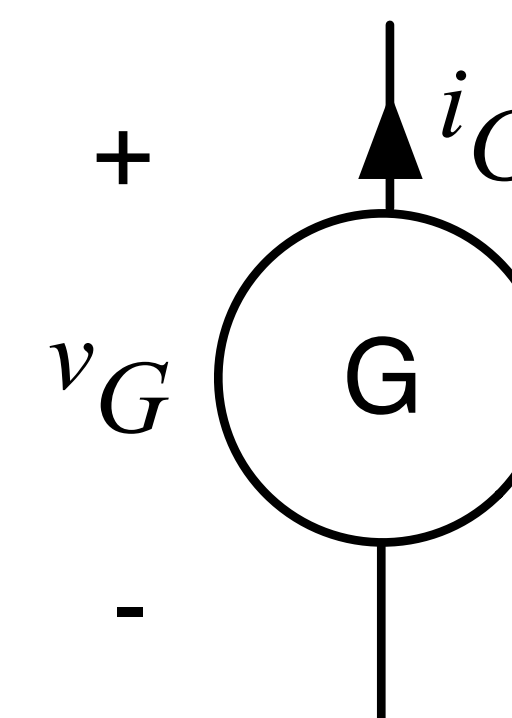
Definições e considerações:

- O motor elétrico de corrente contínua é uma máquina elétrica rotativa que converte energia elétrica em energia mecânica para acionamento de cargas acopladas em seu eixo, sendo alimentado por uma fonte de alimentação em tensão contínua (cc).
- O gerador elétrico de corrente contínua é uma máquina elétrica rotativa que converte energia mecânica em energia elétrica a partir da rotação provida ao seu eixo, servindo como fonte de alimentação de circuitos em tensão contínua (cc).
- Exemplos de máquinas de corrente contínua:



Motor elétrico

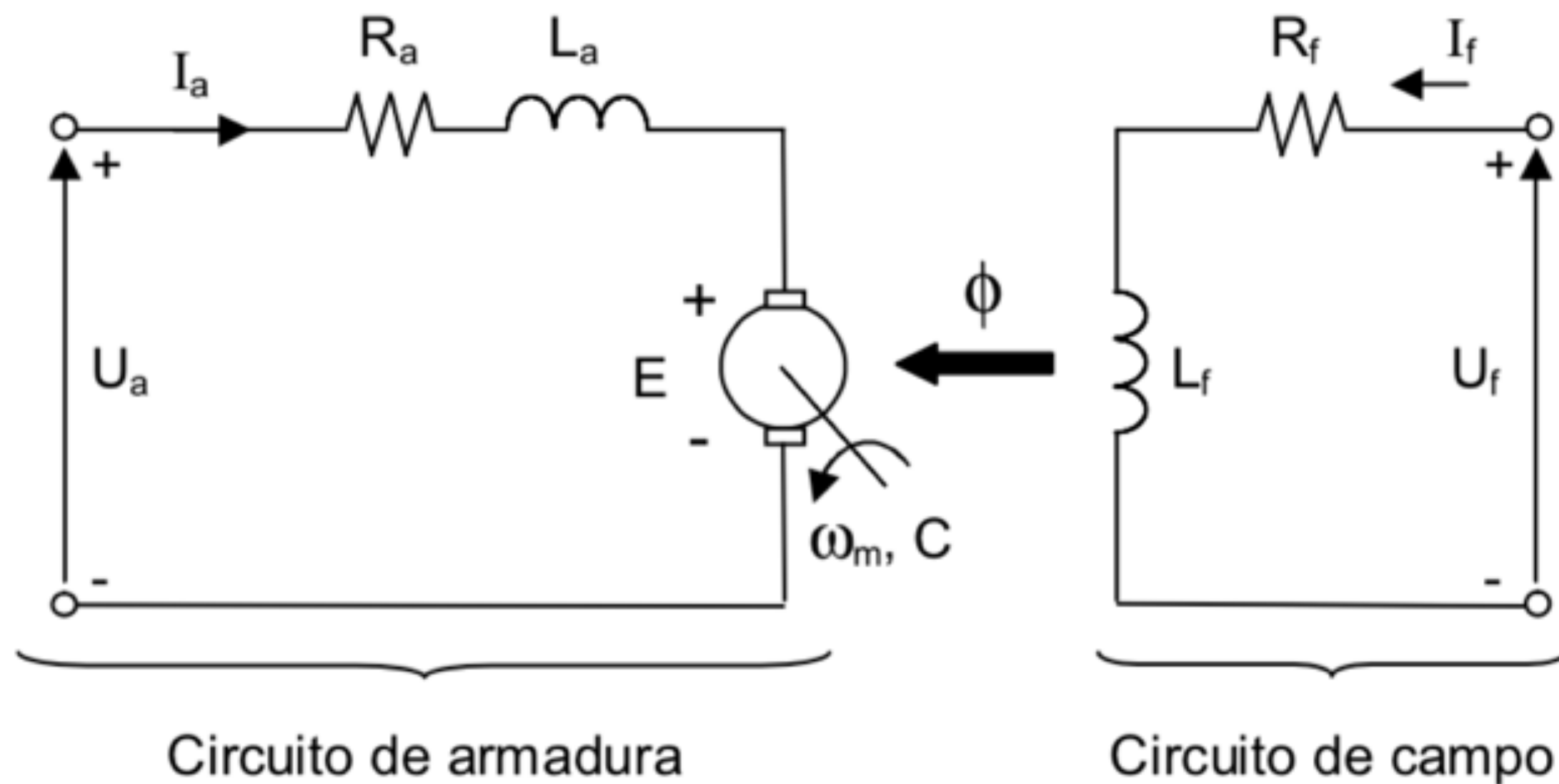
Fonte: <http://www.asten.com.br>



Gerador elétrico

Fonte: <https://www.auroragenerators.com>

Motores de corrente contínua



Circuito equivalente do motor cc
Fonte: (Siemens, 2006)

$$U_a = R_a \cdot I_a + E$$

$$E = k_1 \cdot \phi \cdot n$$

$$n = k_1 \cdot \frac{(U_a - R_a \cdot I_a)}{\phi}$$

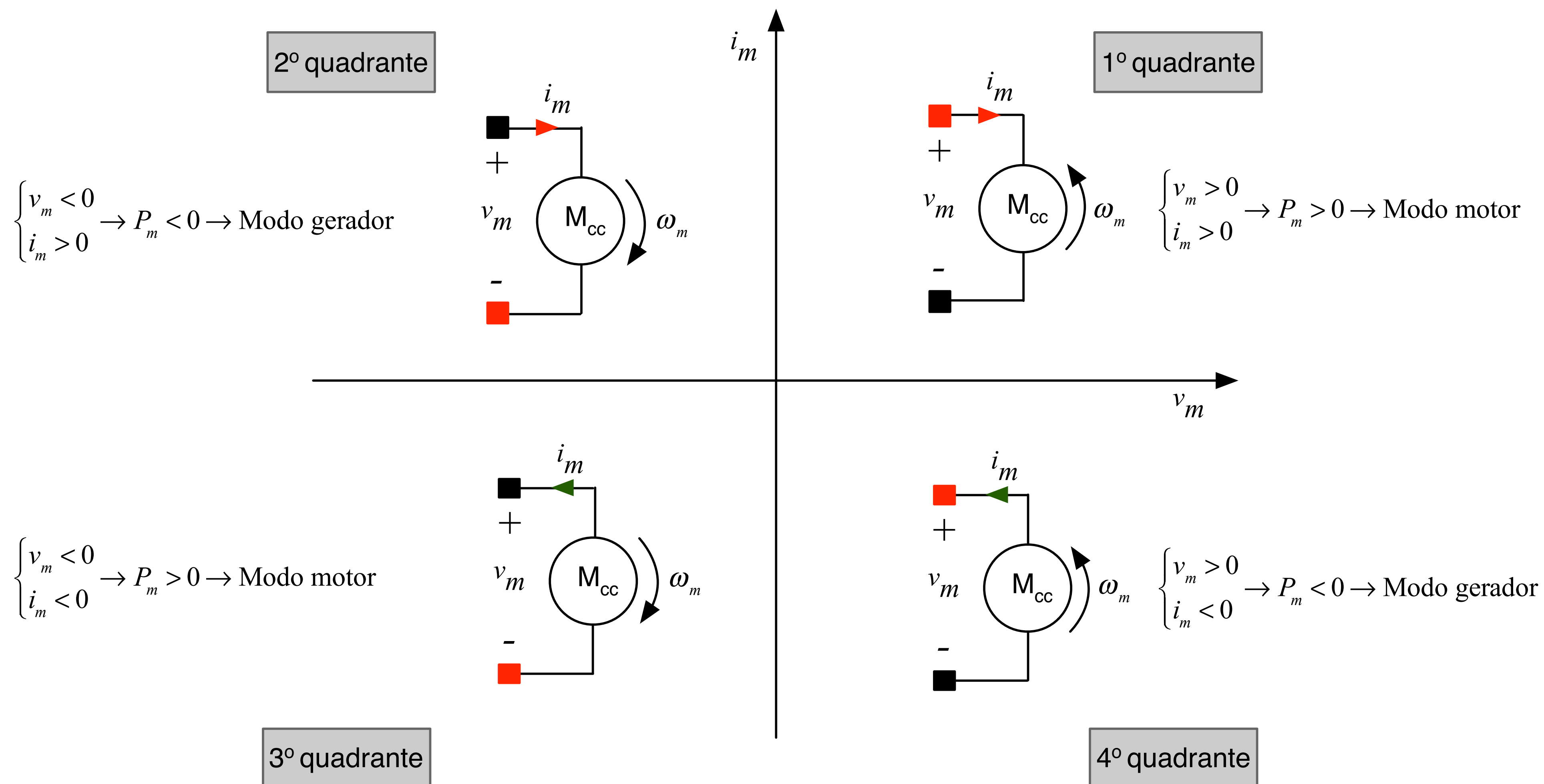
$$R_a \cdot I_a \cong 0$$

$$n = k_1 \cdot \frac{U_a}{\phi} \rightarrow \text{Velocidade}$$

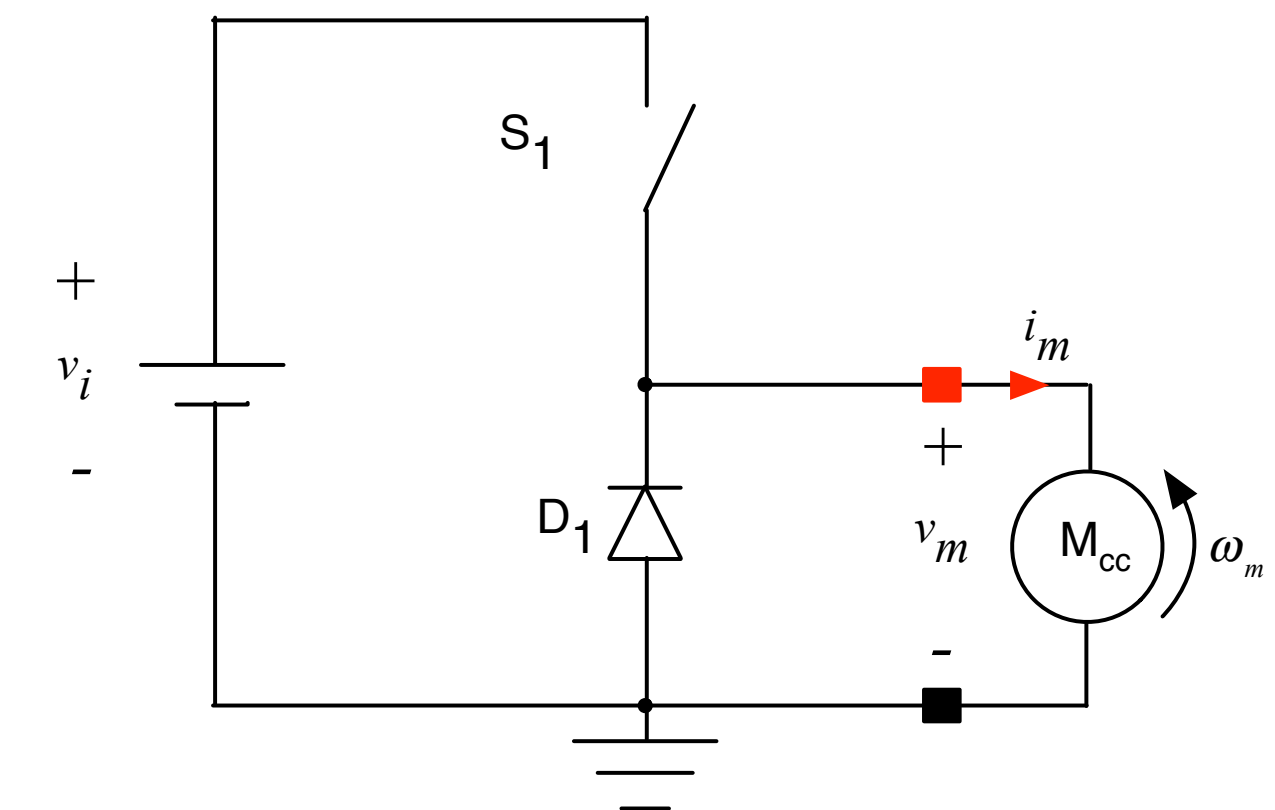
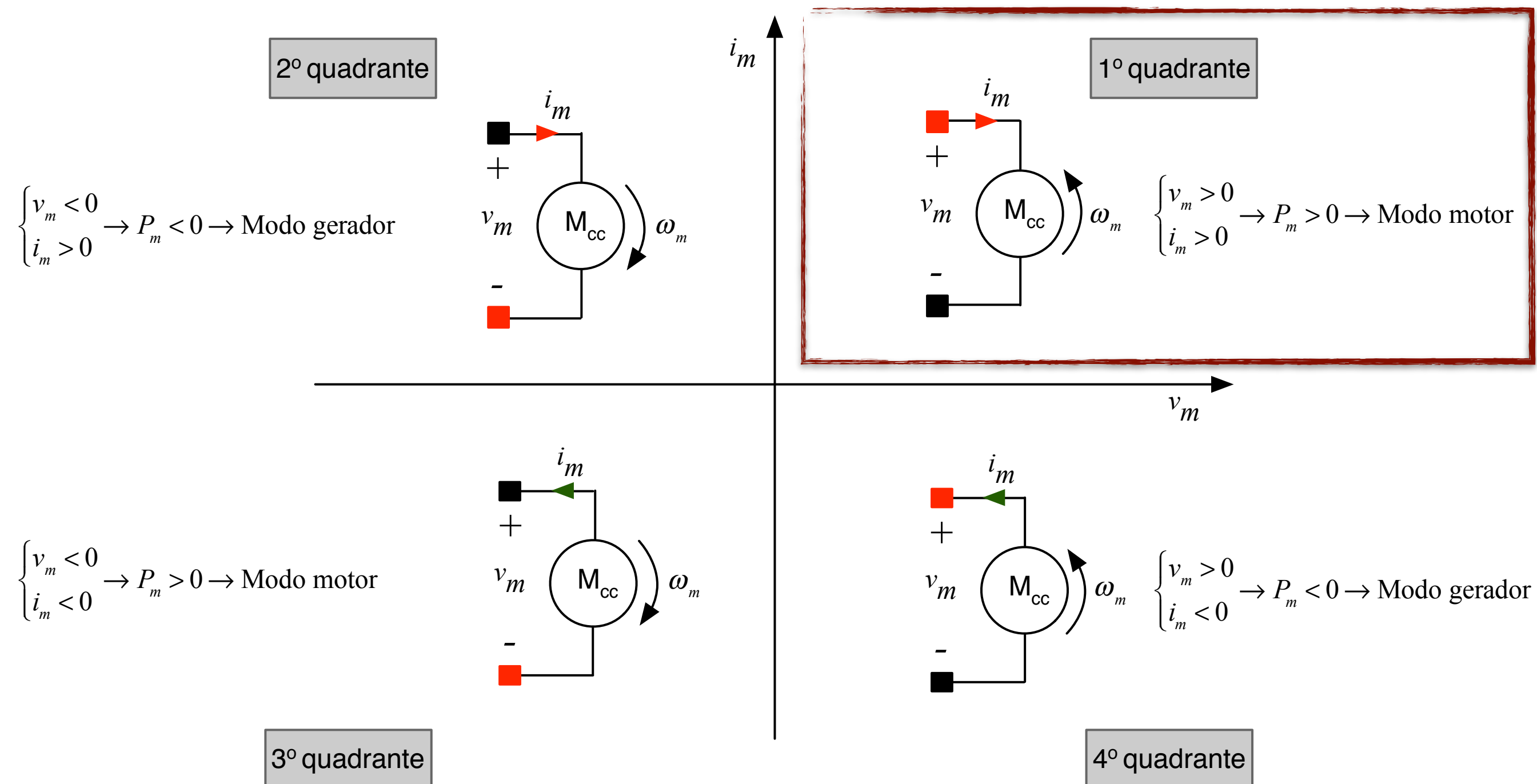
$$\phi = k_2 \cdot I_f$$

$$C = k_3 \cdot I_a \cdot \phi$$

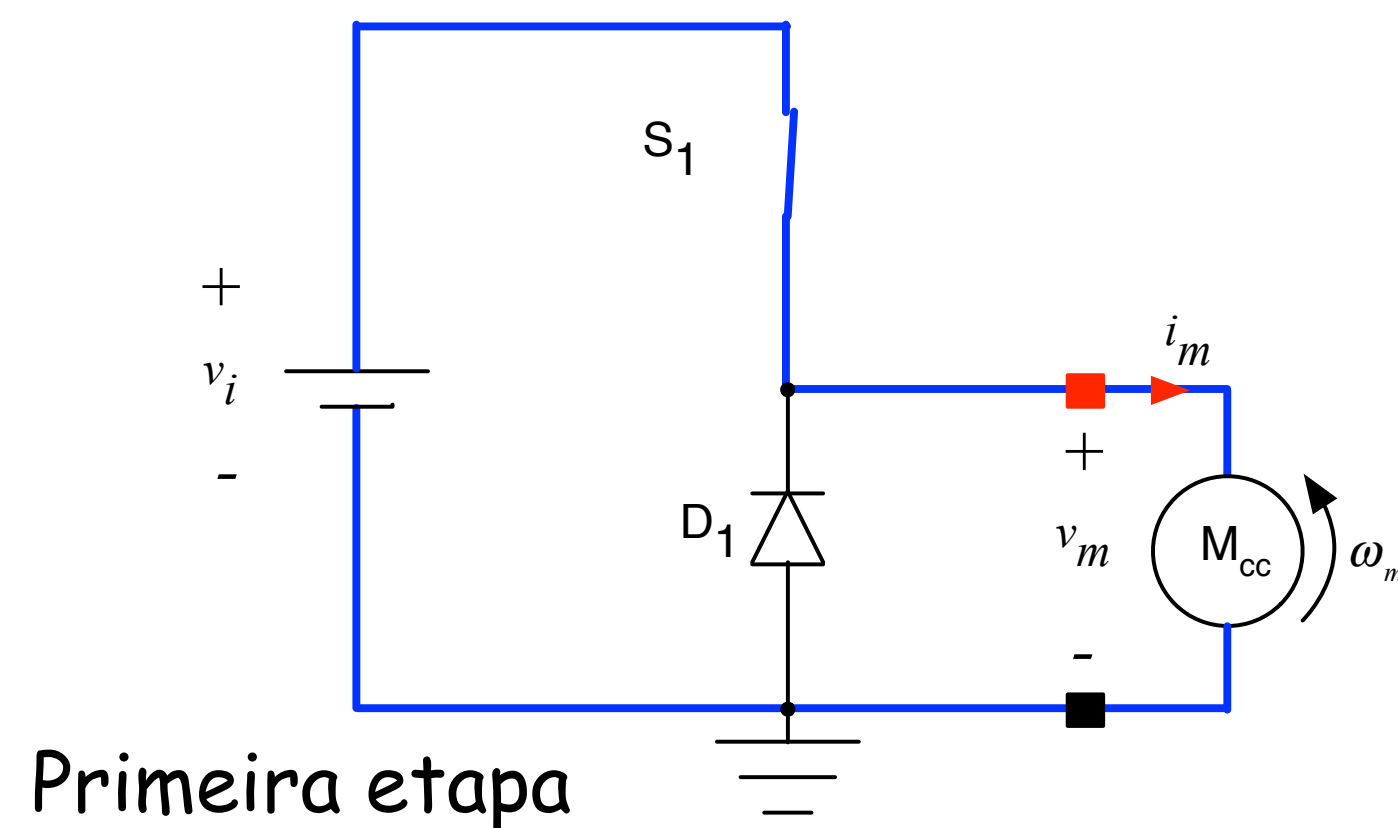
Quadrantes de operação dos motores cc



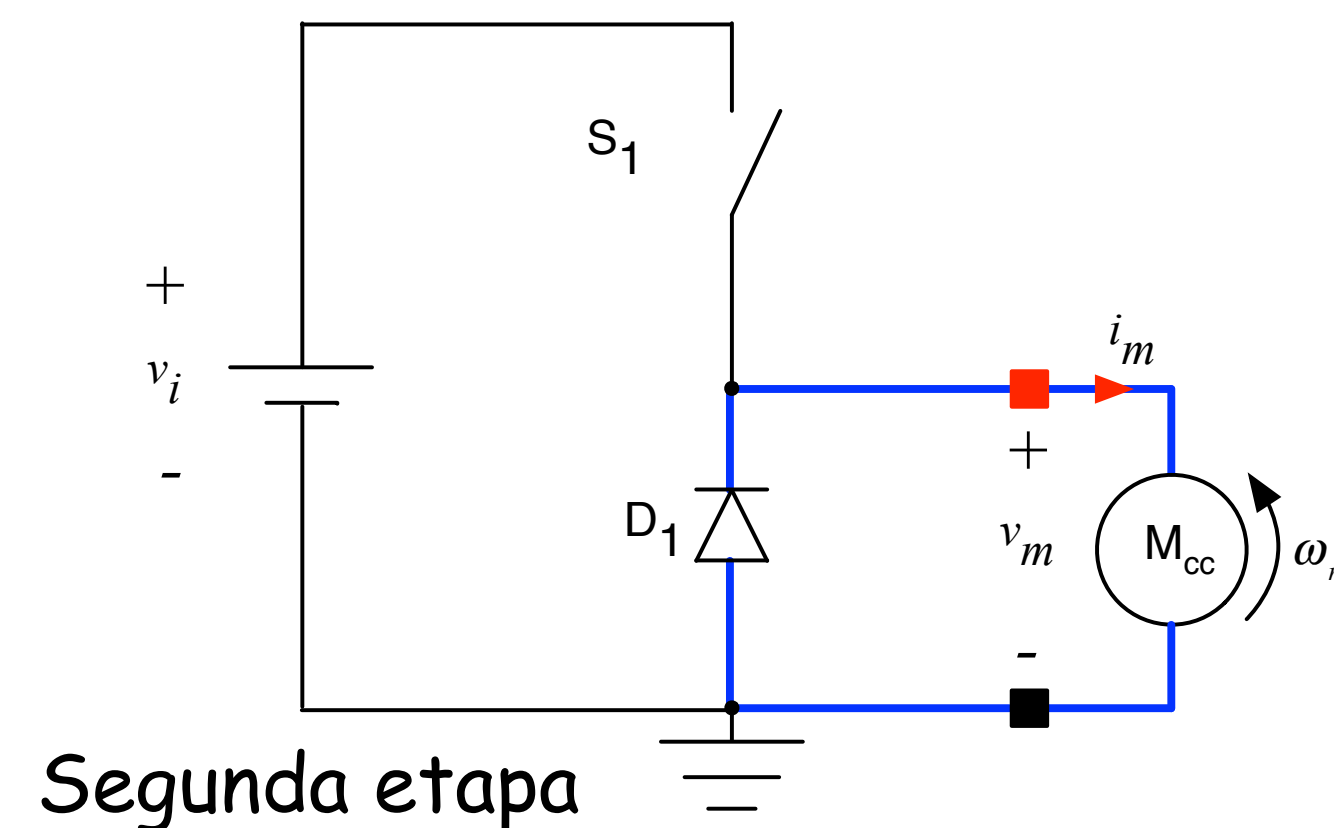
Quadrantes de operação dos motores cc



Conversor simples com chave

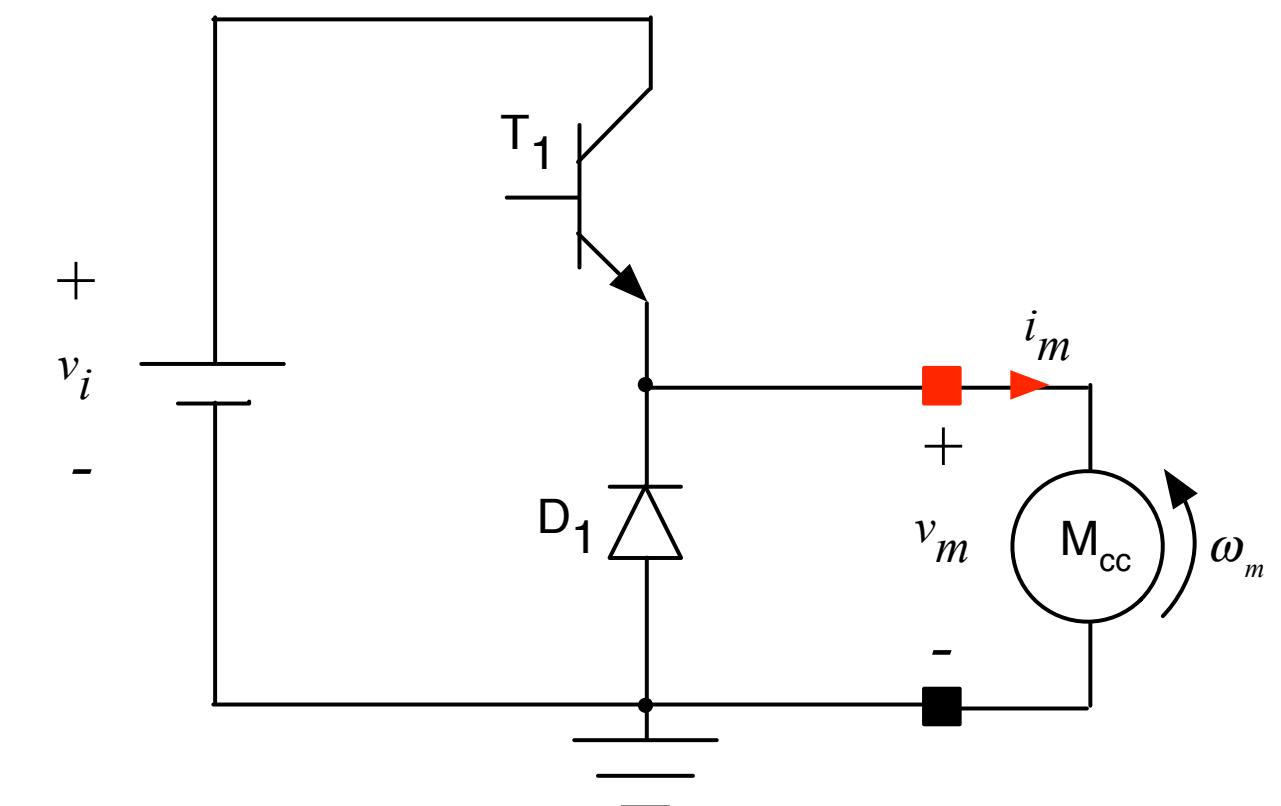
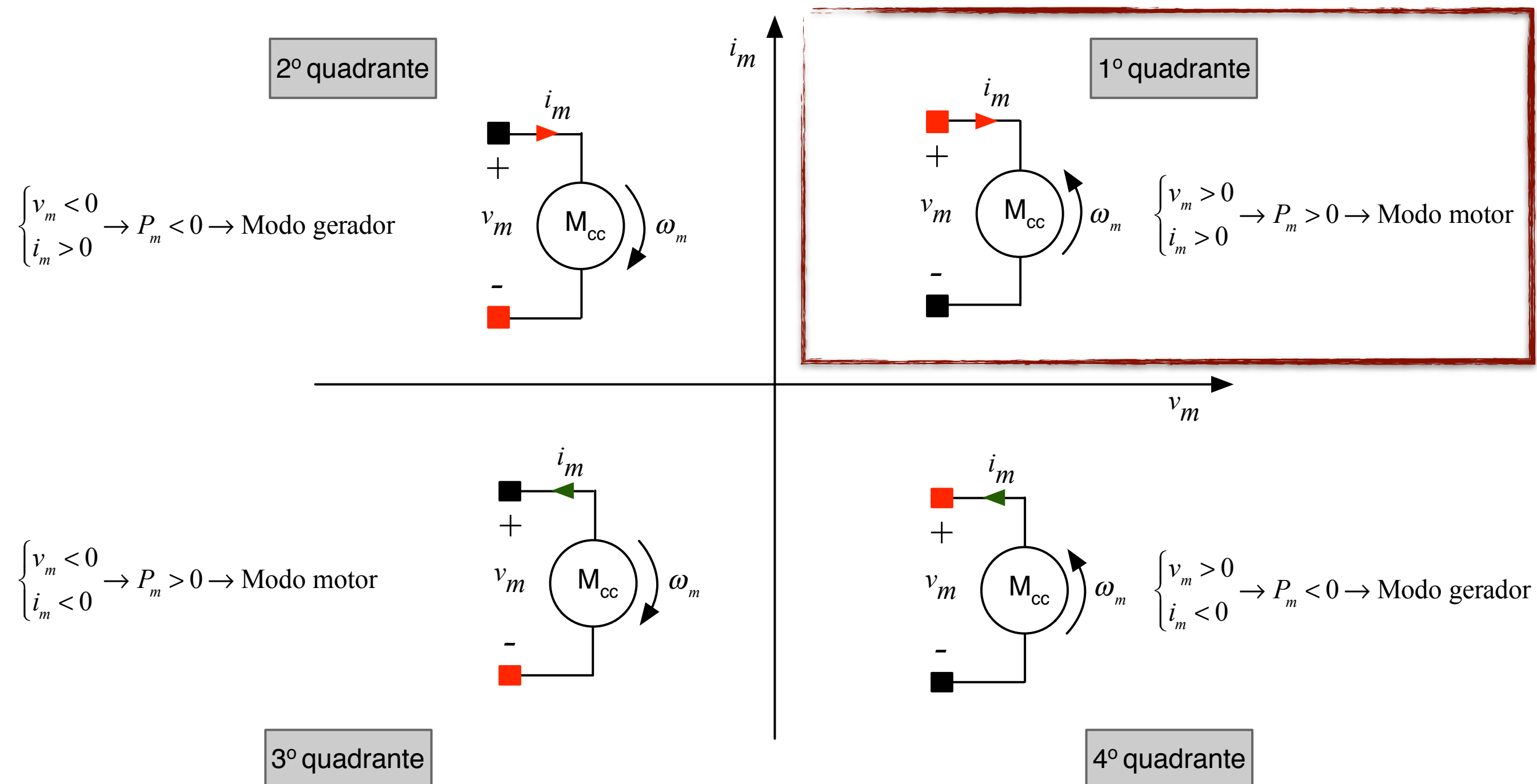


Primeira etapa

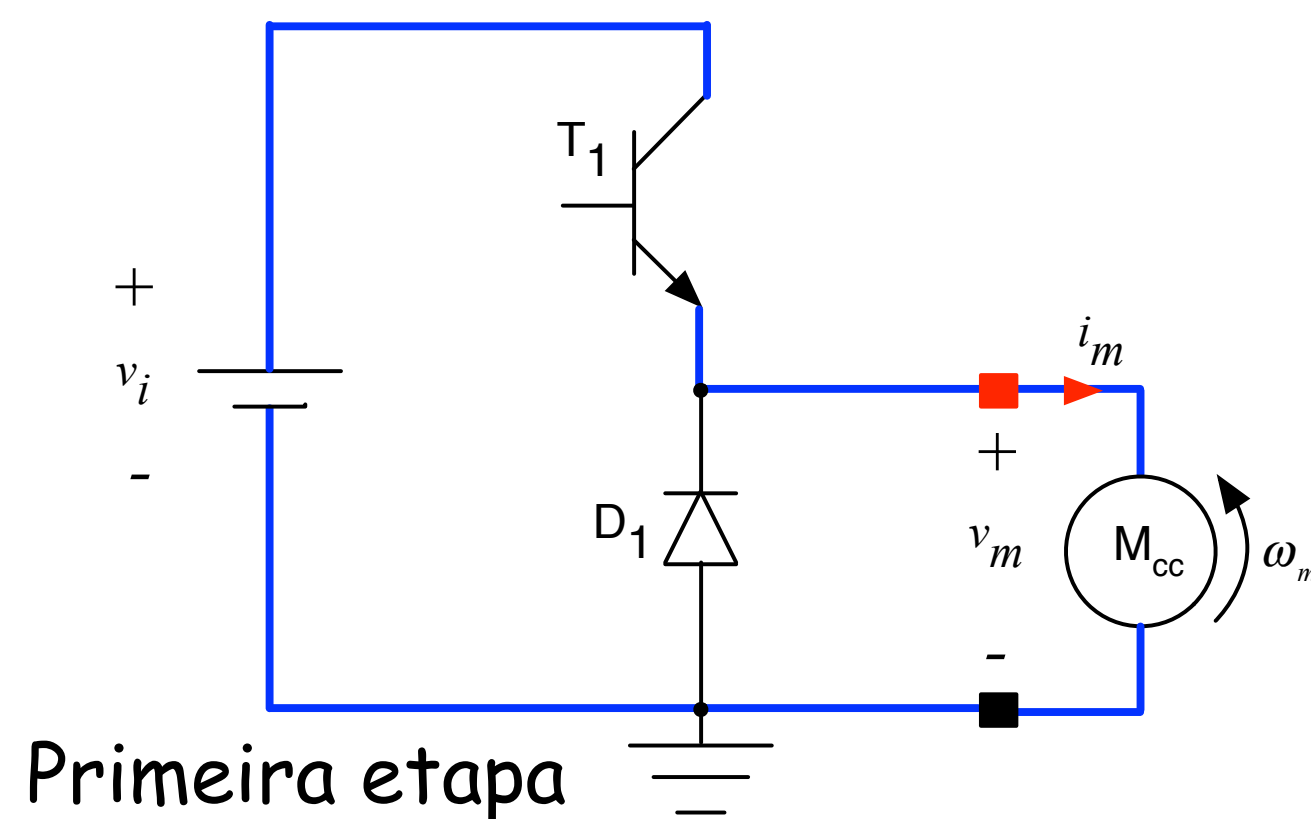


Segunda etapa

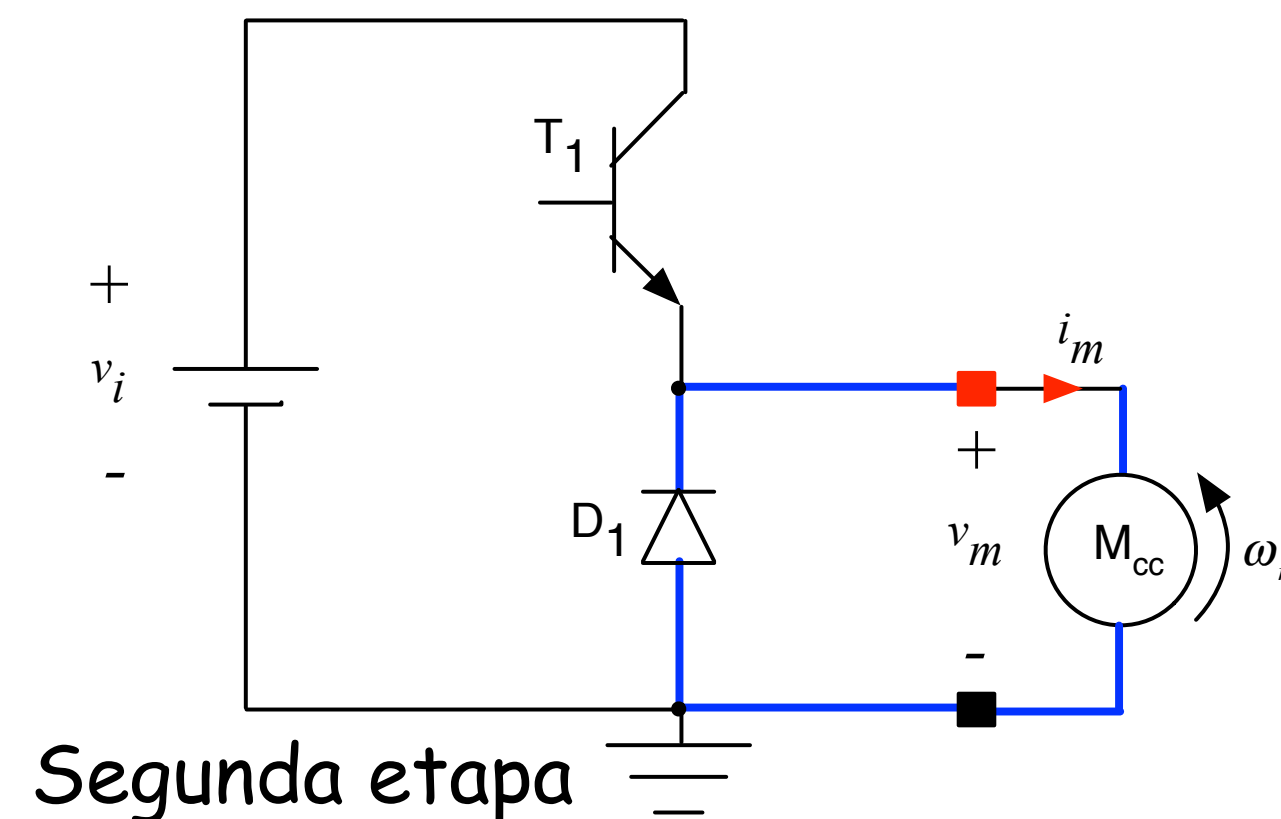
Quadrantes de operação dos motores cc



Conversor simples com transistor

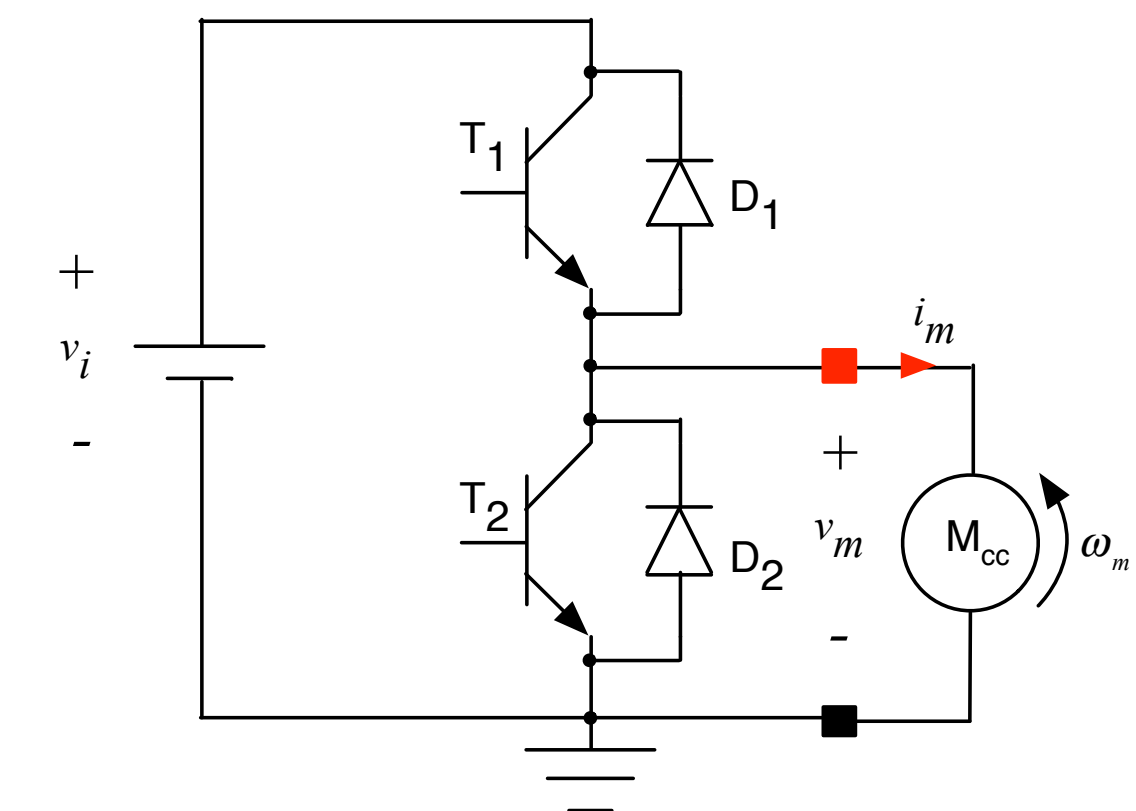
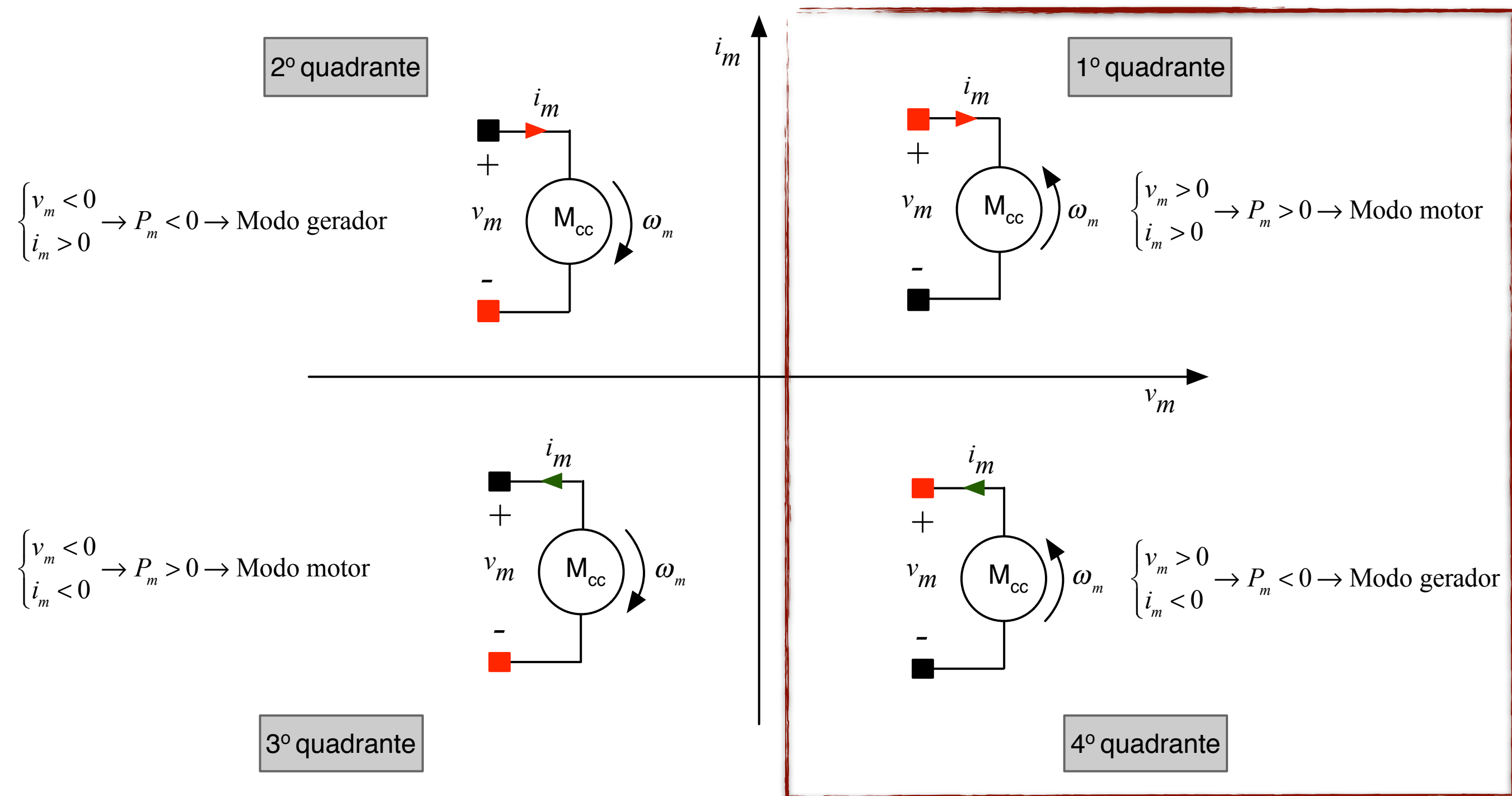


Primeira etapa



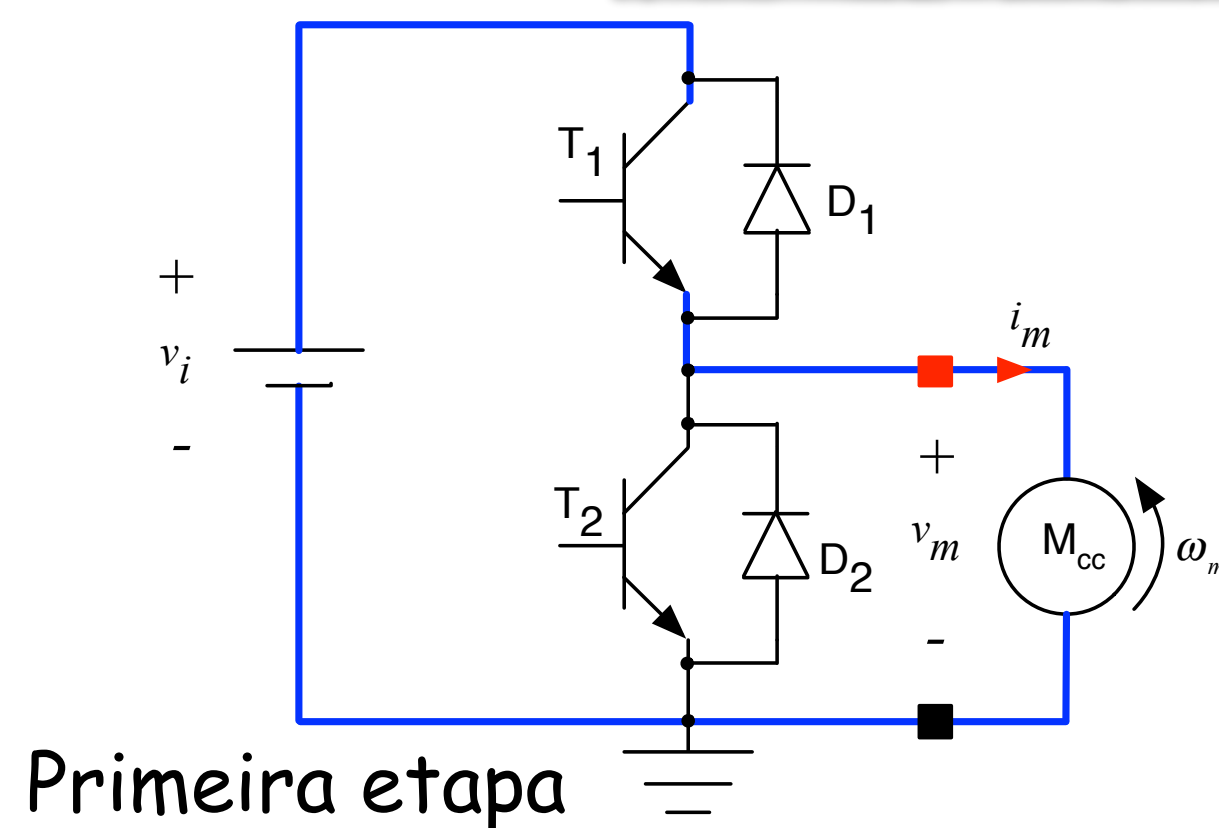
Segunda etapa

Quadrantes de operação dos motores cc

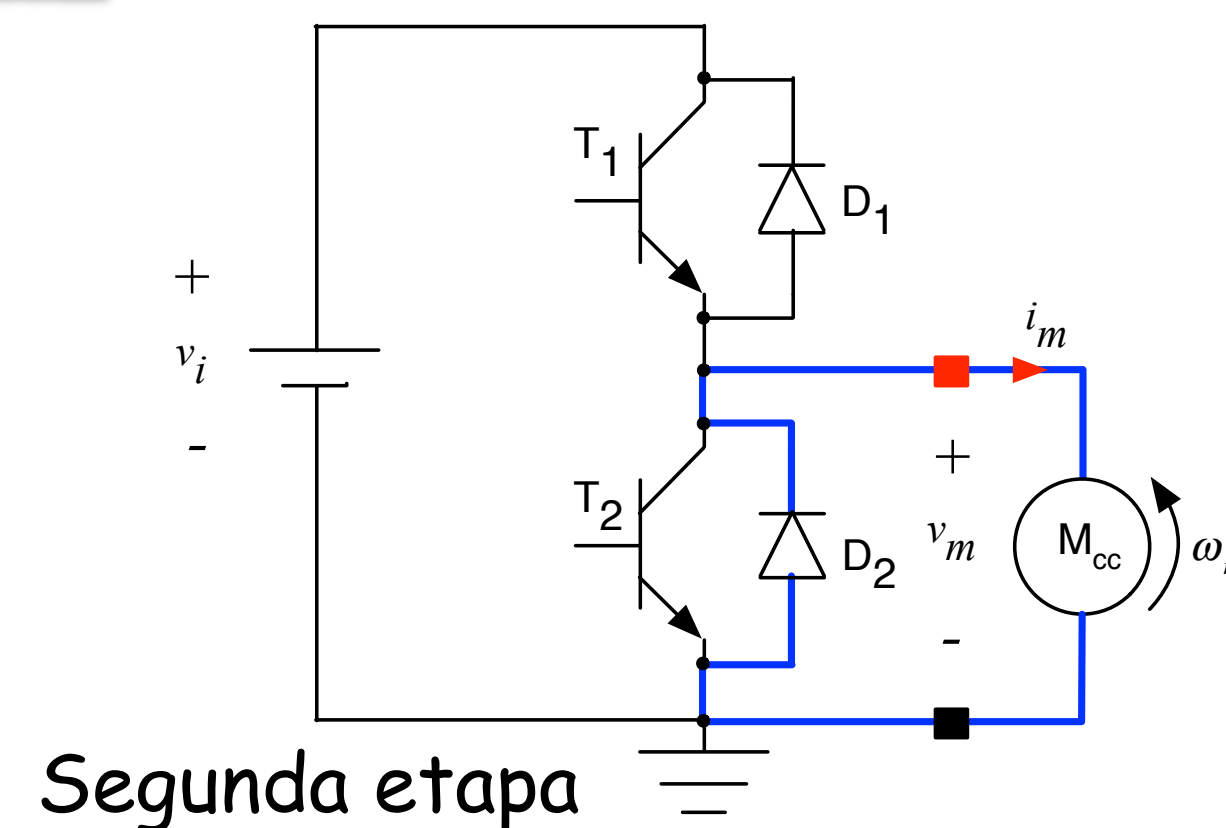


Conversor meia ponte

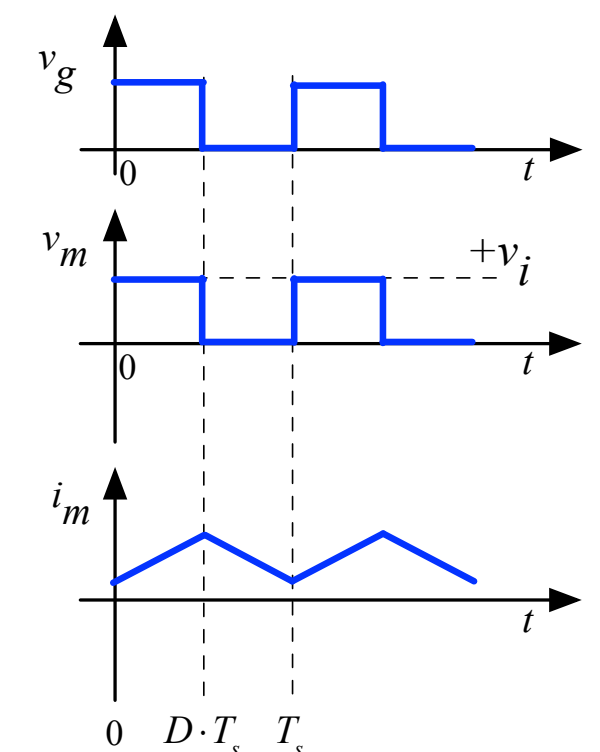
Modo motor



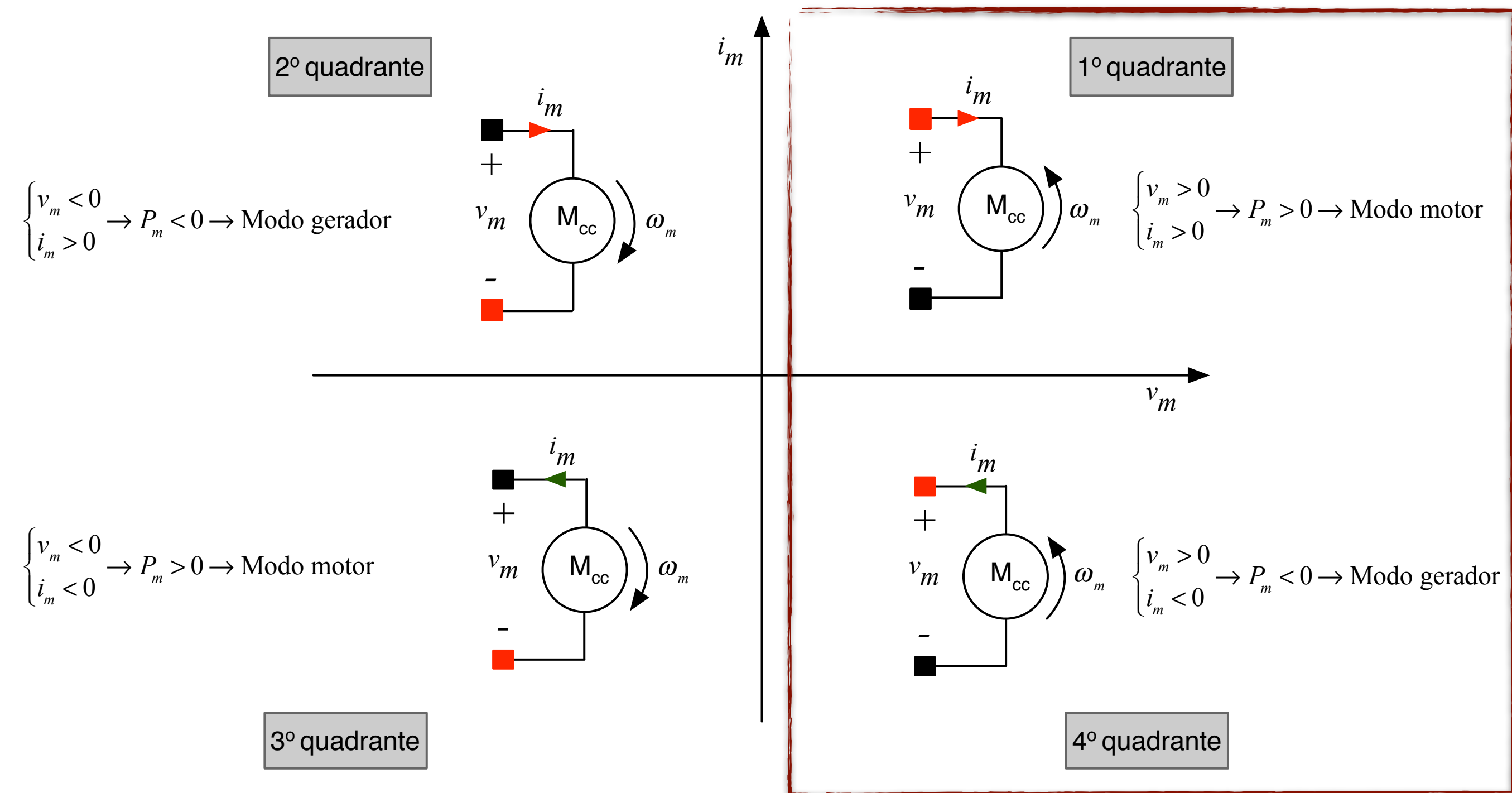
Primeira etapa



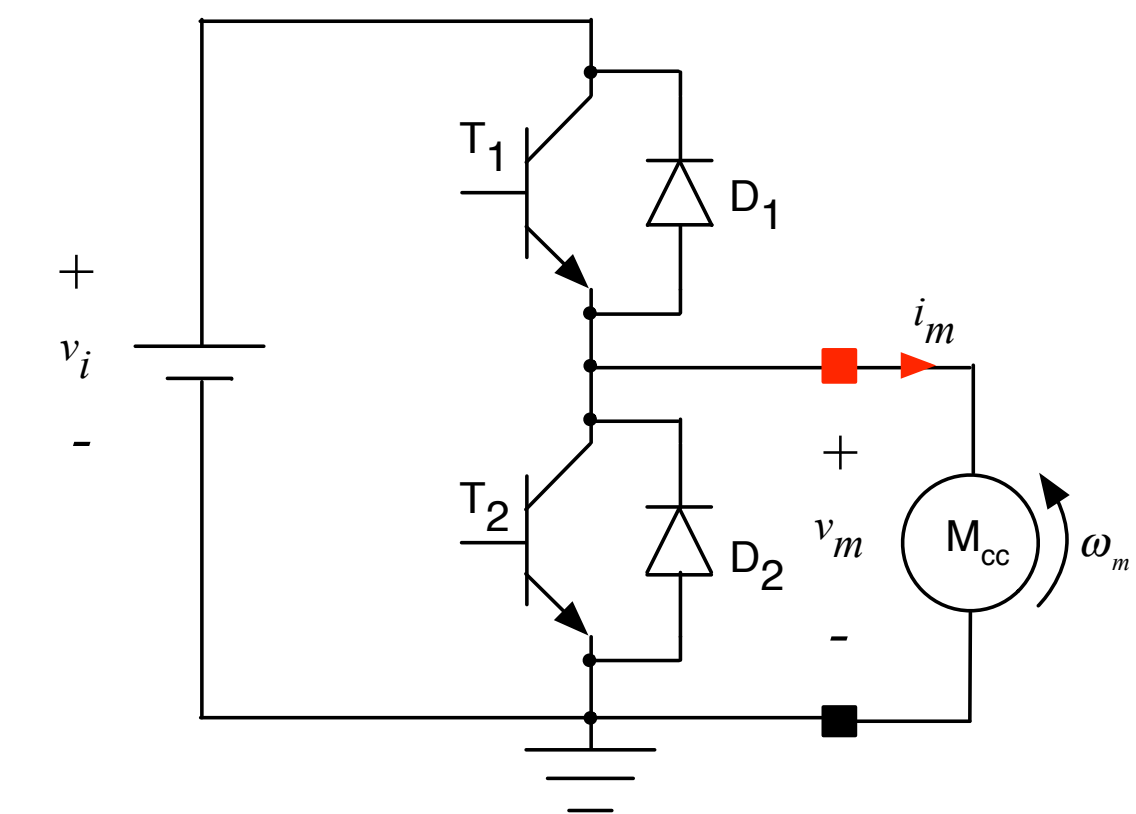
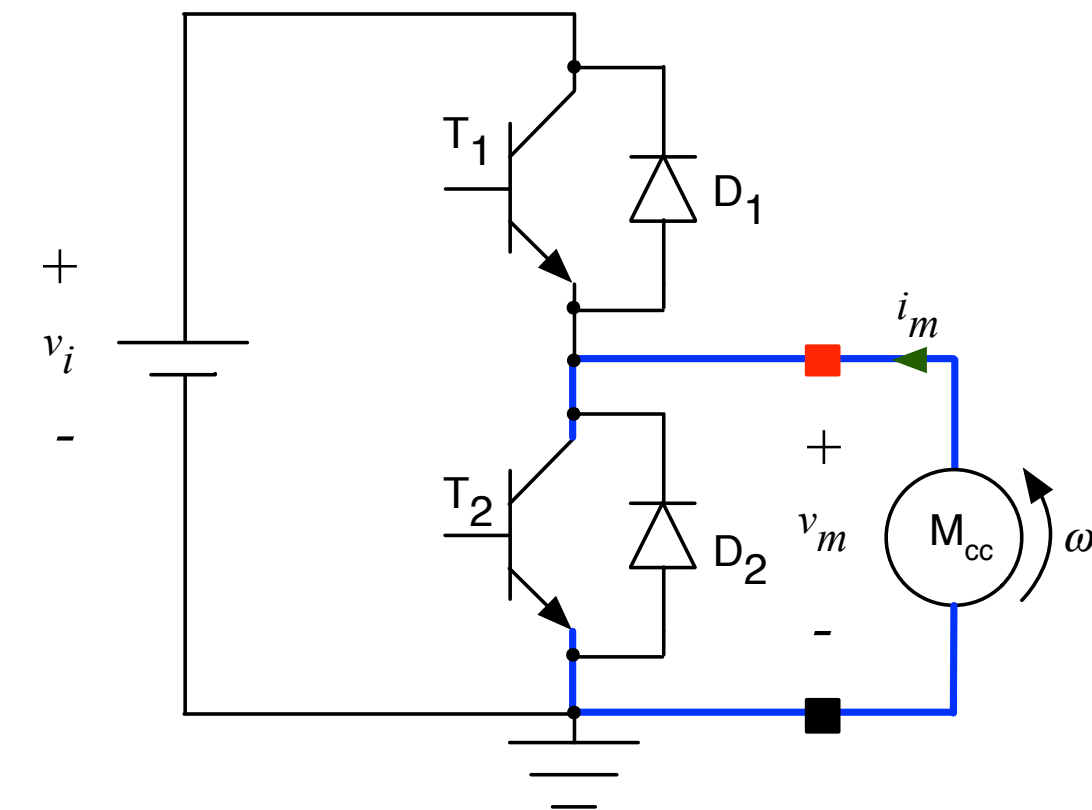
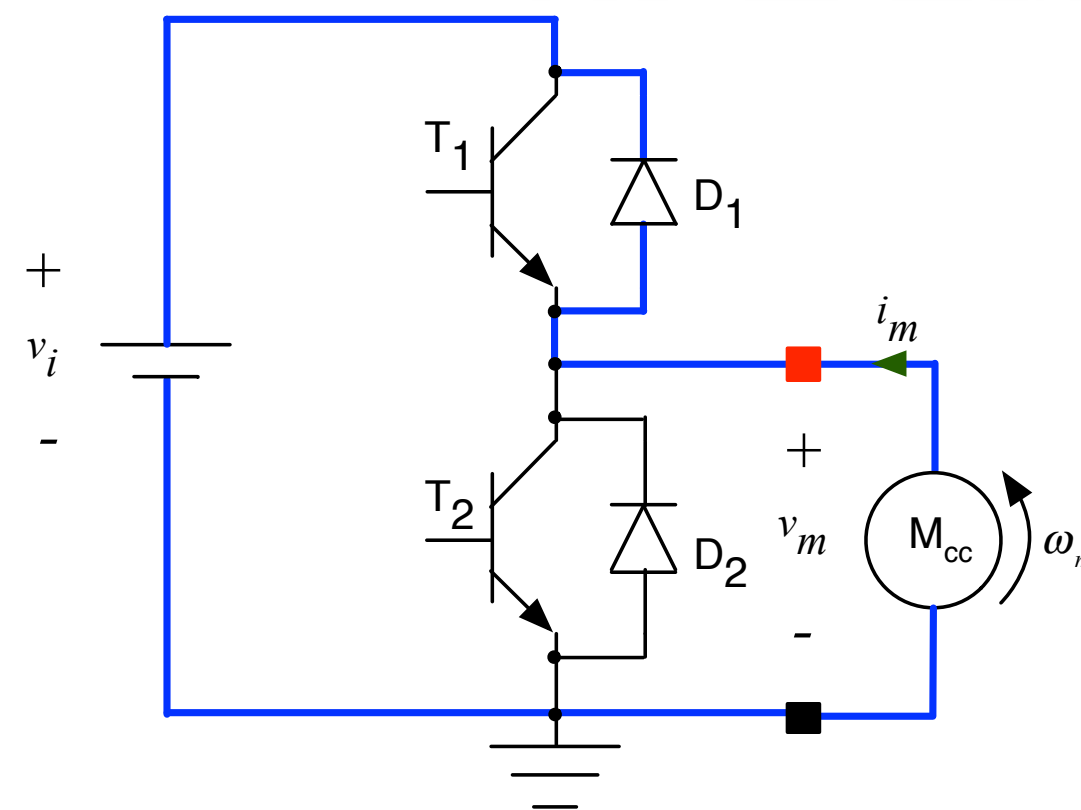
Segunda etapa



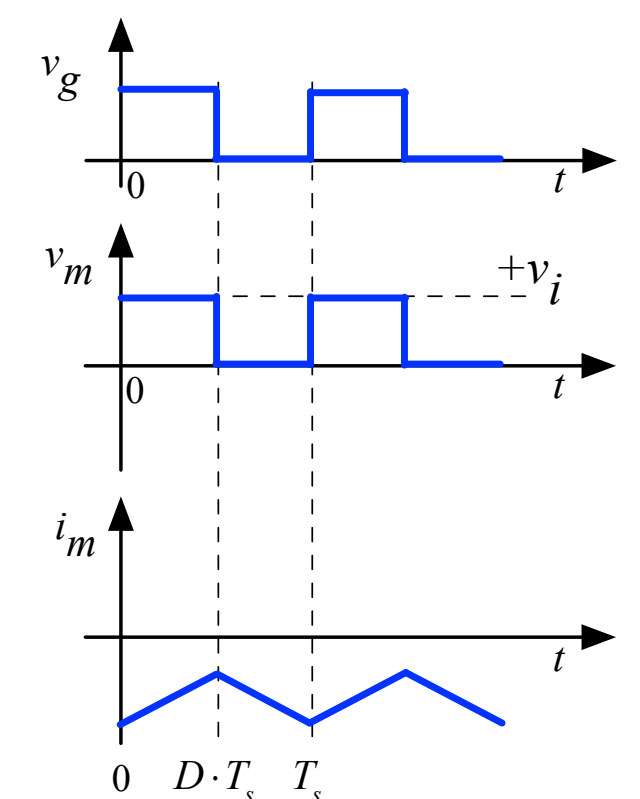
Quadrantes de operação dos motores cc



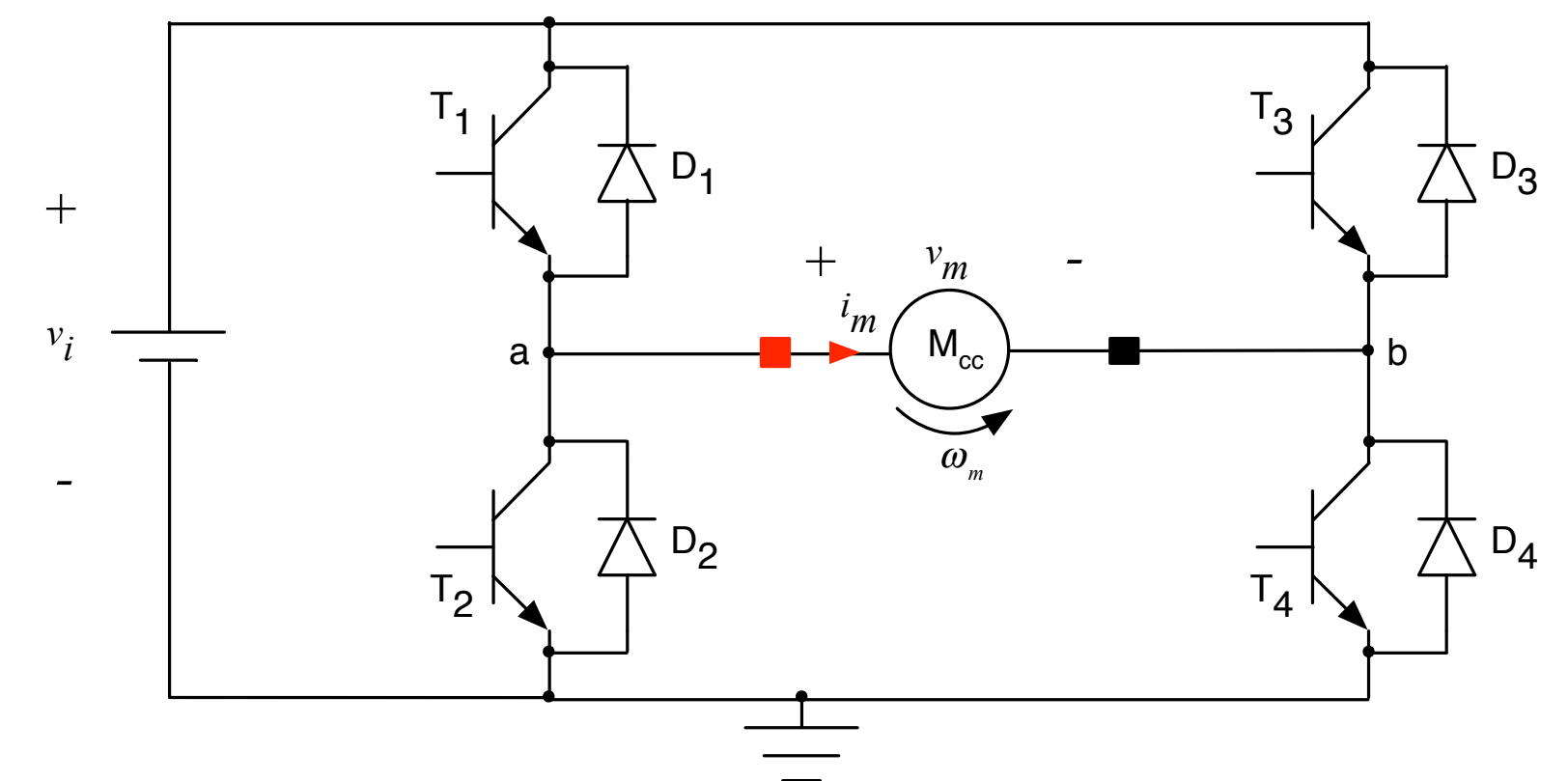
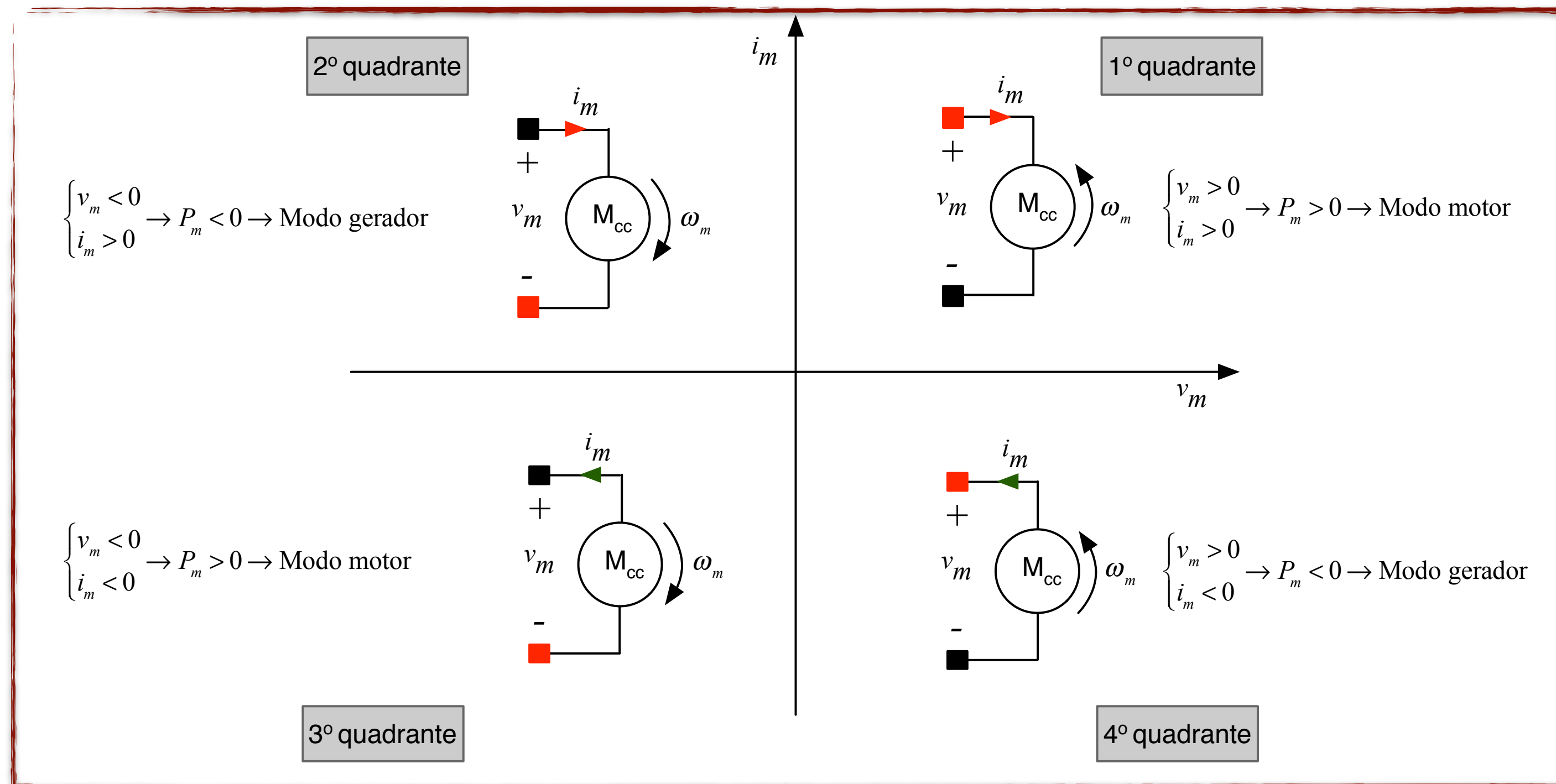
Modo gerador



Conversor meia ponte

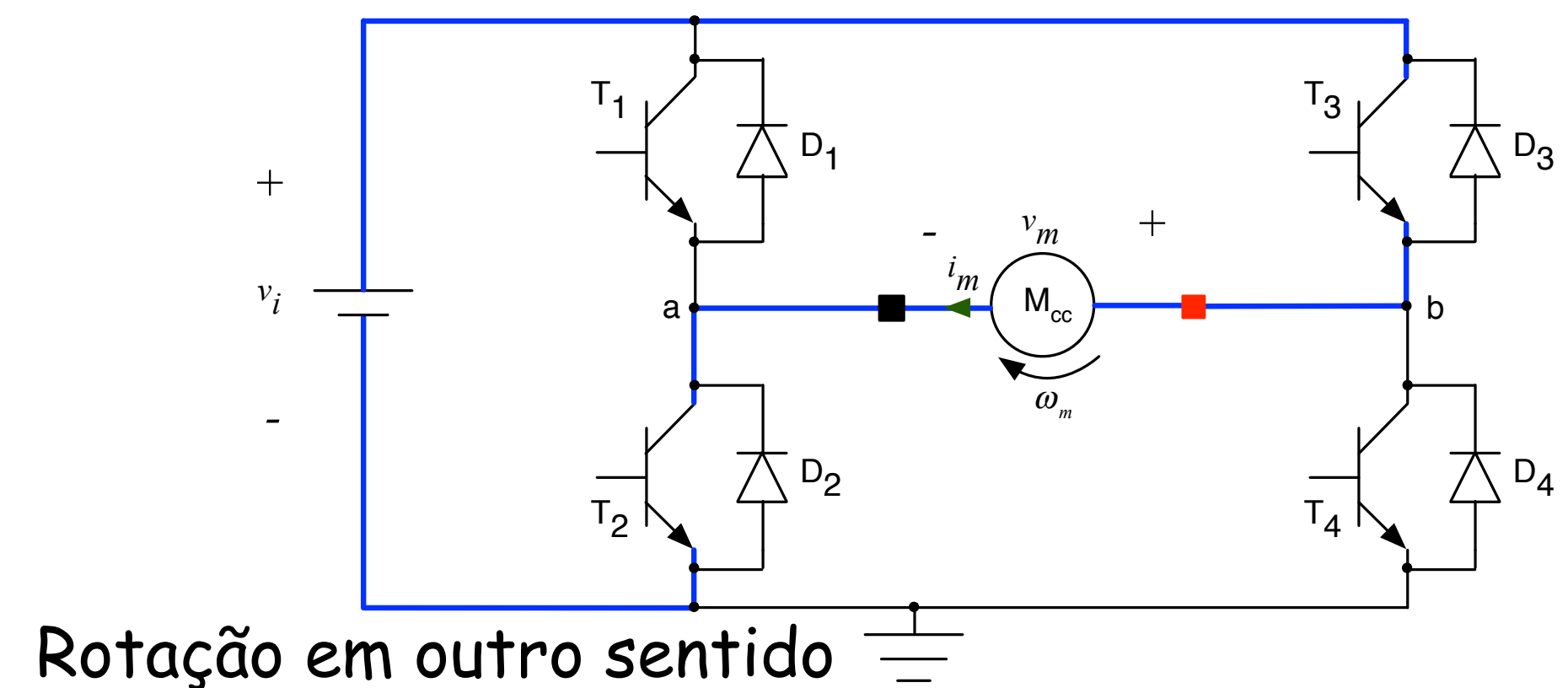
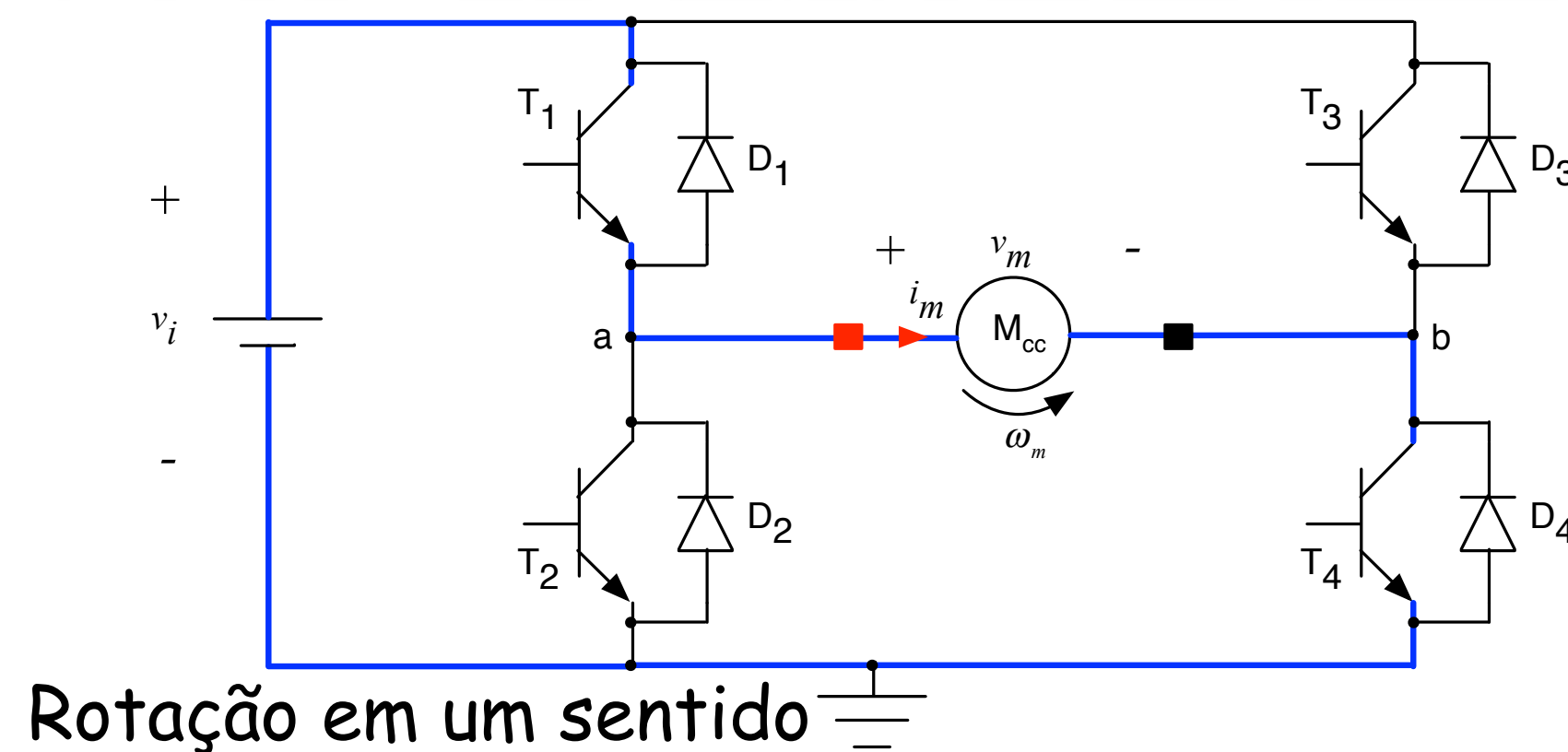


Quadrantes de operação dos motores cc

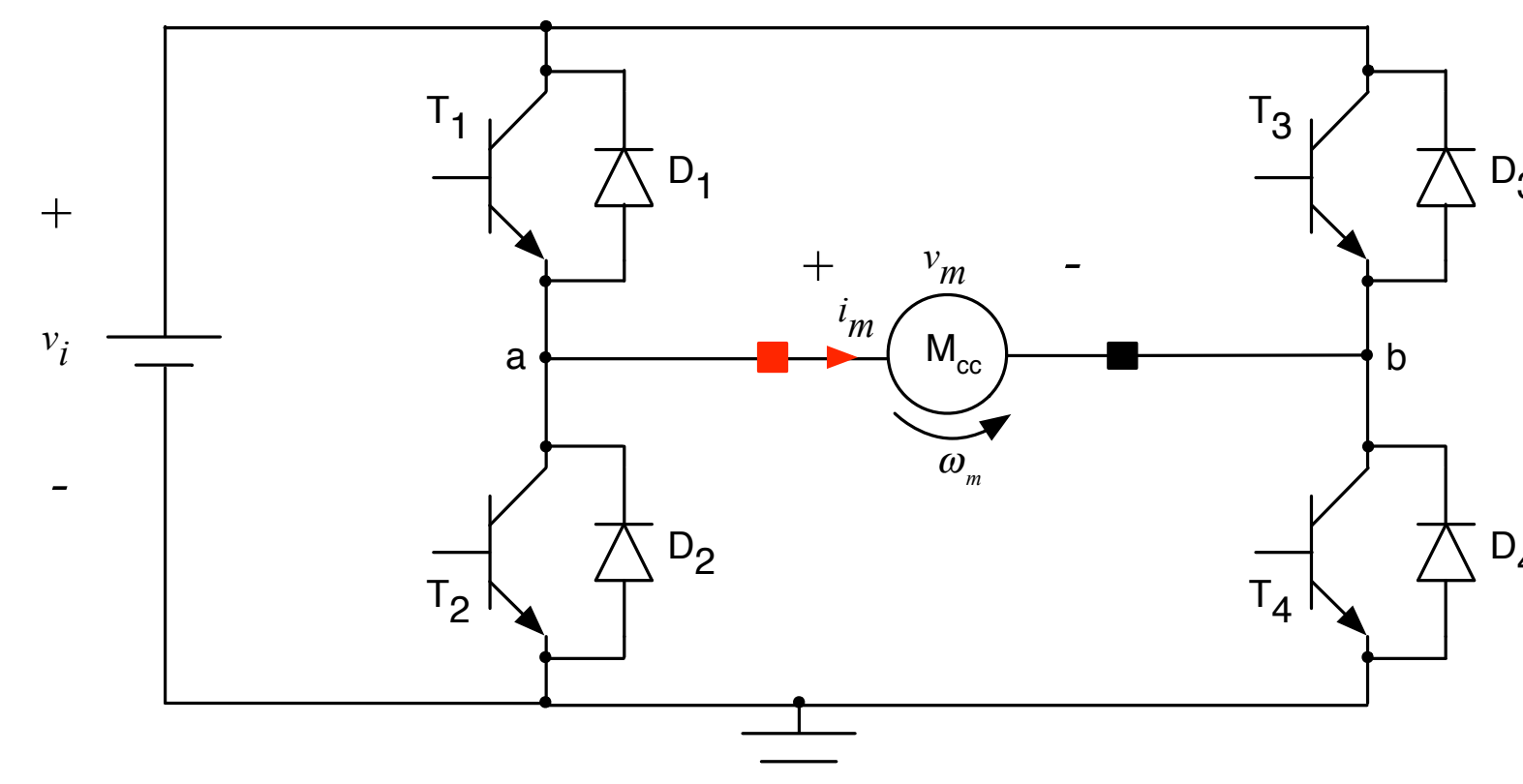
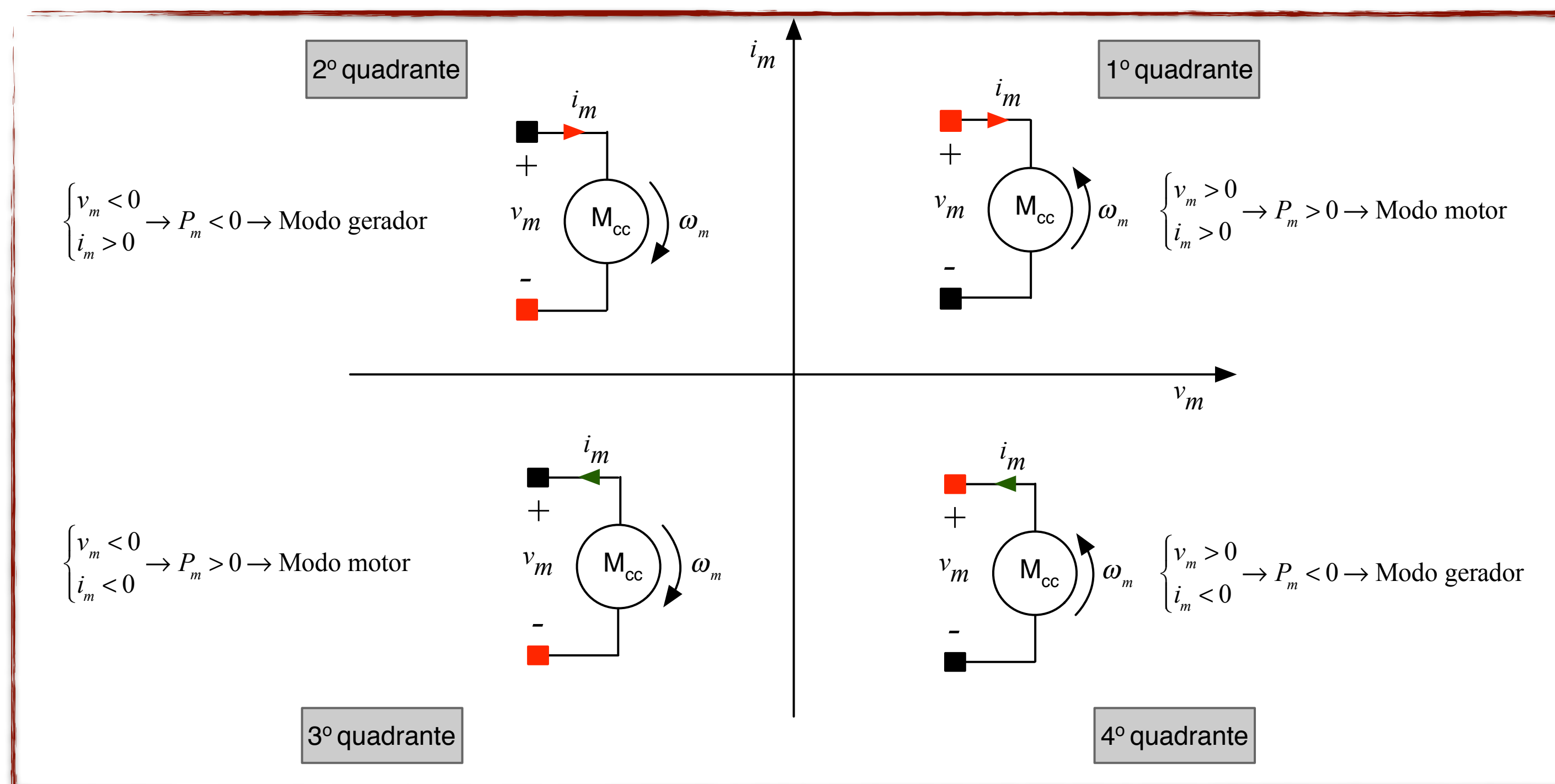


Conversor ponte completa

Modo motor

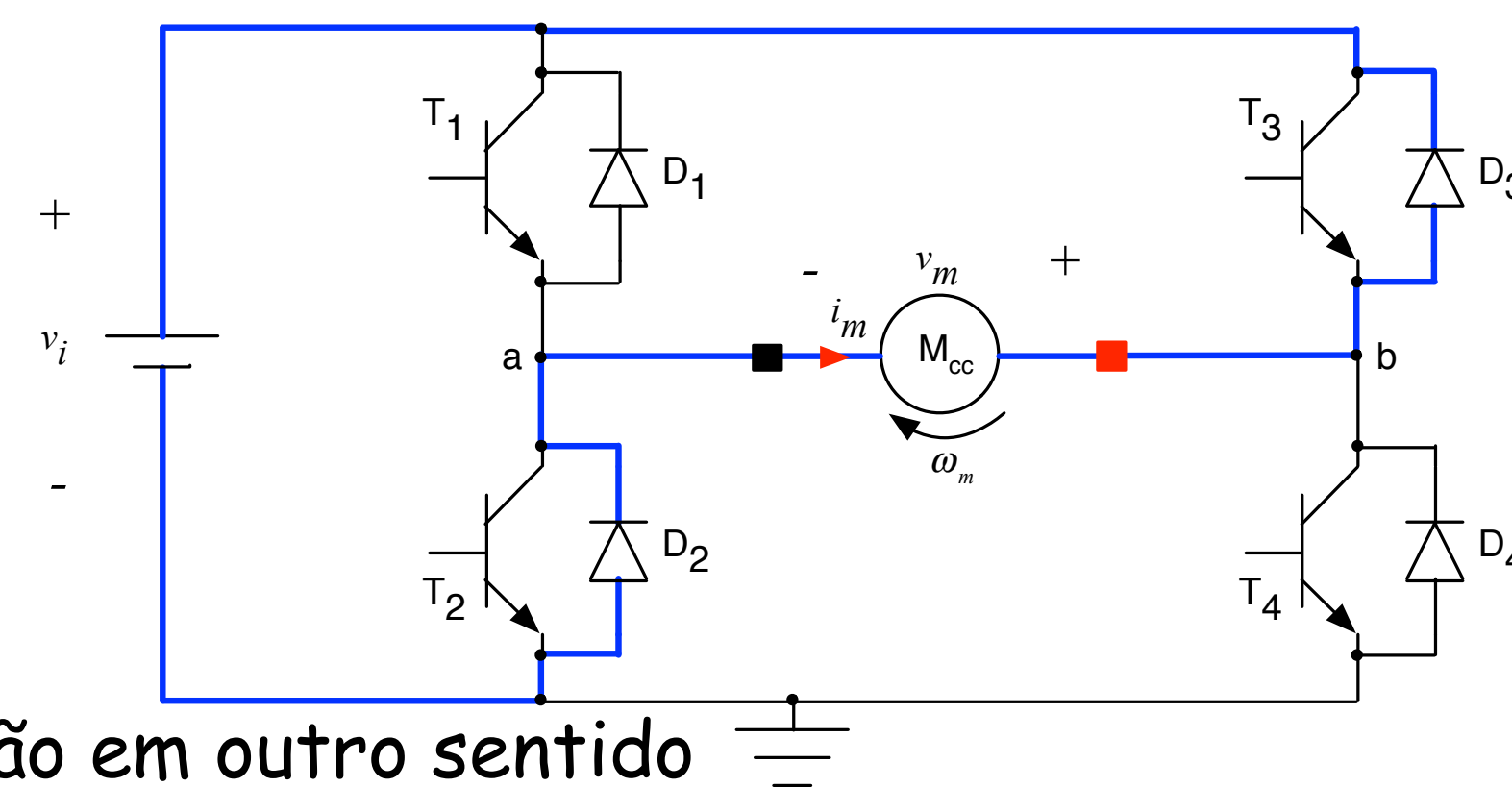
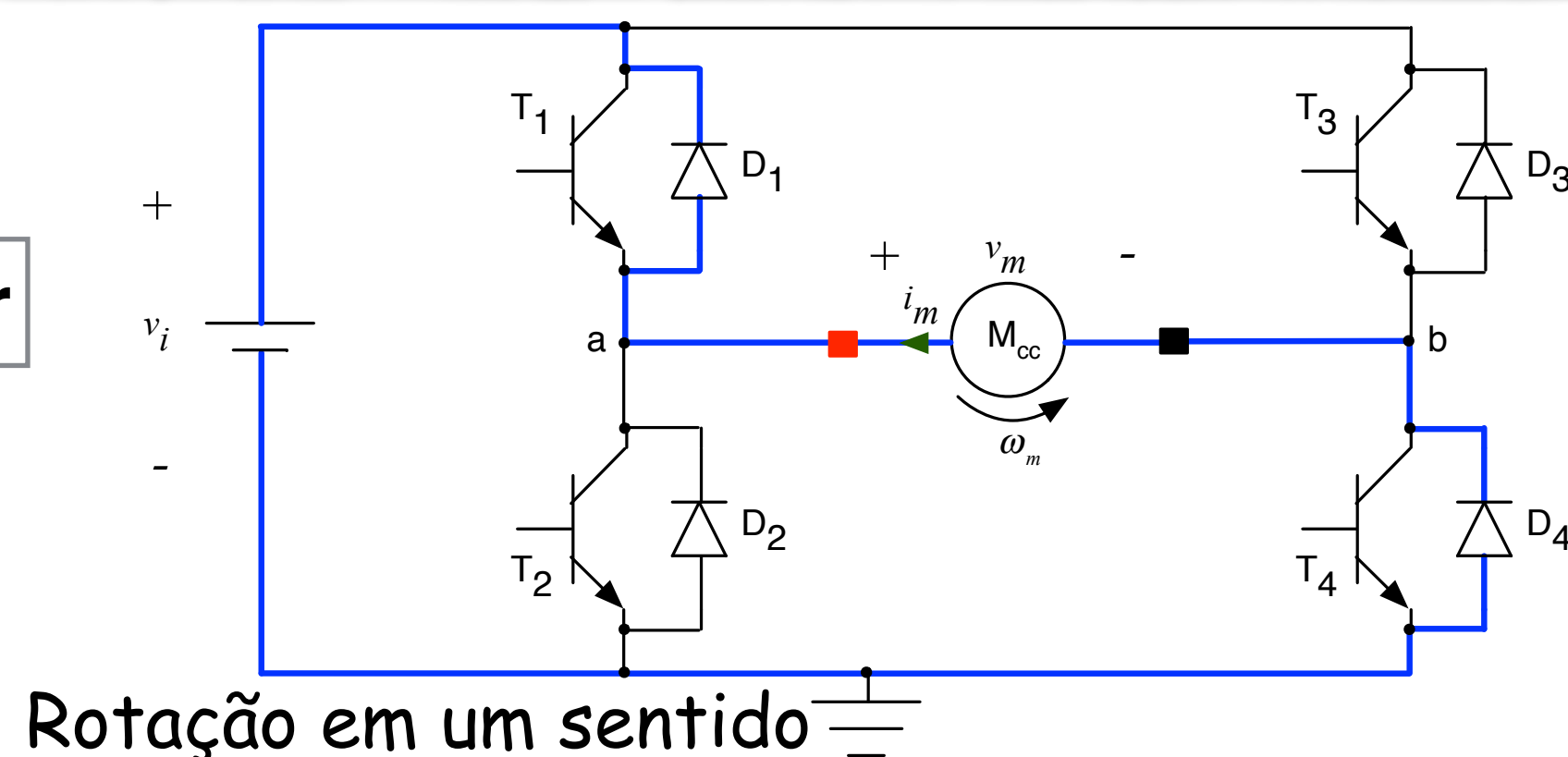


Quadrantes de operação dos motores cc



Conversor ponte completa

Modo gerador



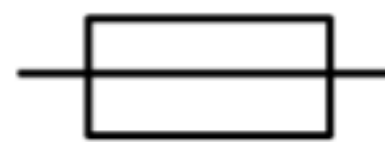
Elementos para acionamento de motores cc

Elementos de proteção:

- Fusíveis;
- Disjuntores.



Fusível



Fusível



Disjuntor



Vidro



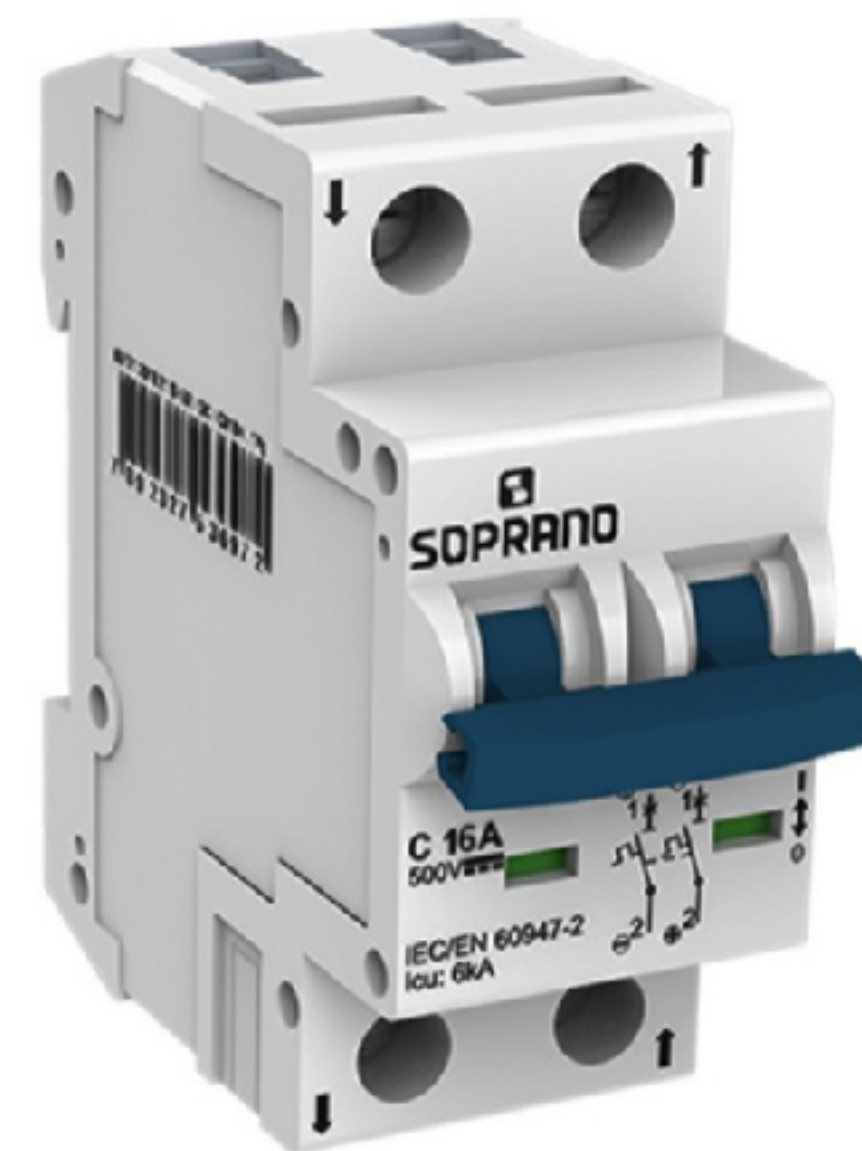
Cerâmica



Areia

Exemplos de fusíveis

Fonte: <https://www.americanas.com.br>



Disjuntor termomagnético para corrente contínua

Fonte: <https://www.soprano.com.br>

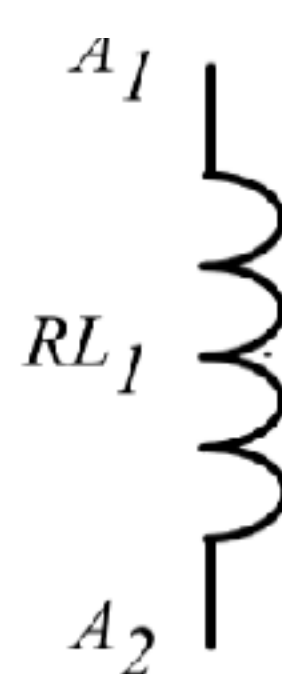
Elementos para acionamento de motores cc

Dispositivos eletromecânicos e eletromagnéticos:

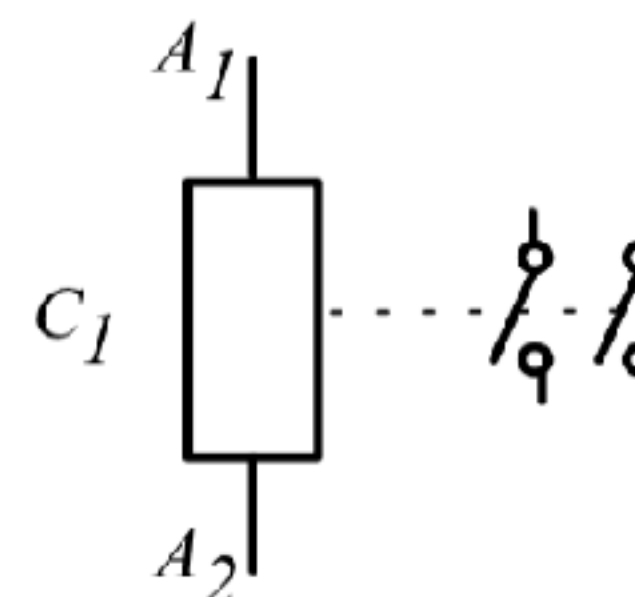
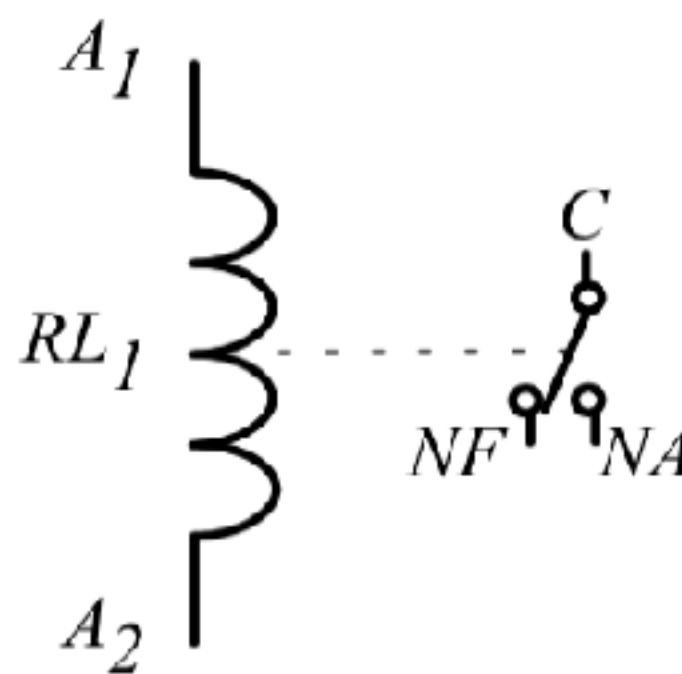
- Chaves;
- Relés.



Chave liga-desliga



Relé simples e duplo

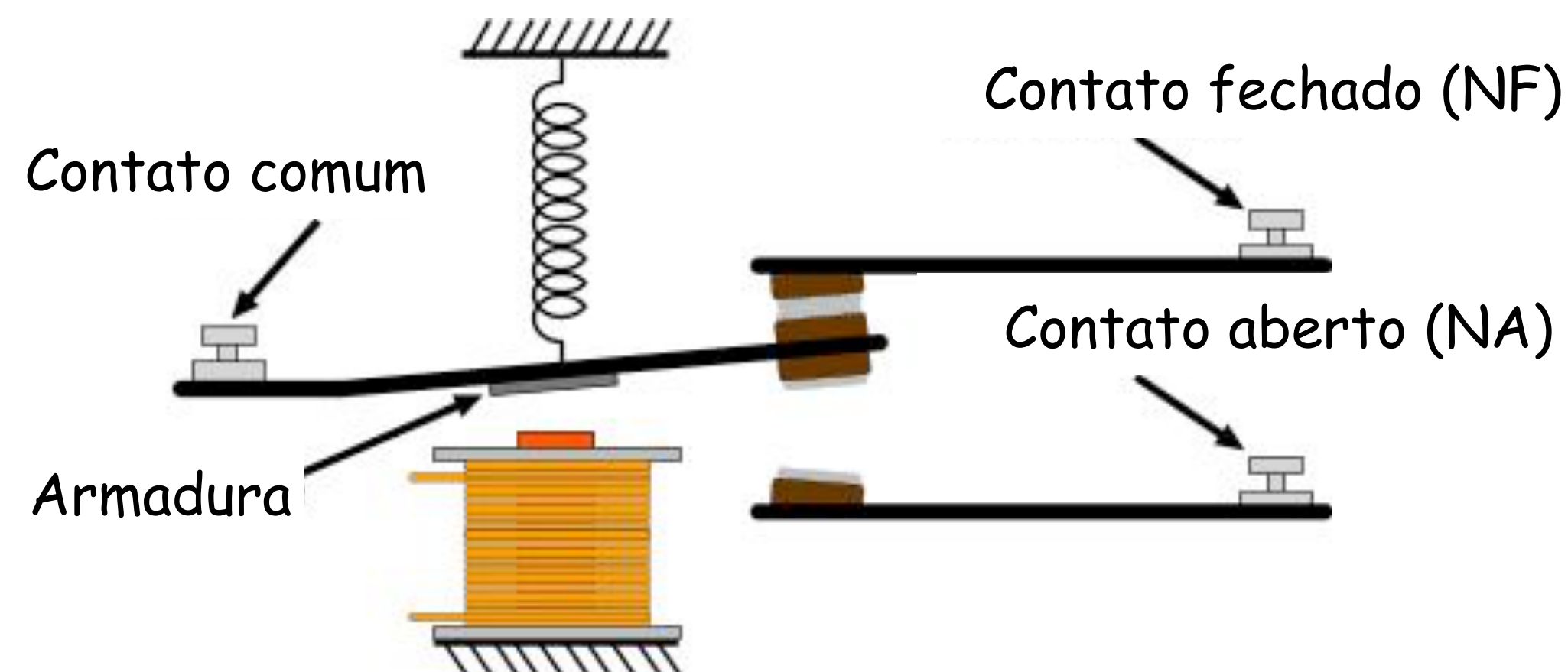


Contator



Aspecto de um relé eletromagnético

Fonte: <https://www.metalix.com.br>



Funcionamento do relé eletromagnético

Fonte: <https://www.robocore.net>

Elementos para acionamento de motores cc

Dispositivos eletromecânicos e eletromagnéticos:

- Chaves;
- Relés.



Alavanca



Gangorra retangular



Gangorra redonda

Exemplos de chaves eletromecânicas

Fonte: <https://www.shoptime.com.br>

Elementos para acionamento de motores cc

Dispositivos eletromecânicos e eletromagnéticos:

- Chaves;
- Relés.



Relé com contatos simples



Relé com contatos duplos



Contator para corrente contínua

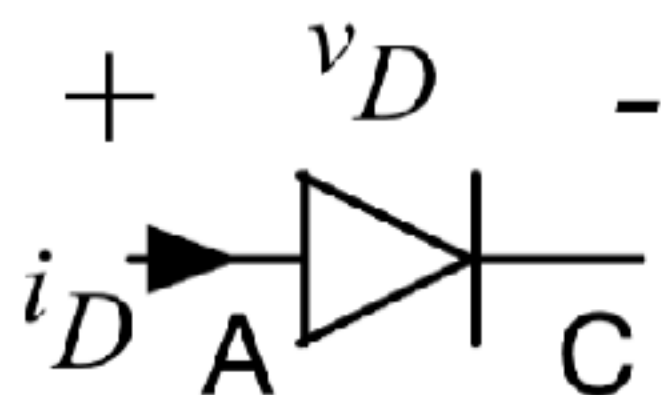
Exemplos de relés eletromagnéticos

Fonte: <https://www.shoptime.com.br>

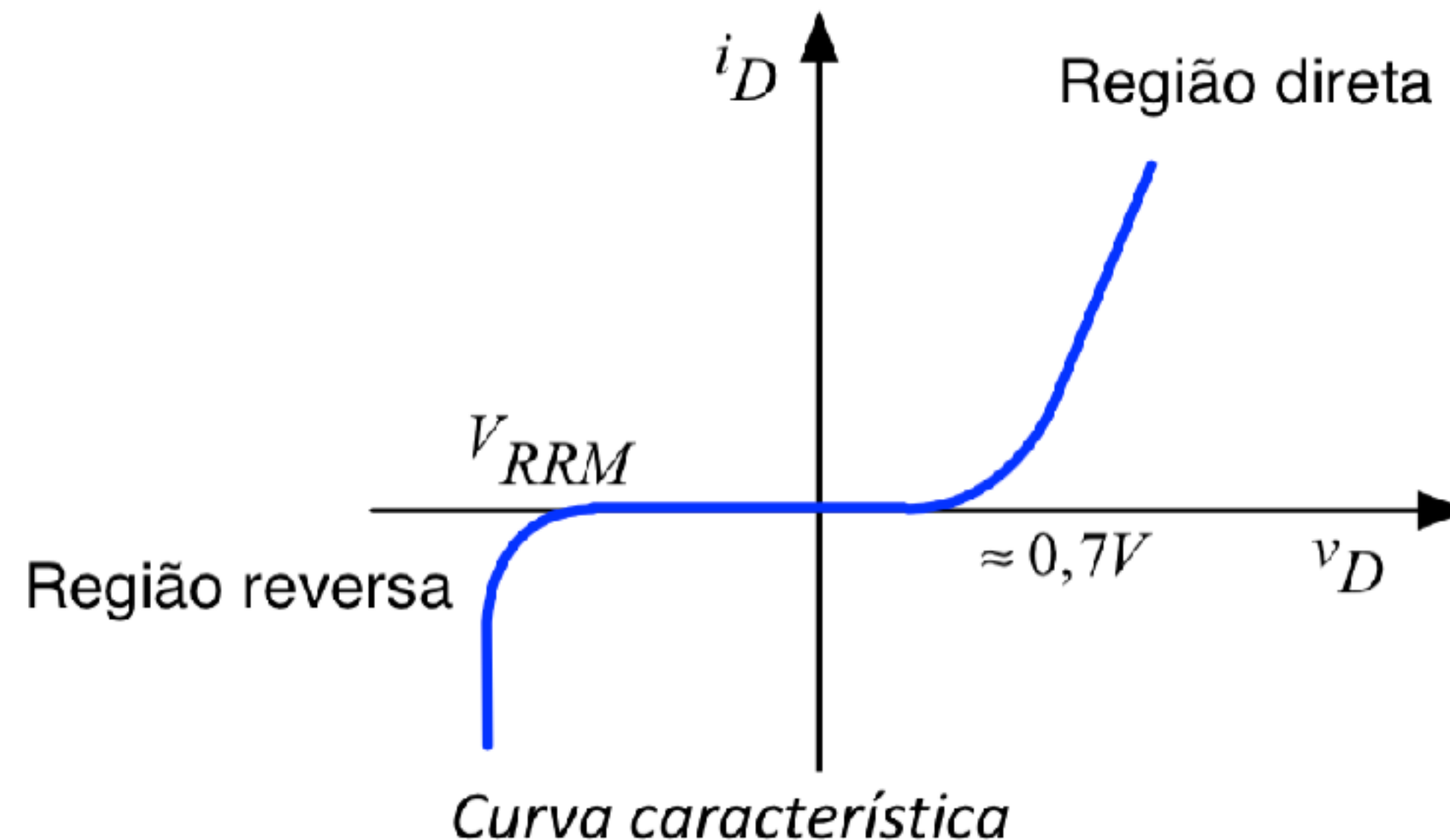
Elementos para acionamento de motores cc

Diodo semiconductor:

- Os diodos semicondutores são componentes não-lineares construídos a partir da junção de materiais do tipo p (falta de elétrons) e n (excesso de elétrons);
- Na região direta o diodo entra em condução quando a tensão direta for da ordem de 0,7 V. Já na região reversa o diodo não deve entrar em condução, a não ser que seja atingida a tensão reversa máxima (VRRM). Ao entrar em condução na região reversa, o diodo pode ser danificado por excesso de calor.



Símbolo

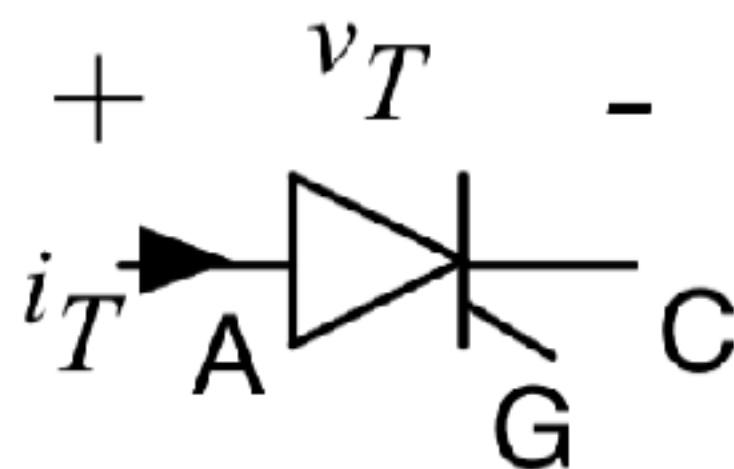


Aspecto típico

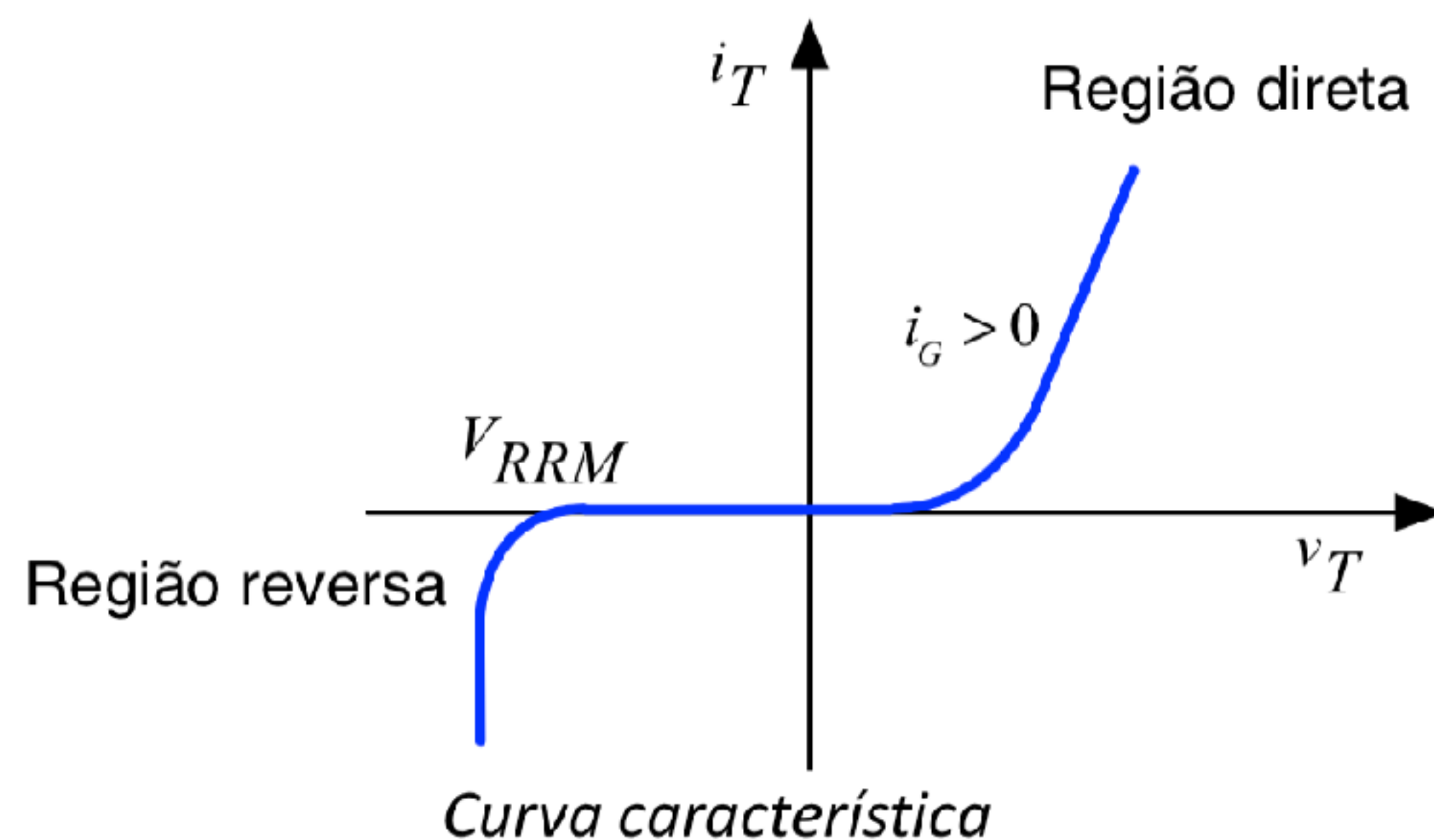
Elementos para acionamento de motores cc

Tiristores:

- SCR - Diodo retificador de silício; é um diodo unidirecional em corrente com terminal de controle (gatilho);
- TRIAC - É um tiristor bidirecional, mas com apenas um terminal de controle, usado em conversores para corrente alternada, pois pode conduzir no semiciclo positivo e negativo da tensão;
- DIAC ou SIDAC - São diodos para corrente alternada, utilizados nos circuitos de disparo de SCRs ou TRIACs.



Símbolo



Aspecto típico

Elementos para acionamento de motores cc

Transistores:

- Corte - É a região em que o transistor não está conduzindo, sua corrente é nula e a tensão sobre o mesmo, em geral, é igual a da fonte de alimentação. Nesta região de operação o transistor não tem perdas, isto é, não processa (dissipa) potência;
- Ativa - É a região de operação em que a corrente de saída varia linearmente com a corrente ou tensão de entrada, por isso é usada para amplificação. Nesta região se tem altas perdas, pois a potência no transistor é o produto da corrente pela queda de tensão no mesmo;
- Saturação - É a região onde o transistor está conduzindo plenamente, com alta corrente. Por outro lado, a queda de tensão é a menor possível, o que implica em perdas menores do que na região ativa.



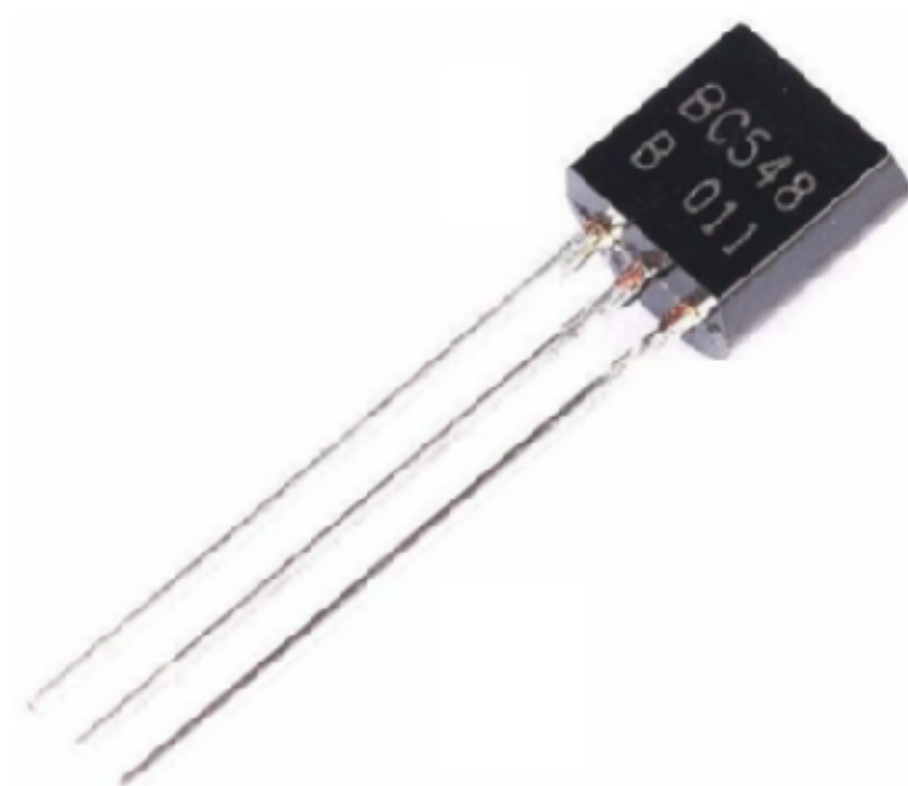
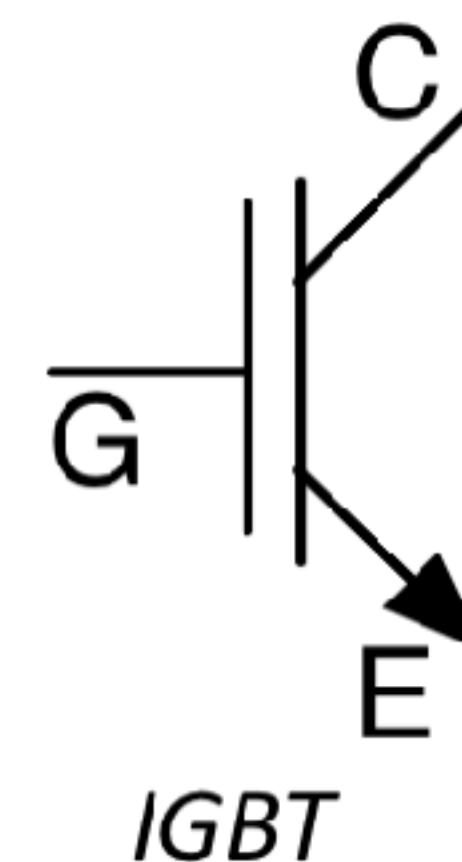
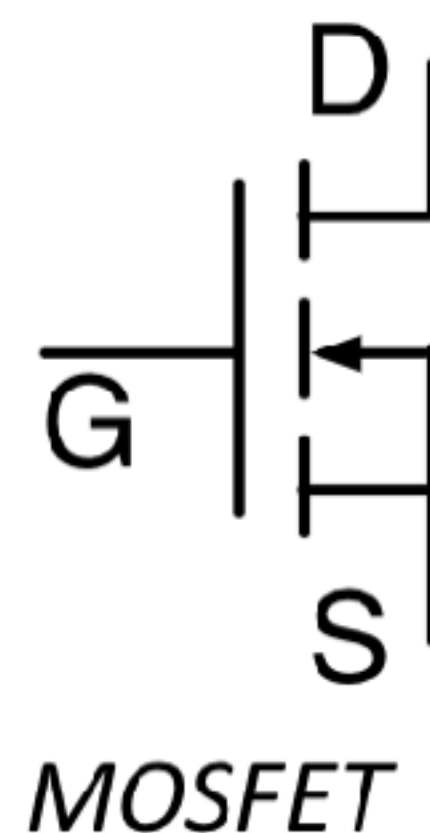
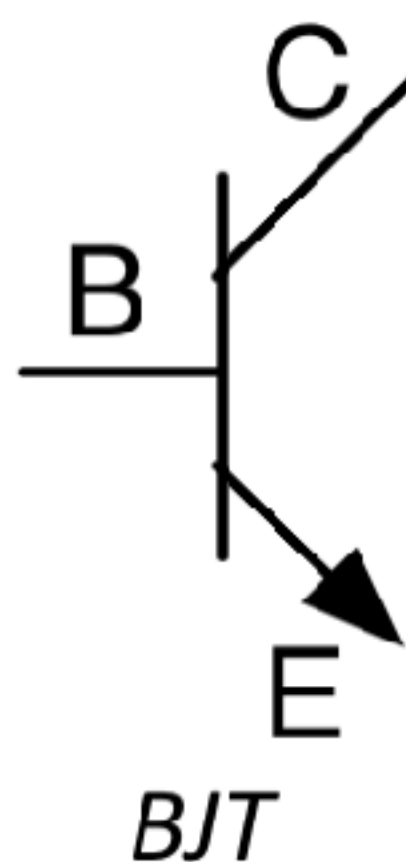
Elementos para acionamento de motores cc

Tecnologias de transistores para acionamentos eletrônicos:

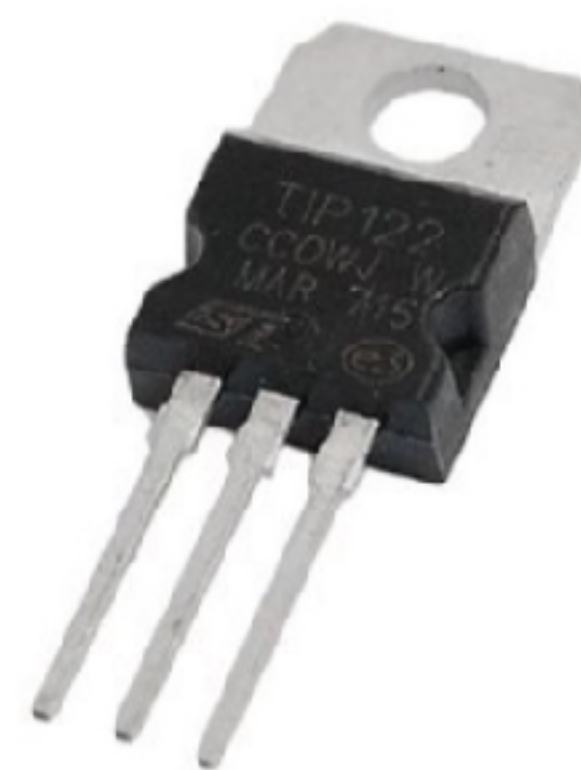
- BJT - Transistor bipolar de junção. São os transistores clássicos do tipo NPN ou PNP, acionados pela corrente de base, isto é, a corrente de coletor depende diretamente (ganho) da corrente na base do transistor;
- MOSFET - São transistores mais rápidos, com diferentes tecnologias de fabricação e que conduzem ou não pela aplicação de uma tensão no gatilho (gate), que por intermédio do campo elétrico, proporcionará a abertura ou fechamento do canal e, portanto, a condução ou não do transistor;
- IGBT - São componentes construídos a partir da tecnologia BJT e MOSFET, incorporando características de ambos. São acionados por tensão como os MOSFETs, mas possuem perdas semelhantes ao BJT.
- Silicon Carbide FET - São transistores de efeito de campo, mas que utilizam a tecnologia de carbeto de silício para diminuir os problemas da recuperação reversa, permitindo a operação com frequências mais altas;
- GaN - Transistores de nitreto de gálio (gallium nitride) que possuem características melhores que os transistores de silício, operando com frequências mais altas e tendo menores perdas, por possuírem resistência interna menor.

Elementos para acionamento de motores cc

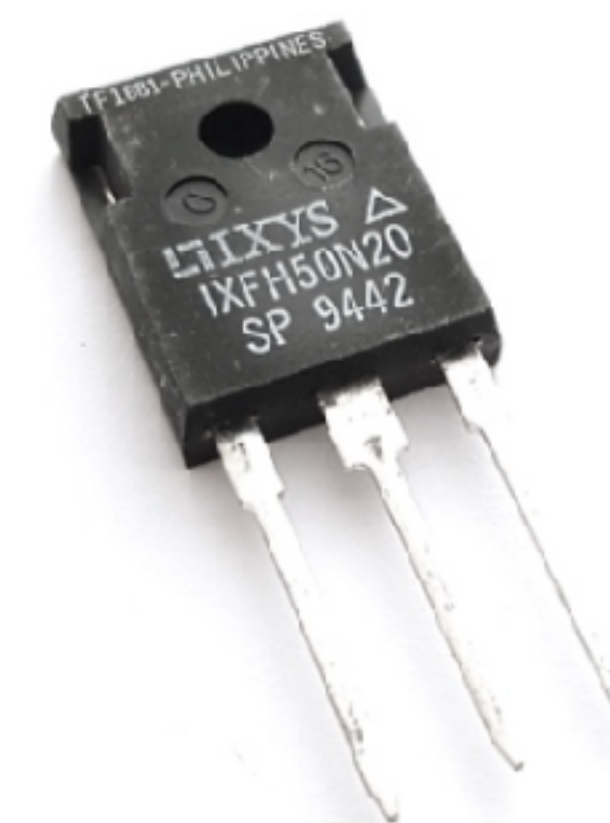
Transistores:



Baixas correntes (100 mA)



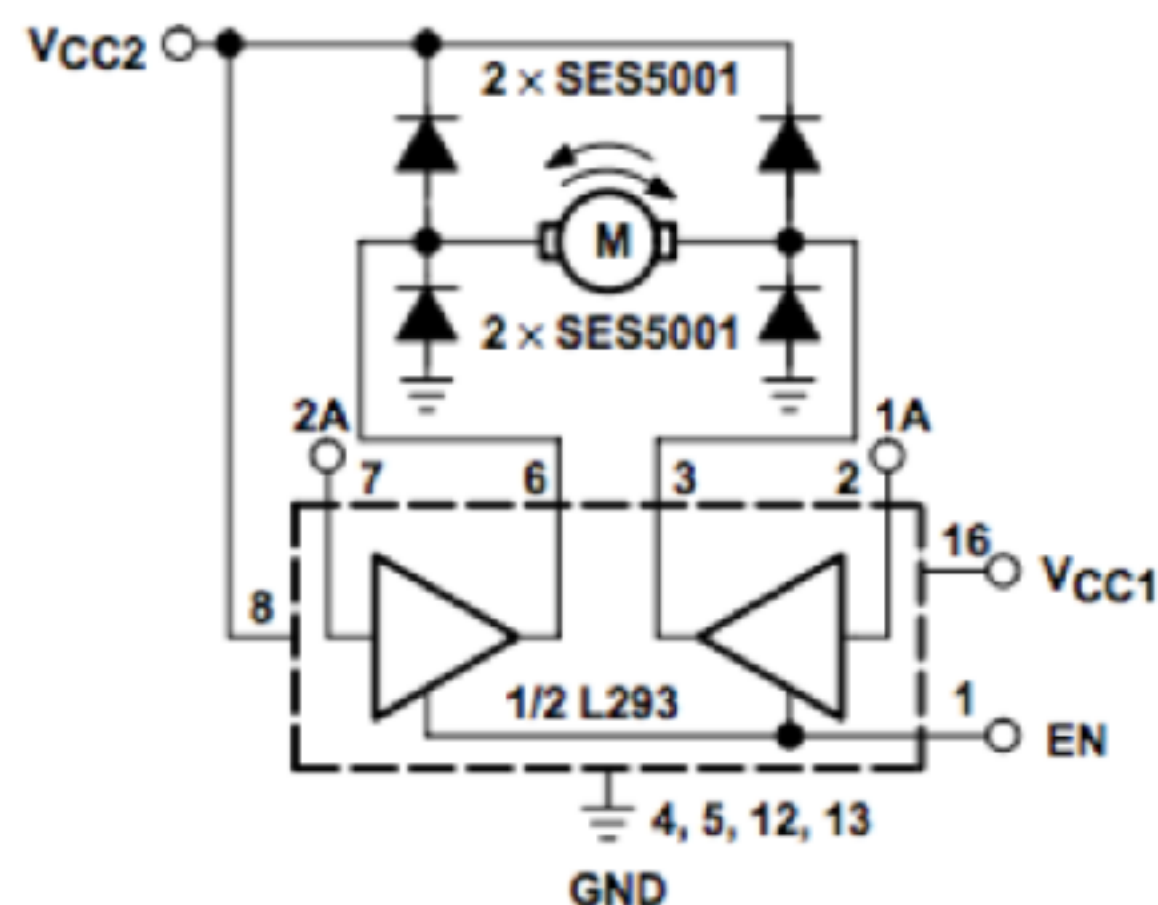
Médias correntes (5 A)



Altas correntes (50 A)

Elementos para acionamento de motores cc

Circuitos integrados:

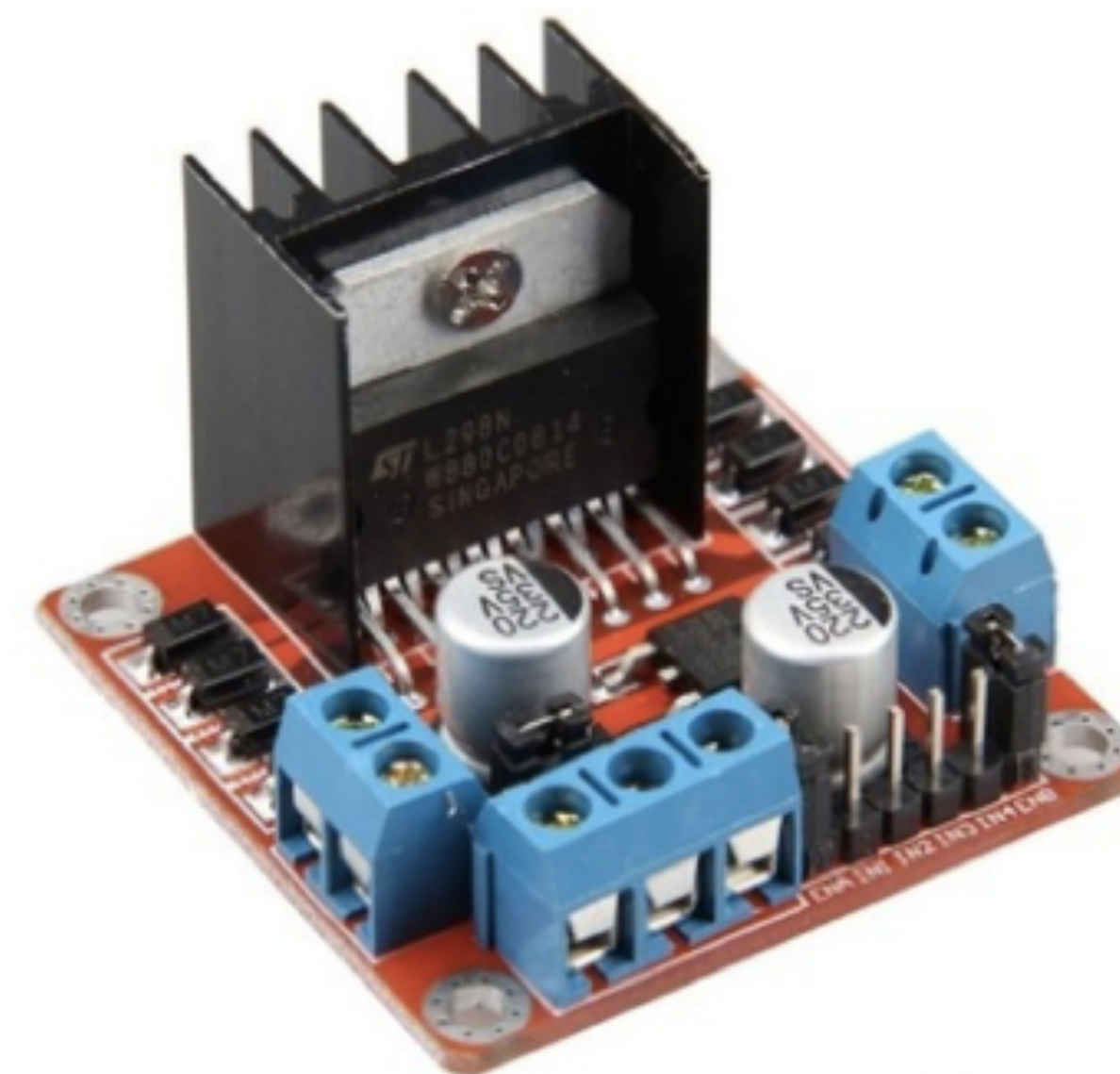


EN	1A	2A	FUNCTION
H	L	H	Turn right
H	H	L	Turn left
H	L	L	Fast motor stop
H	H	H	Fast motor stop
L	X	X	Fast motor stop

L = low, H = high, X = don't care

Conexão interna do L293

Fonte: <http://users.ece.utexas.edu/~valvano/Datasheets/L293d.pdf>



Placa com o L293

Fonte: <https://www.curtocircuito.com.br>

Elementos para acionamento de motores cc

Conversores ca-cc e cc-cc:



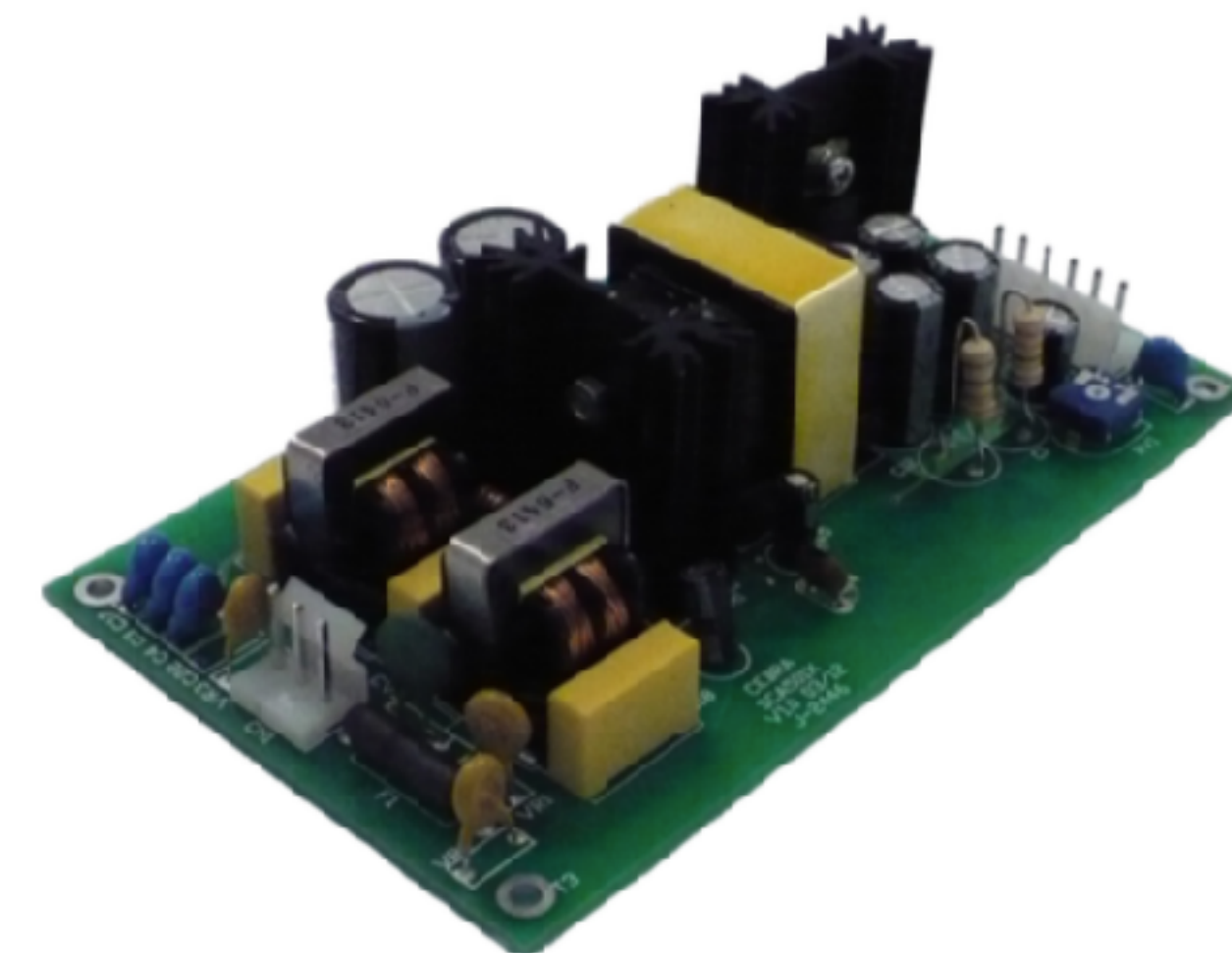
Conversores ca-cc de alta potência

Fonte: <https://www.positronic.com.br>



Drive de acionamento de motor cc

Fonte: <http://jyazbek.com.br>

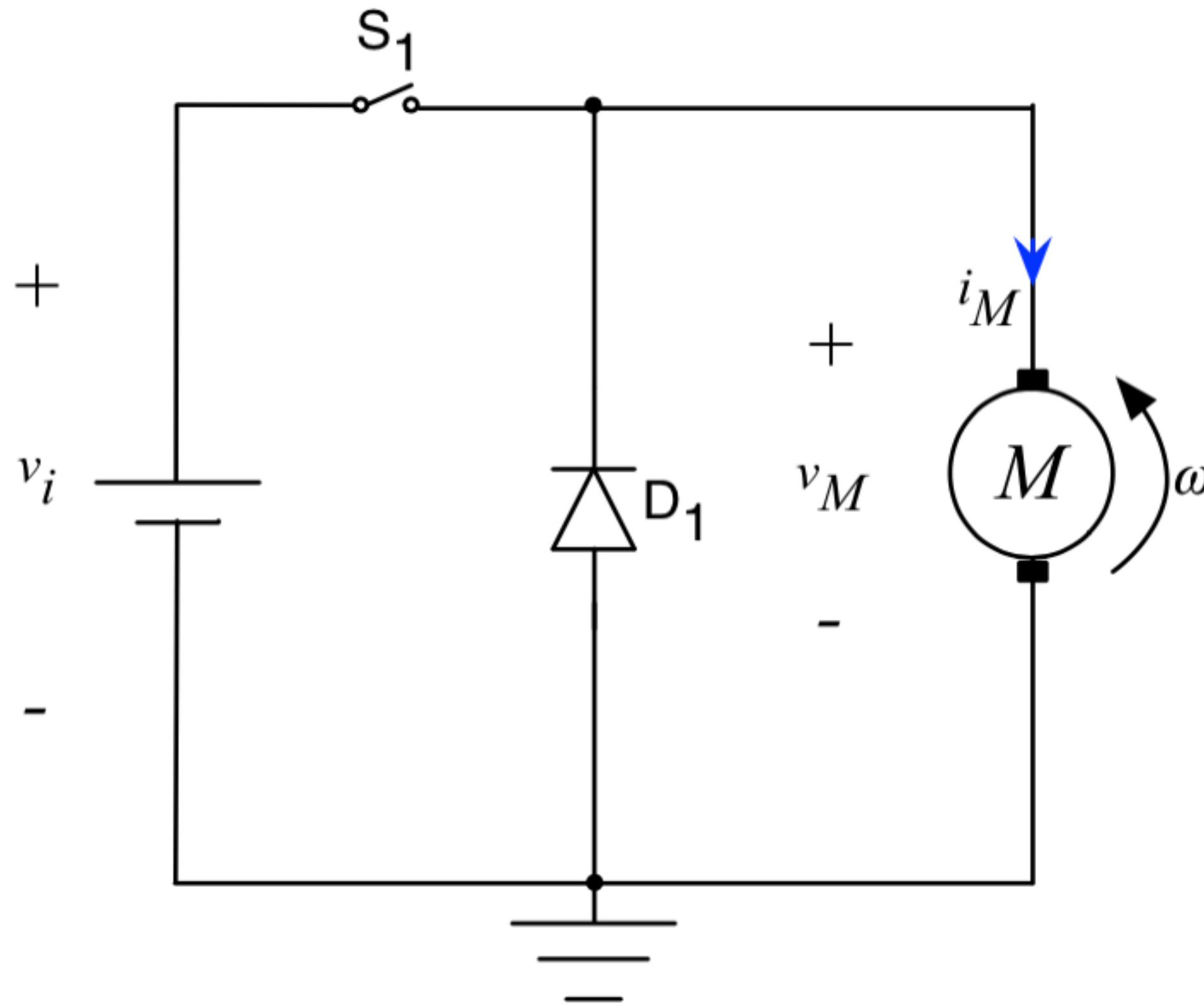


Conversores cc-cc para diferentes aplicações

Fonte: <https://www.cebra.com.br>

Circuitos de acionamento de motores cc

Acionamento com chaves e relés:



Comutação de circuitos indutivos:

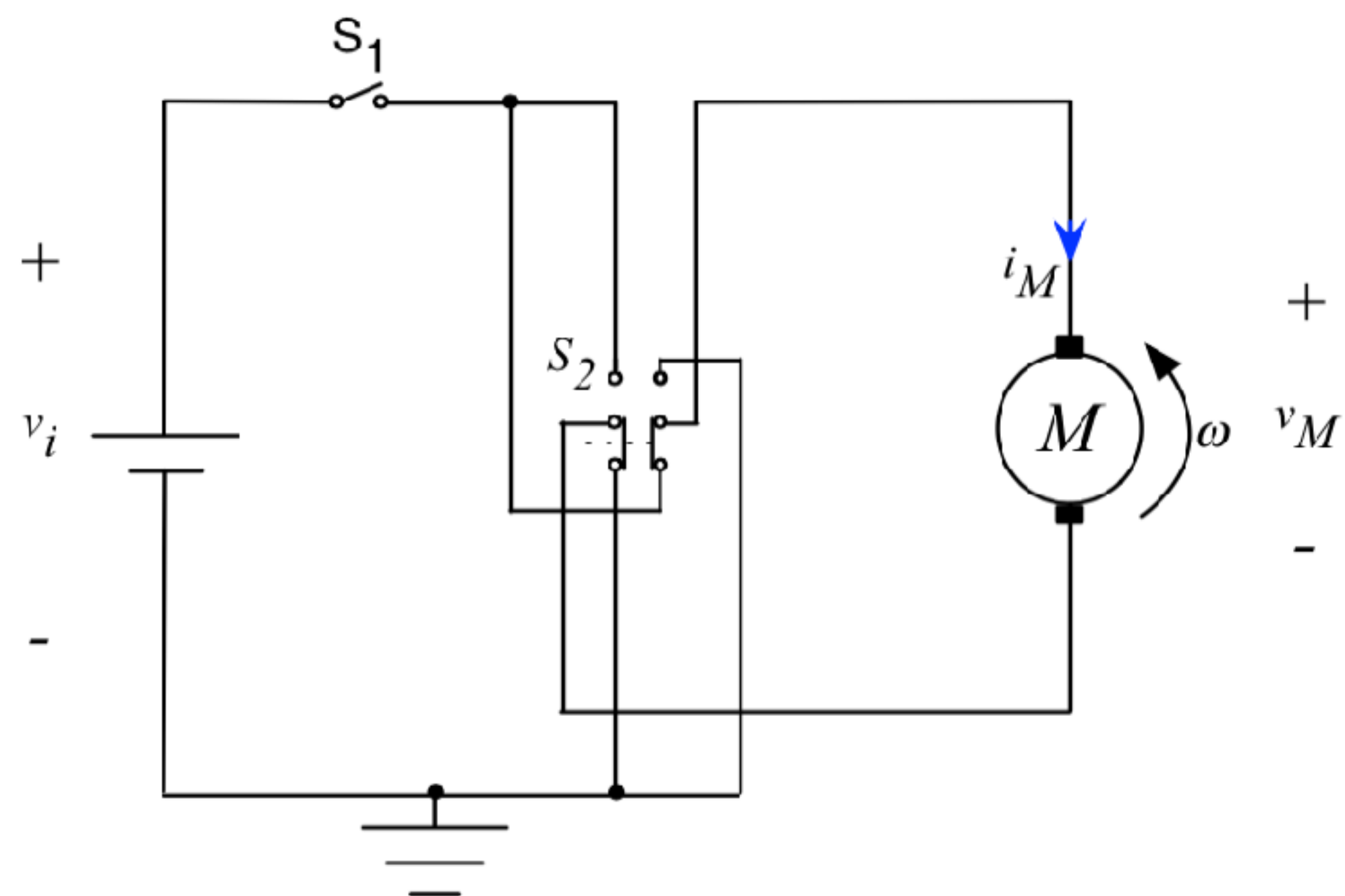
$$v_L(t) = L \cdot \frac{di_L}{dt}$$

$$dt \rightarrow 0$$

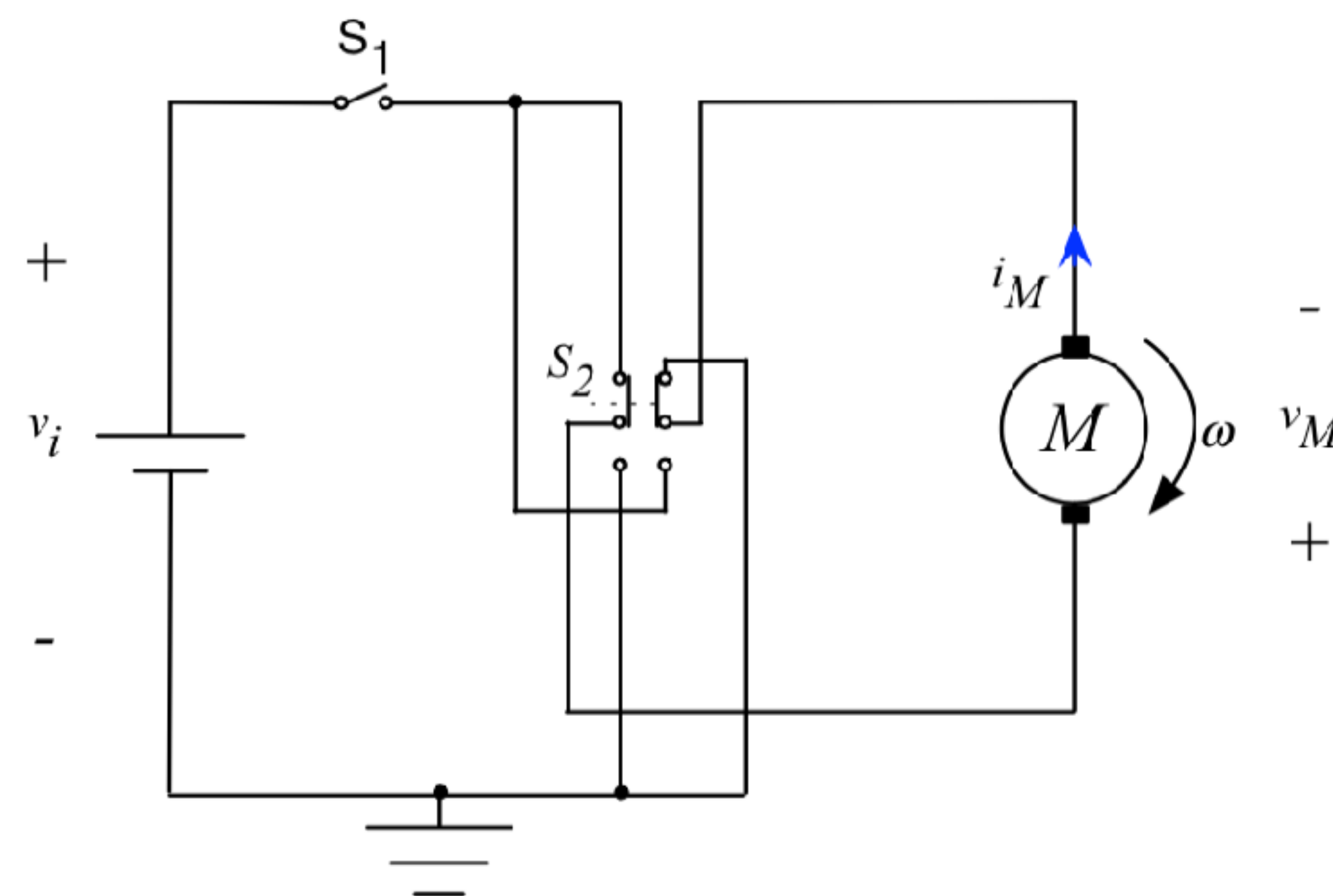
$$v_L(t) \rightarrow \infty$$

Circuitos de acionamento de motores cc

Acionamento com chaves e relés:



Rotação no sentido anti-horário



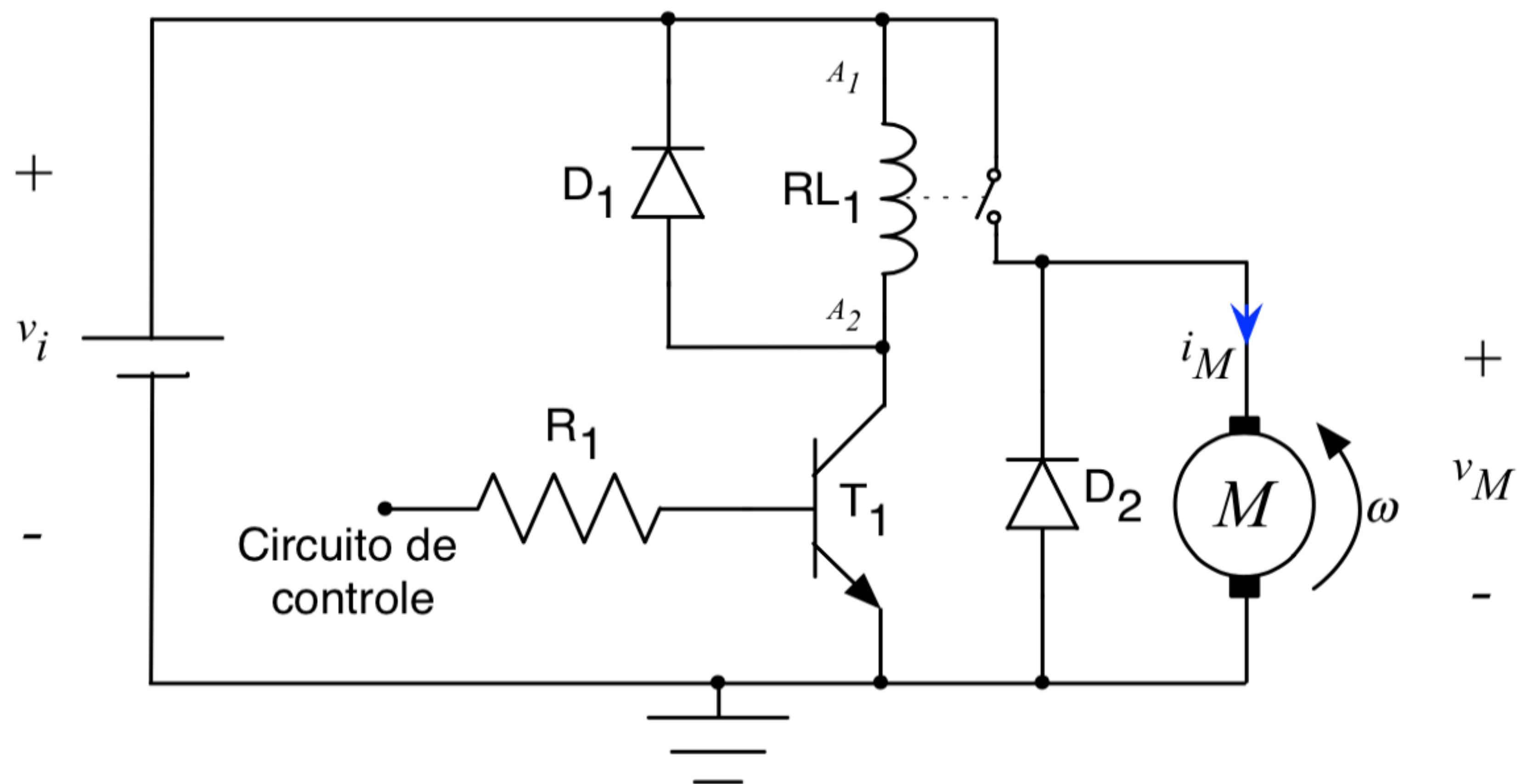
Rotação no sentido horário



Exemplo de chave HH

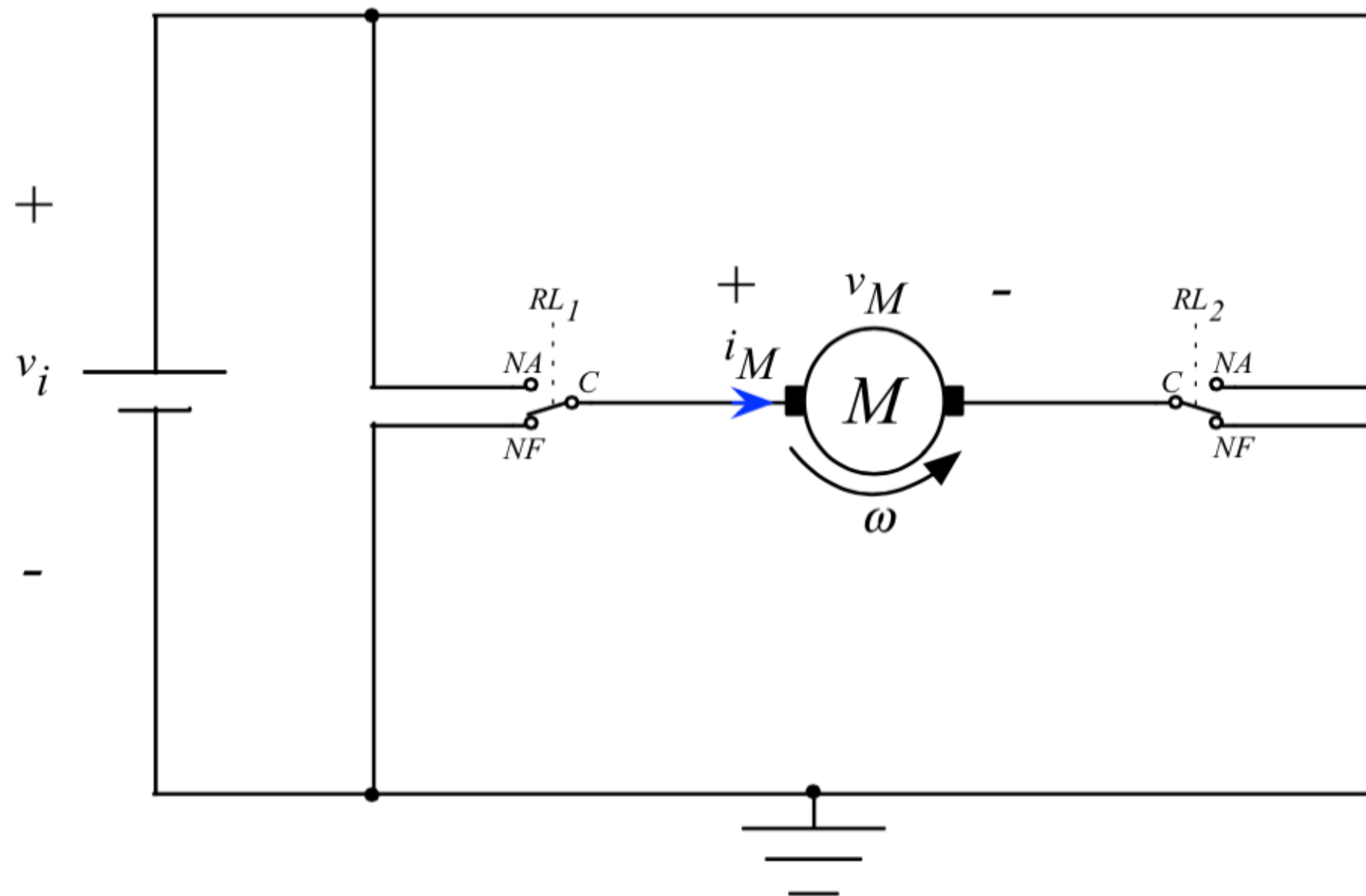
Circuitos de acionamento de motores cc

Acionamento com chaves e relés:



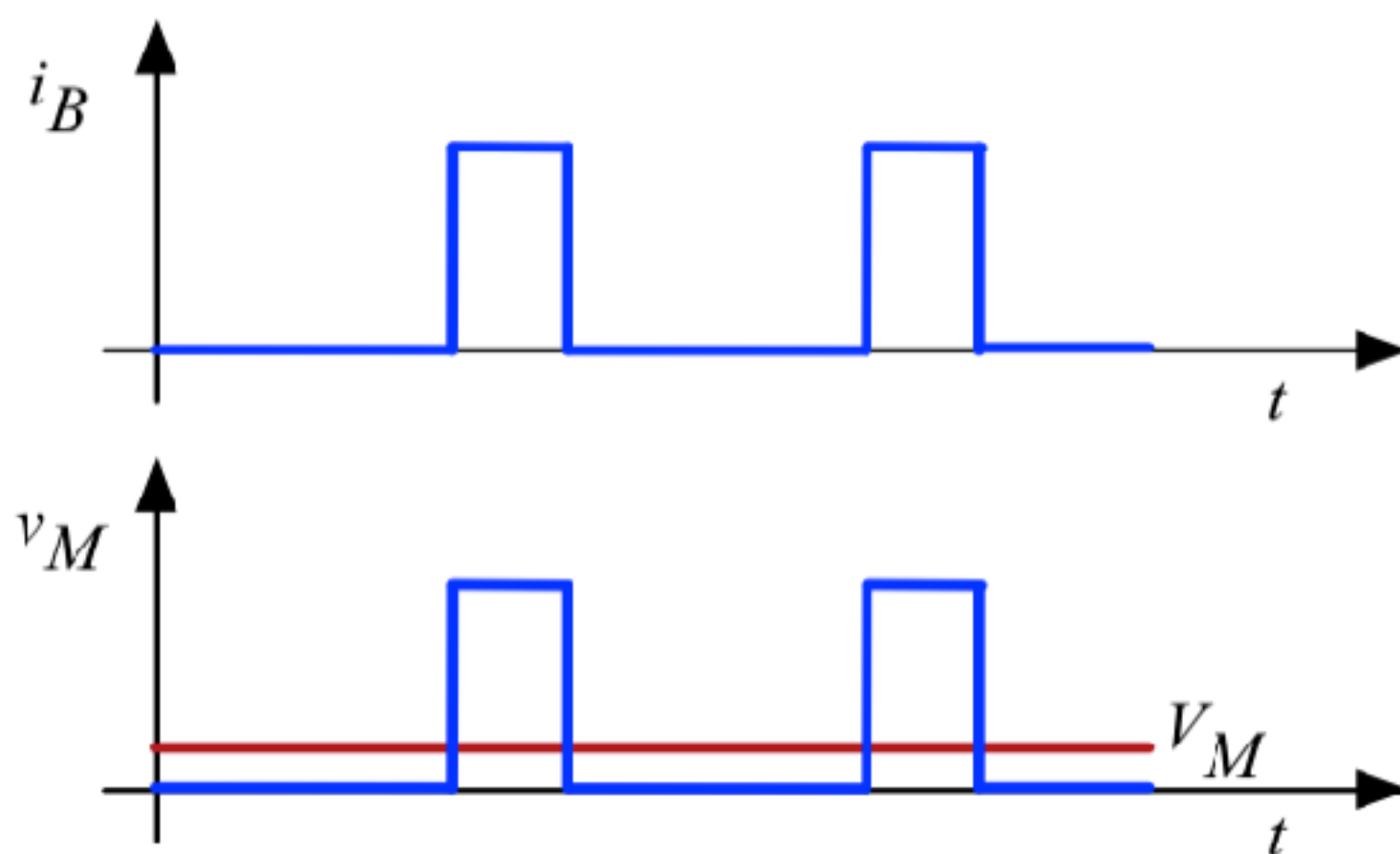
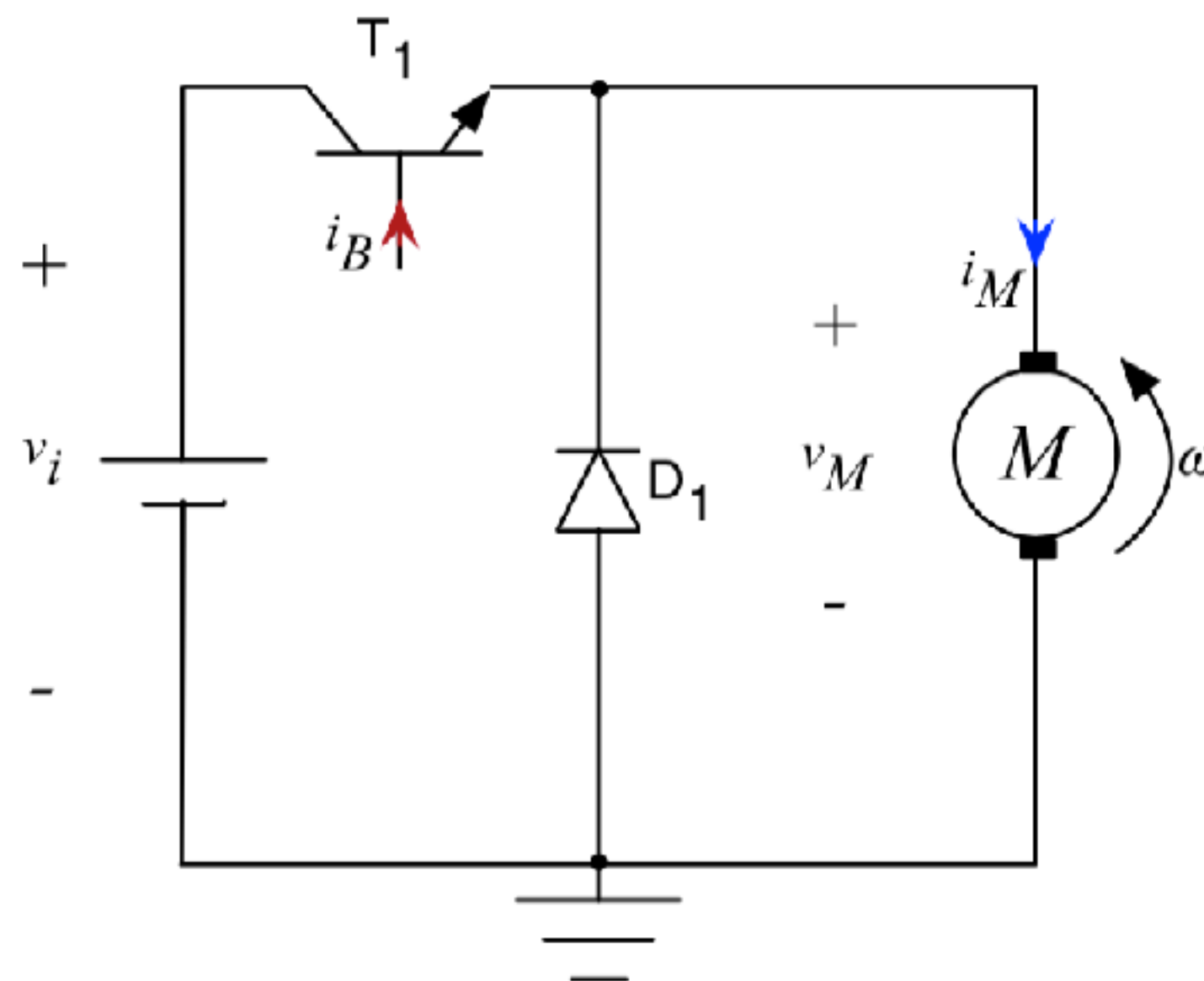
Circuitos de acionamento de motores cc

Acionamento com chaves e relés:

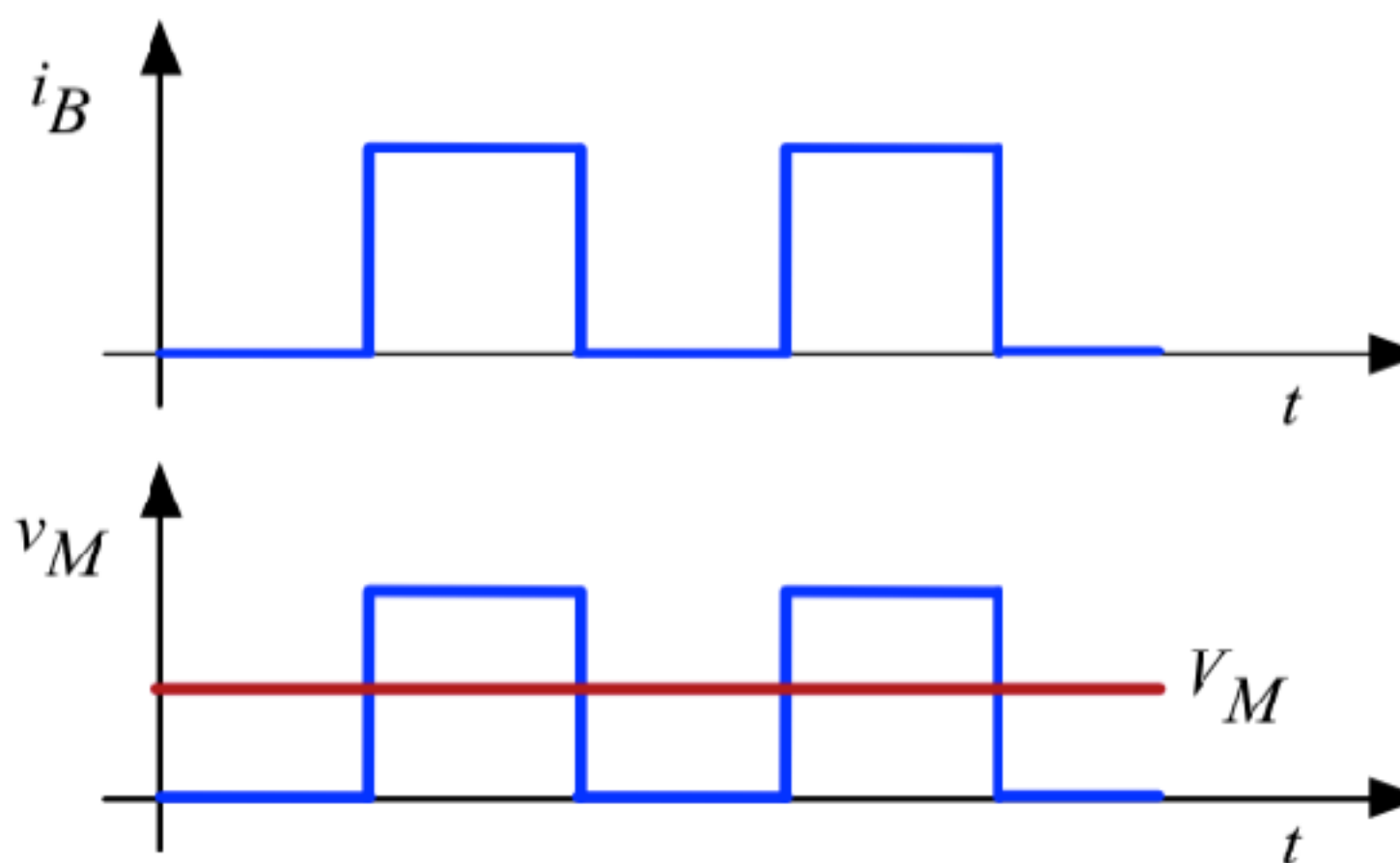


Circuitos de acionamento de motores cc

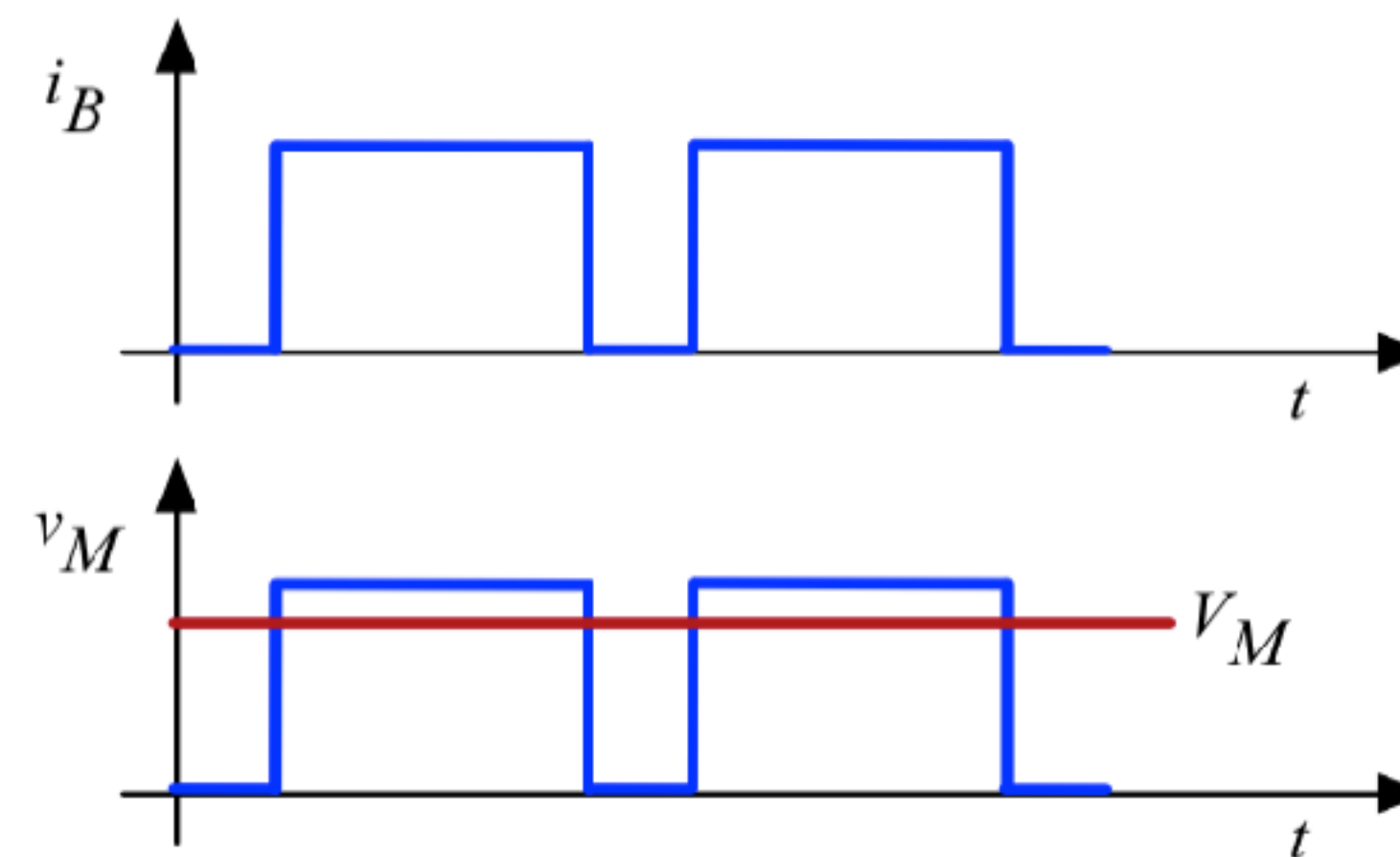
Acionamento com transistores:



$PWM \rightarrow 0$



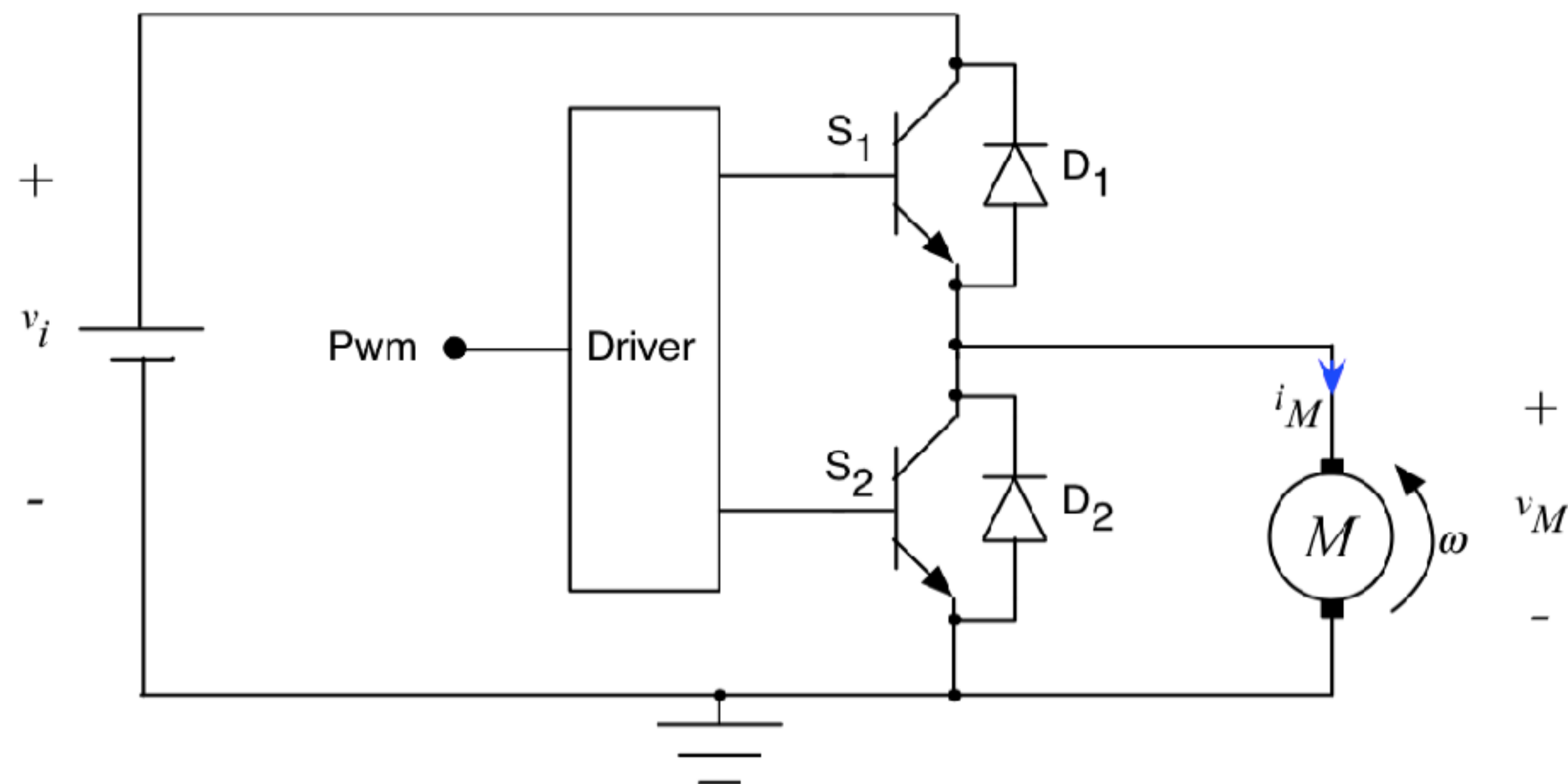
$PWM = 50\%$



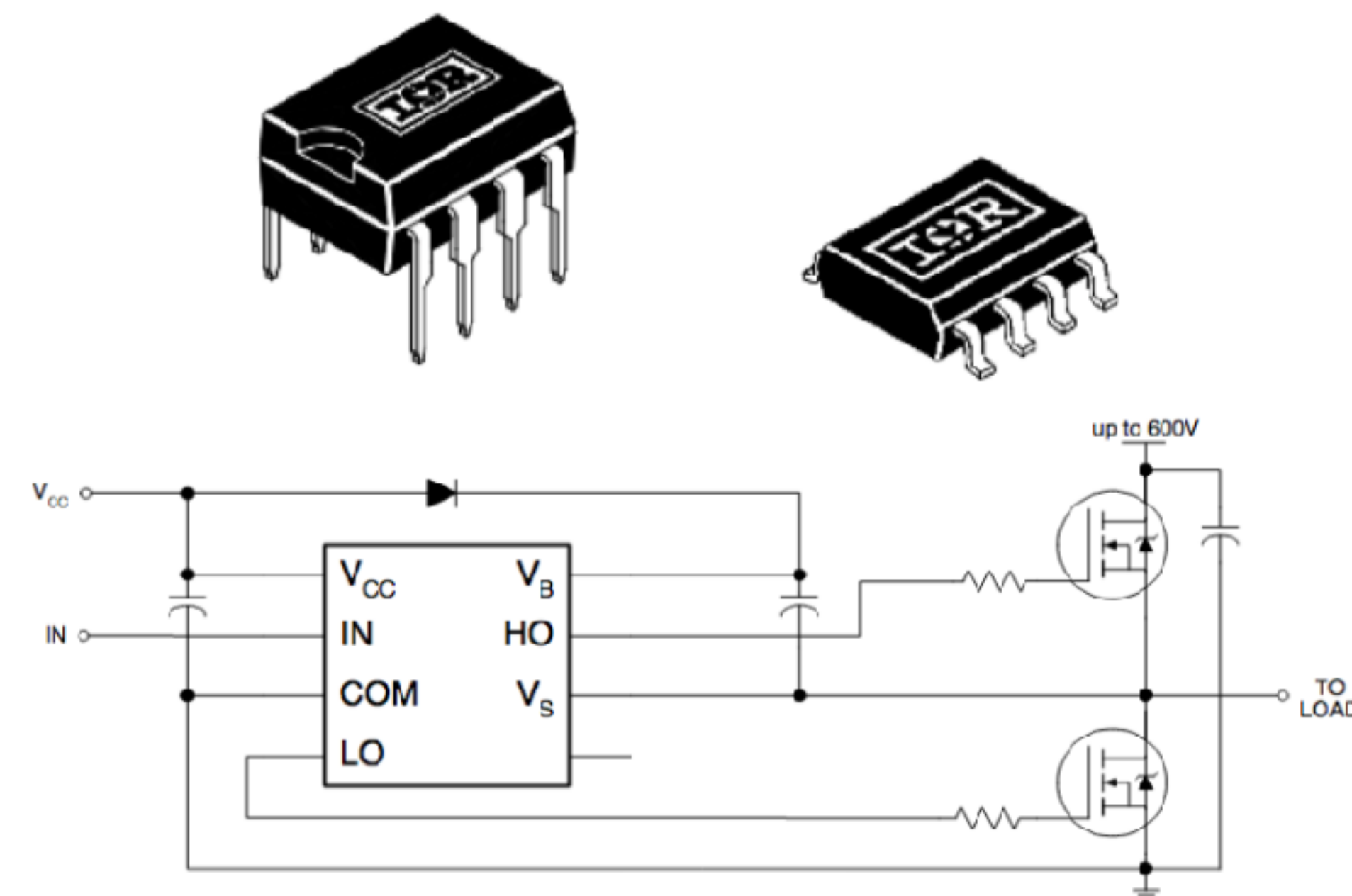
$PWM \rightarrow 100\%$

Circuitos de acionamento de motores cc

Acionamento com transistores:



Circuito de acionamento do motor

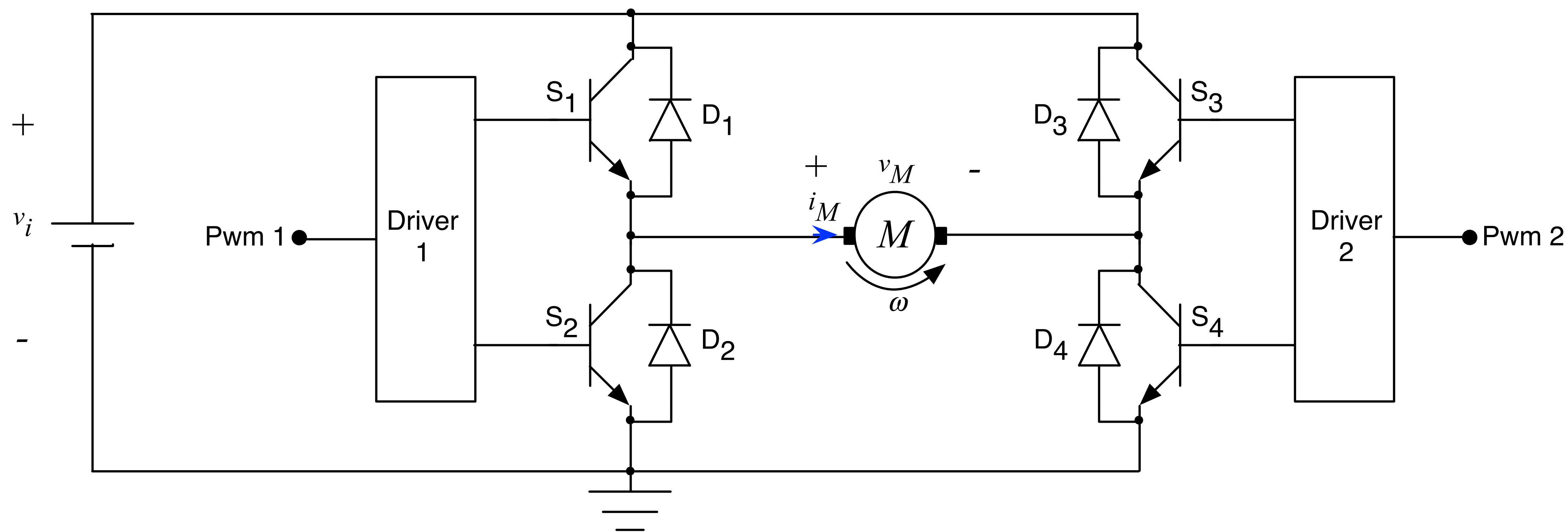


Circuito integrado IRF2111

Fonte: <https://www.infineon.com>

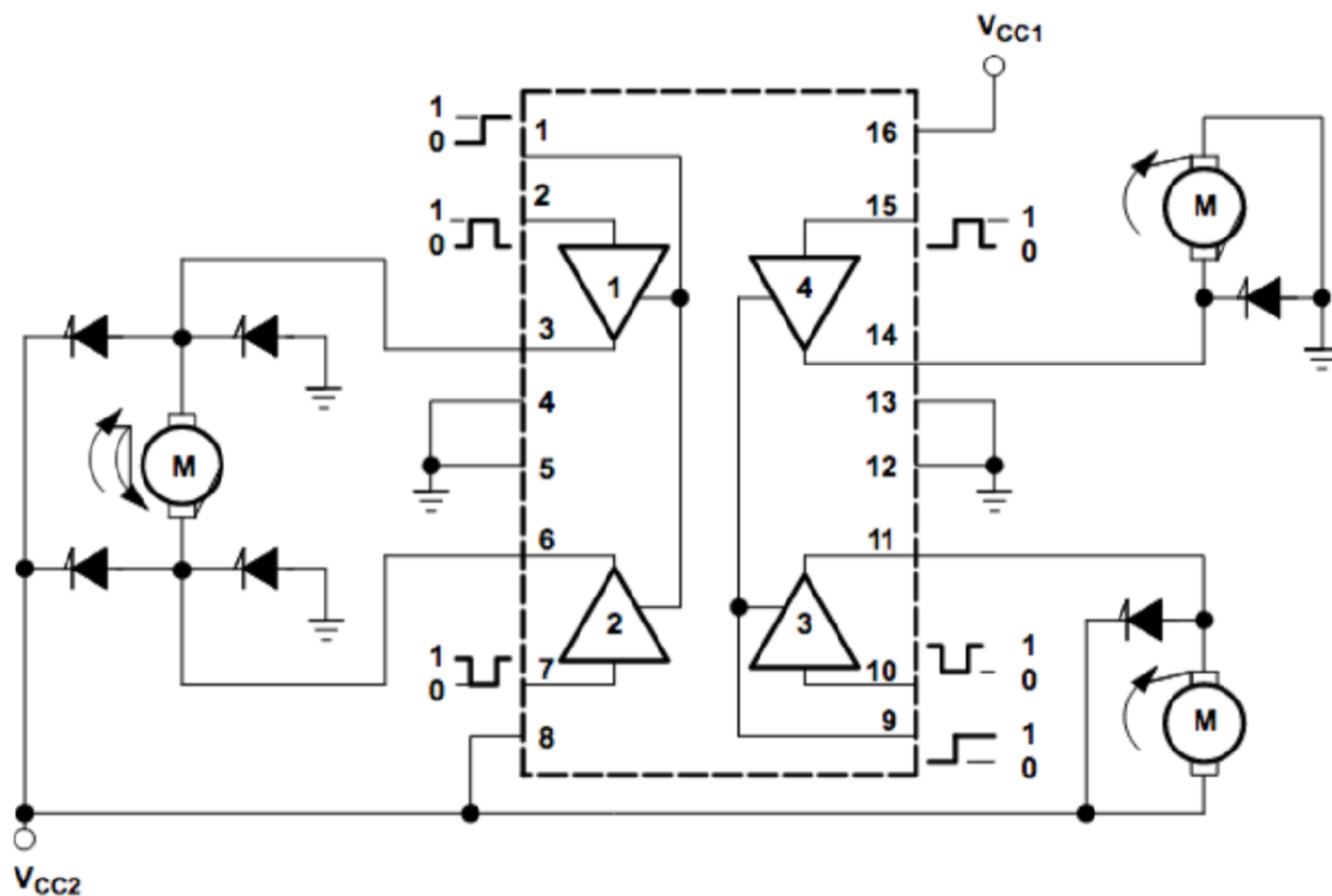
Circuitos de acionamento de motores cc

Acionamento com transistores:

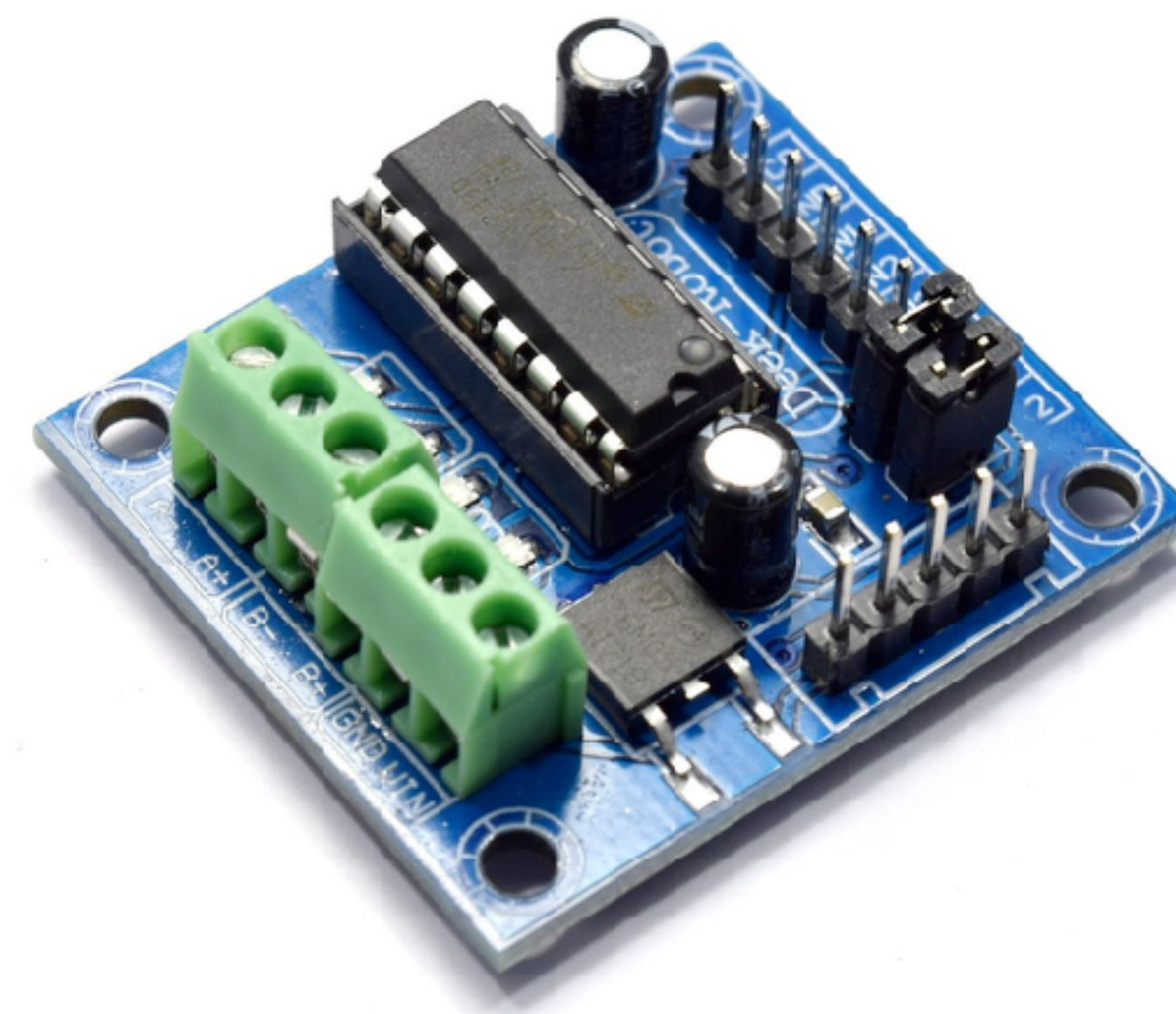


Circuitos de acionamento de motores cc

Acionamento com circuitos integrados:



Fonte: <https://www.ti.com>

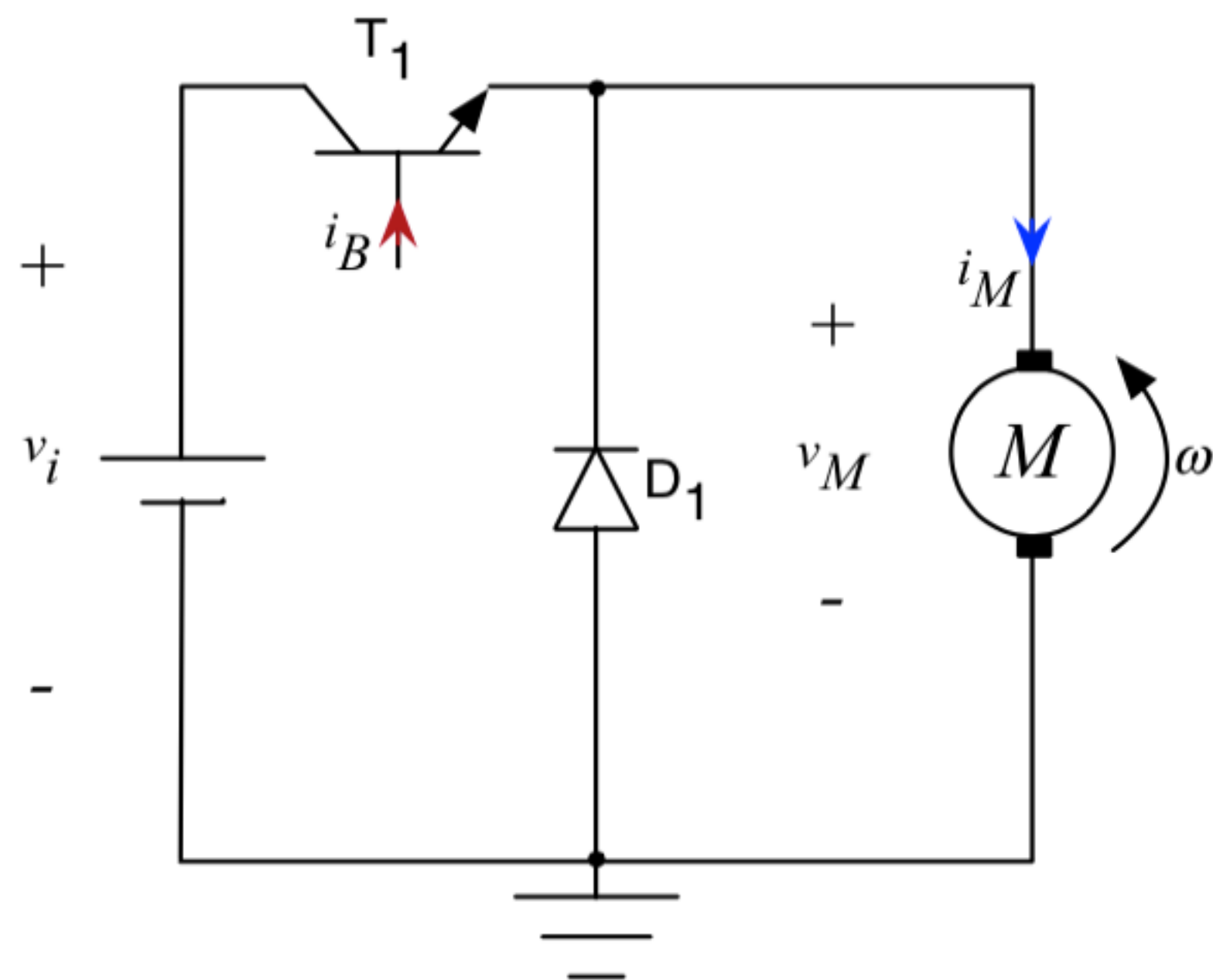


Fonte: <https://www.universal-solder.ca>

Circuitos de acionamento de motores cc

Exemplo de projeto de circuito de acionamento:

- Motor de imã permanente, de 24 V e 30 W;
- Acionamento transistorizado;
- Controle por placas Arduino.



Fonte: <https://www.americanas.com.br>

Circuitos de acionamento de motores cc

Exemplo de projeto de circuito de acionamento:

- Motor de imã permanente, de 24 V e 30 W;
- Acionamento transistorizado;
- Controle por placas Arduino.

Corrente no motor:

$$V_M = 24V$$

$$P_M = 30W$$

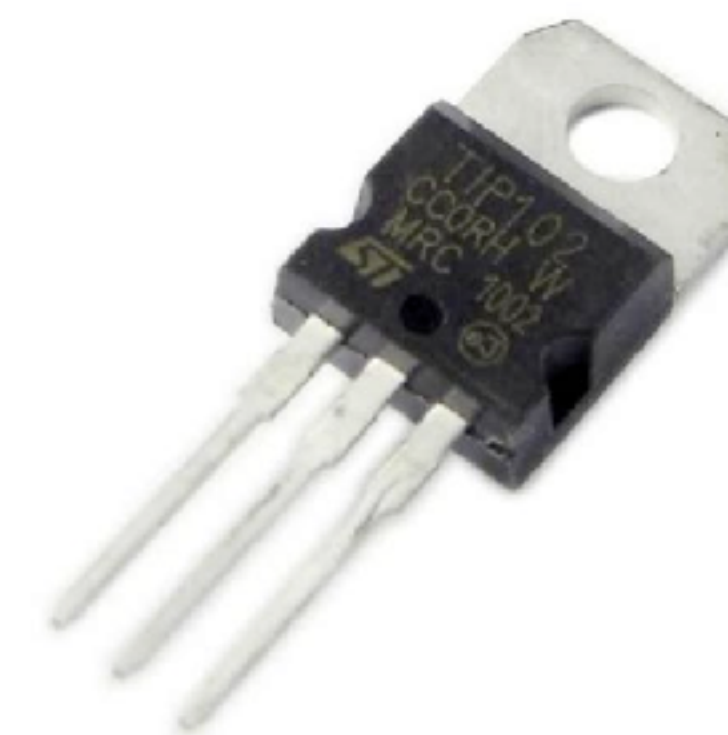
$$I_M = \frac{P_M}{V_M} = \frac{30}{24} = 1,25A$$

Ganho do transistor:

$$\beta \geq \frac{I_C}{I_B} = \frac{I_M}{I_{\mu C}} = \frac{1,25}{40m} = 31,25$$

Transistor escolhido > TIP120

- Tensão de operação – 60 V;
- Corrente de operação – 5 A;
- Ganho – 1000;
- Tensão de coletor-emissor de saturação – 2 V;
- Temperatura máxima – 150 °C;
- Resistência térmica entre junção e cápsula – 1,92 °C/W;
- Resistência térmica entre junção e ambiente – 62,5 °C/W.



Circuitos de acionamento de motores cc

Exemplo de projeto de circuito de acionamento:

- Motor de imã permanente, de 24 V e 30 W;
- Acionamento transistorizado;
- Controle por placas Arduino.

Corrente no motor:

$$V_M = 24V$$

$$P_M = 30W$$

$$I_M = \frac{P_M}{V_M} = \frac{30}{24} = 1,25A$$

Ganho do transistor:

$$\beta \geq \frac{I_C}{I_B} = \frac{I_M}{I_{\mu C}} = \frac{1,25}{40m} = 31,25$$

Diodo escolhido > FR151

- Tensão de operação – 50 V;
- Corrente de operação – 1,5 A;
- Tensão direta – 1,3 V;
- Temperatura máxima – 150 °C;
- Resistência térmica aproximada entre junção e ambiente – 60 °C/W.



Circuitos de acionamento de motores cc

Exemplo de projeto de circuito de acionamento:

- Motor de imã permanente, de 24 V e 30 W;
- Acionamento transistorizado;
- Controle por placas Arduino.

Resistor de base:

$$R_B = \frac{V_{\mu C} - V_{BE}}{I_B} = \frac{5 - 0,7}{40m} = 107,5\Omega$$

$$R_B = 1k\Omega \rightarrow I_B = \frac{5 - 0,7}{1k} = 4,3mA$$

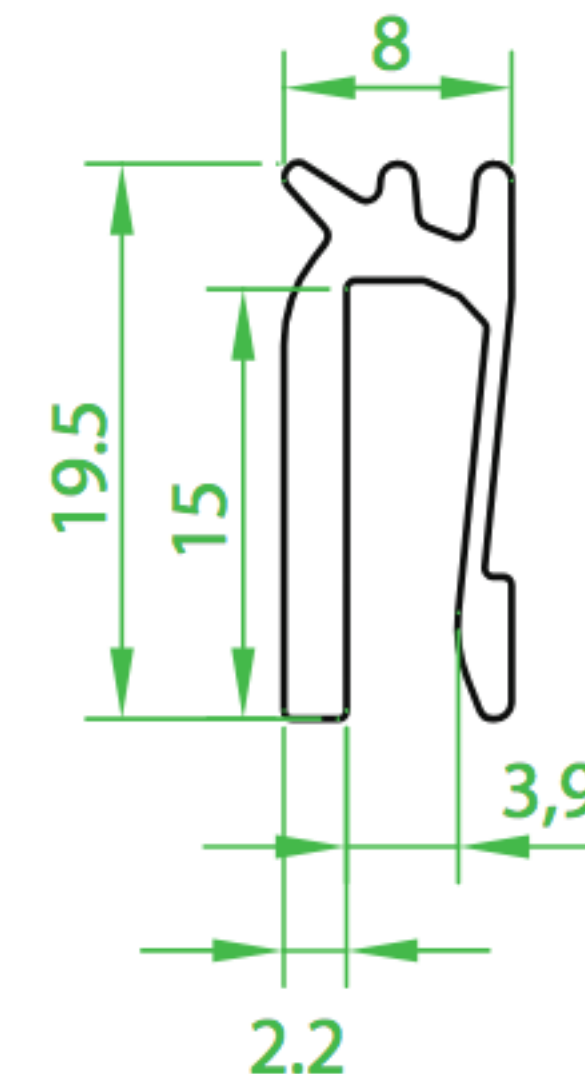
Perdas no transistor:

$$P_{T1} = V_{CE(sat)} \cdot I_C = 2 \cdot 1,25 = 2,5W$$

$$T_{j_T1} = T_a + R_{ja_T1} \cdot P_{T1} = 35 + 62,5 \cdot 2,5 = 191,5^\circ C$$

$$R_{ja_T1} = \frac{T_{j_T1} - T_a}{P_{T1}} = \frac{150 - 35}{2,5} = 46^\circ C / W$$

$$R_{da_T1} = R_{ja_T1} - R_{jc_T1} - R_{cd_T1} = 46 - 1,92 - 1 = 43,08^\circ C / W$$



Circuitos de acionamento de motores cc

Exemplo de projeto de circuito de acionamento:

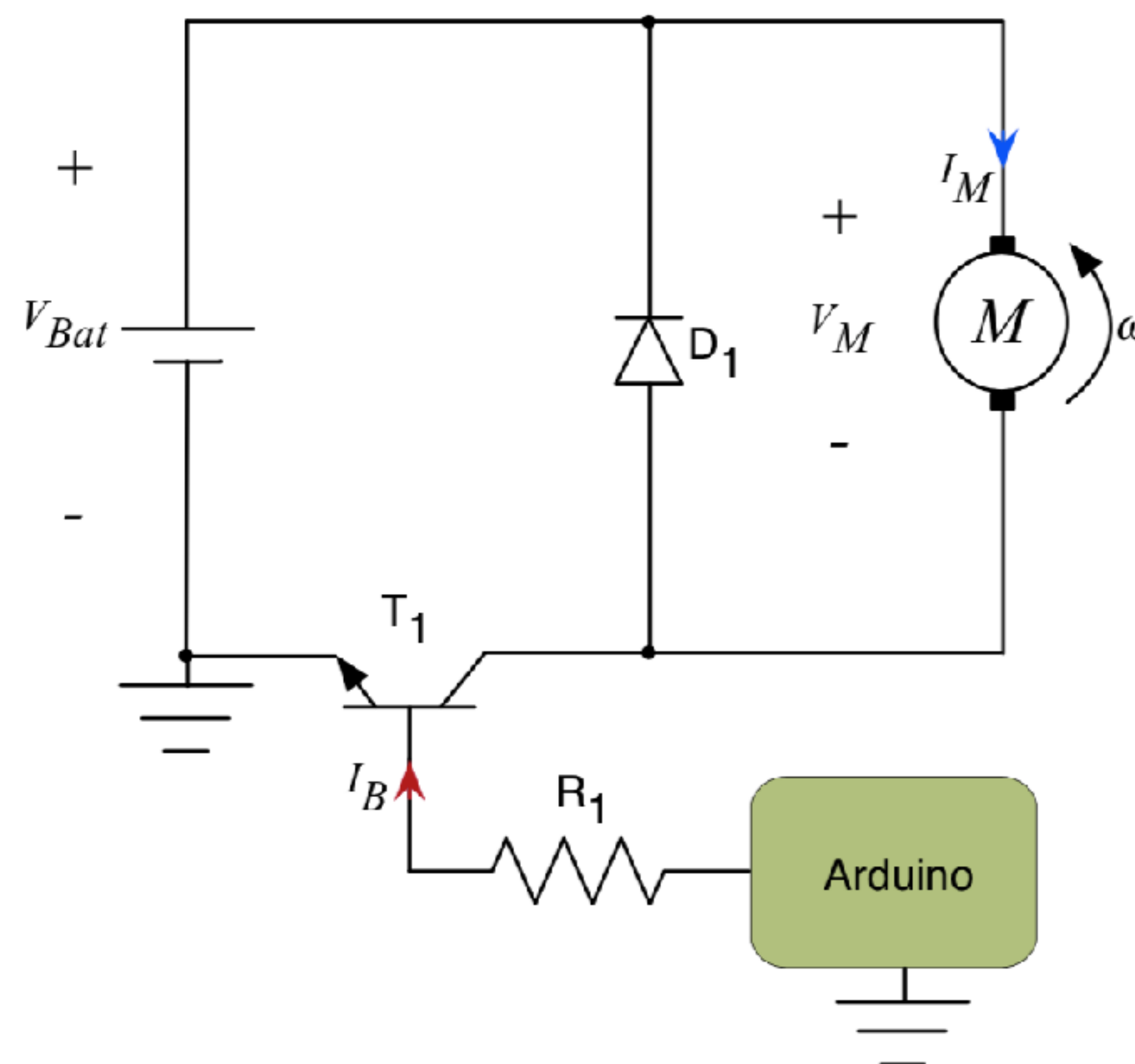
- Motor de imã permanente, de 24 V e 30 W;
- Acionamento transistorizado;
- Controle por placas Arduino.

Perdas no diodo:

$$P_{D1} = V_{D1} \cdot I_{D1} = 1,3 \cdot 1,25 = 1,625 W$$

$$T_{j_D1} = T_a + R_{ja_D1} \cdot P_{D1} = 35 + 60 \cdot 1,625 = 132,5^\circ C$$

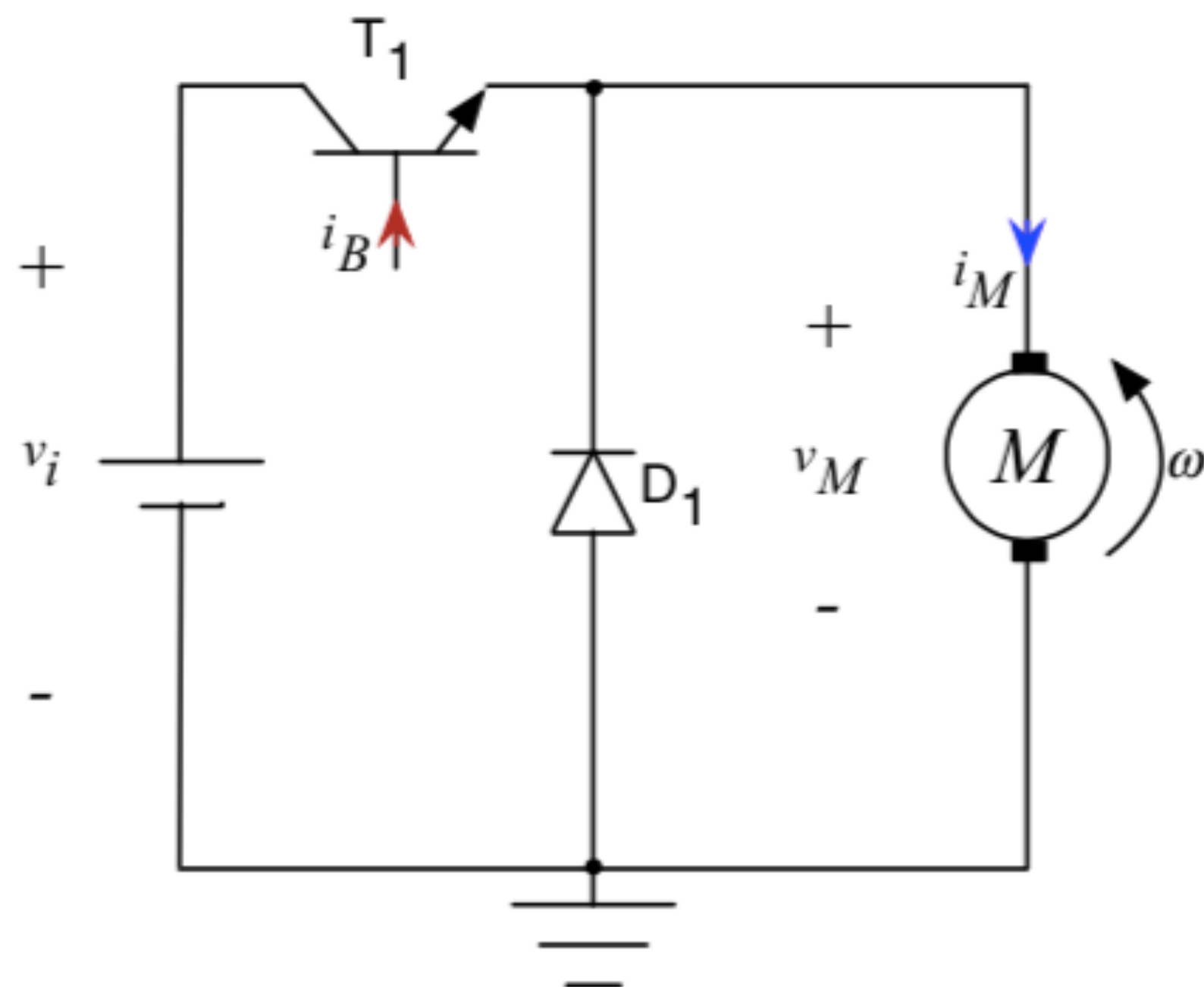
Não precisa dissipador!



Circuitos de acionamento de motores cc

Exemplo de projeto de circuito de acionamento:

- Motor de 3000 RPM, de 24 V e 500 W;
- Acionamento transistorizado;
- Controle por placas Arduino.



Fonte: <https://www.mercadolivre.com.br>

Circuitos de acionamento de motores cc

Exemplo de projeto de circuito de acionamento:

- Motor de 3000 RPM, de 24 V e 500 W;
- Acionamento transistorizado;
- Controle por placas Arduino.

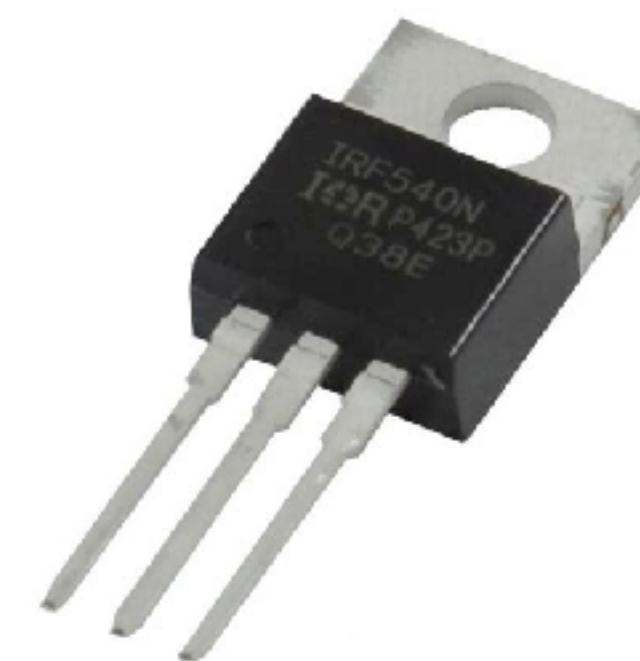
Corrente no motor:

$$V_M = 24V$$

$$P_M = 500W$$

$$I_M = \frac{P_M}{V_M} = \frac{500}{24} = 20,8A$$

Transistor escolhido > IRF540



- Tensão de operação – 100 V;
- Corrente de operação – 20 A para $T_c = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e 28 A para $T_c = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Resistência entre dreno e fonte – 77 m Ω ;
- Tensão máxima entre gatilho e fonte – 20 V;
- Temperatura máxima – 175 $^{\circ}\text{C}$;
- Resistência térmica entre junção e cápsula – 1 $^{\circ}\text{C/W}$;
- Resistência térmica entre junção e ambiente – 62 $^{\circ}\text{C/W}$.

Circuitos de acionamento de motores cc

Exemplo de projeto de circuito de acionamento:

- Motor de 3000 RPM, de 24 V e 500 W;
- Acionamento transistorizado;
- Controle por placas Arduino.

Corrente no motor:

$$V_M = 24V$$

$$P_M = 500W$$

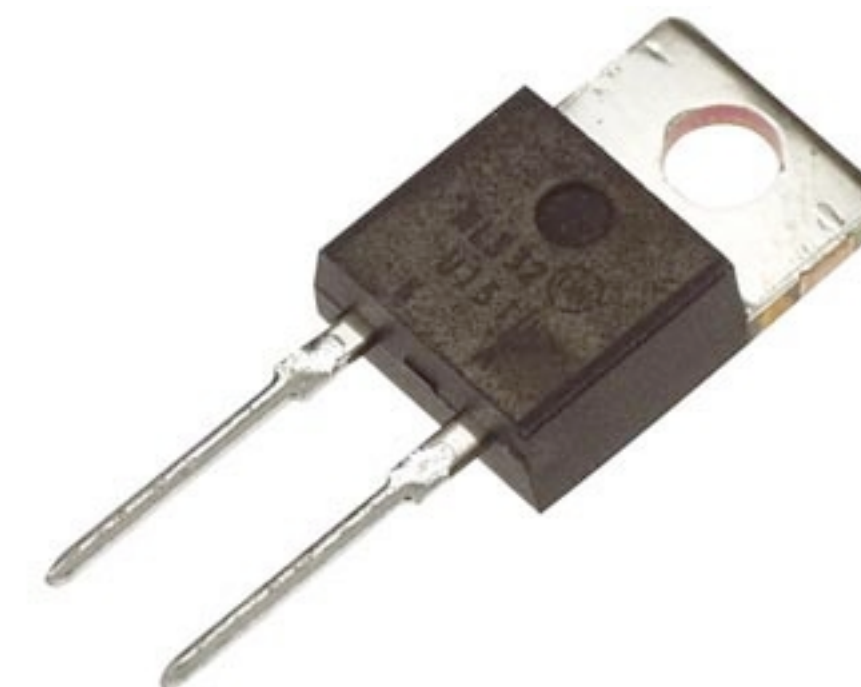
$$I_M = \frac{P_M}{V_M} = \frac{500}{24} = 20,8A$$

Resistor de gatilho:

$$R_G = \frac{V_{aux}}{I_C} = \frac{15}{0,8} = 18,75\Omega$$

Diodo escolhido > MUR1510 (2x)

- Tensão de operação – 100 V;
- Corrente de operação – 15 A;
- Tensão direta – 1,05 V;
- Temperatura máxima – 175 °C;
- Resistência térmica entre junção e cápsula – 1,5 °C/W;
- Resistência térmica entre junção e ambiente – 73 °C/W.



Circuitos de acionamento de motores cc

Exemplo de projeto de circuito de acionamento:

- Motor de 3000 RPM, de 24 V e 500 W;
- Acionamento transistorizado;
- Controle por placas Arduino.

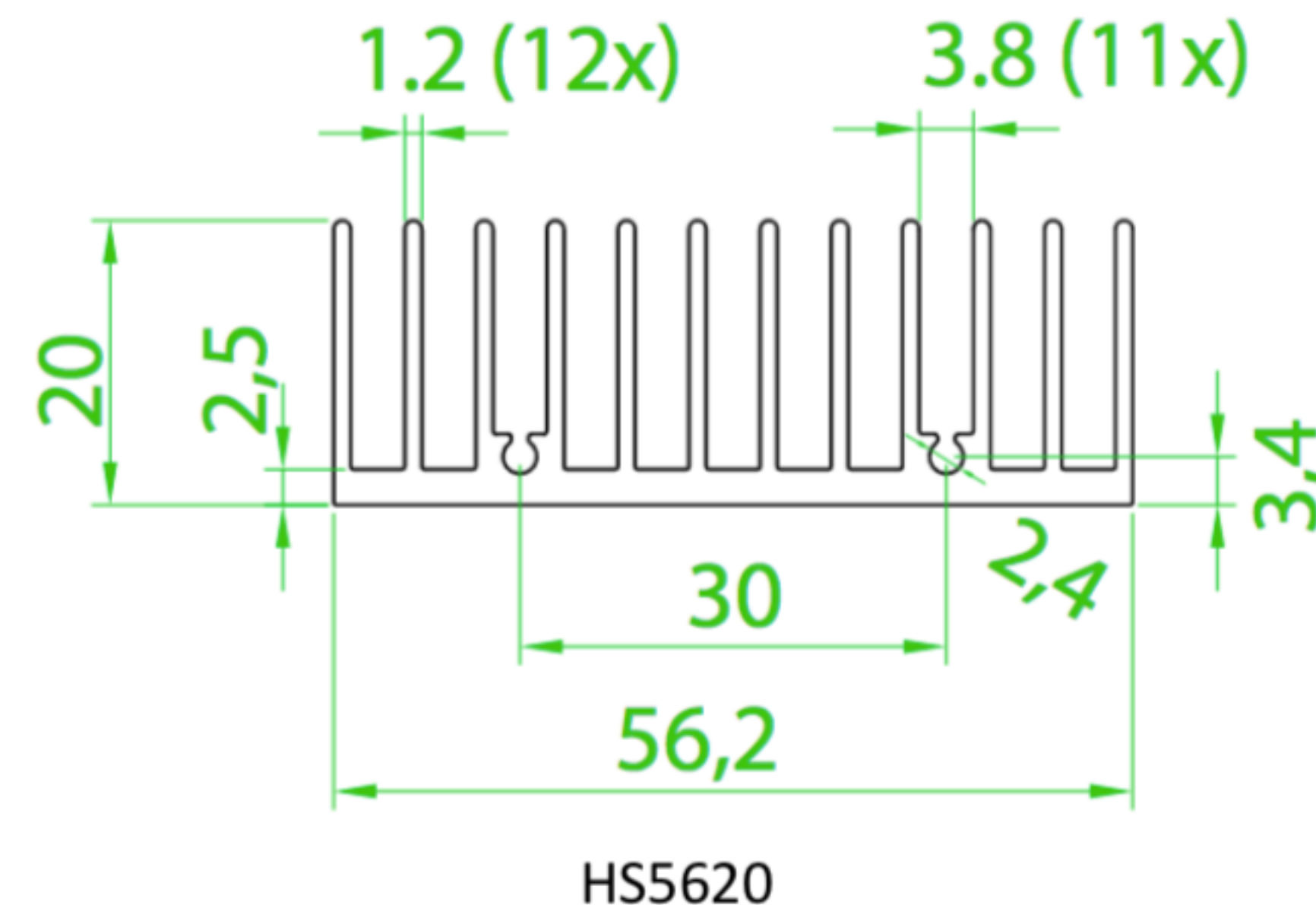
Perdas no transistor:

$$P_{T1} = R_{DS(on)} \cdot I_D^2 = 77m \cdot 20,8^2 = 33,3W$$

$$T_{j_T1} = T_a + R_{ja_T1} \cdot P_{T1} = 35 + 62 \cdot 33,3 \approx 2100^\circ C$$

$$R_{ja_T1} = \frac{T_{j_T1} - T_a}{P_{T1}} = \frac{175 - 35}{33,3} = 4,2^\circ C / W$$

$$R_{da_T1} = R_{ja_T1} - R_{jc_T1} - R_{cd_T1} = 4,2 - 1 - 1 = 2,2^\circ C / W$$



Circuitos de acionamento de motores cc

Exemplo de projeto de circuito de acionamento:

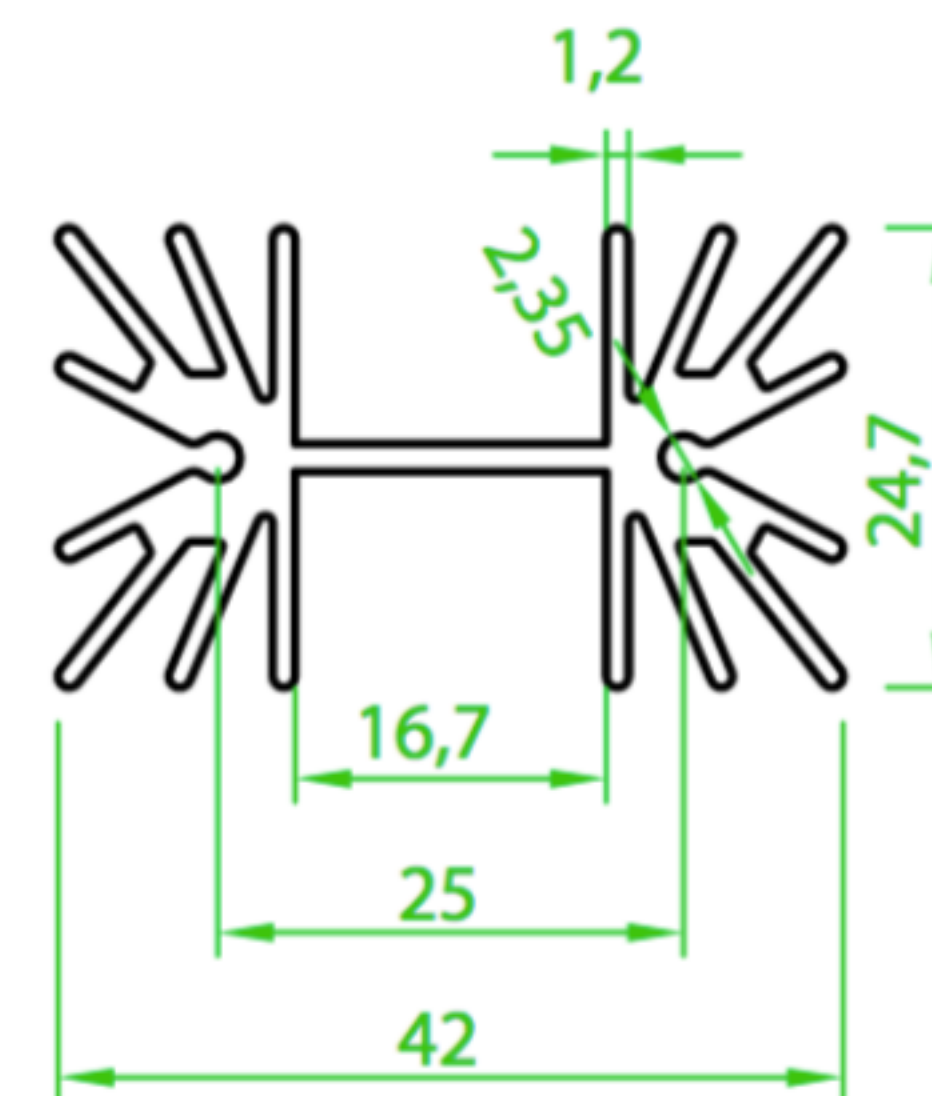
- Motor de 3000 RPM, de 24 V e 500 W;
- Acionamento transistorizado;
- Controle por placas Arduino.

Perdas no diodo:

$$P_{D1} = P_{D2} = V_{D1} \cdot I_{D1} = 1,3 \cdot \frac{20,8}{2} = 13,52W$$

$$T_{j_D1} = T_{j_D2} = T_a + R_{ja_D1} \cdot P_{D1} = 35 + 73 \cdot 13,52 \approx 1022^{\circ}C$$

$$R_{ja_D1_D2} = \frac{T_{j_D1} - T_a}{P_{D1} + P_{D2}} = \frac{175 - 35}{2 \cdot 13,52} = 5,18^{\circ}C / W$$



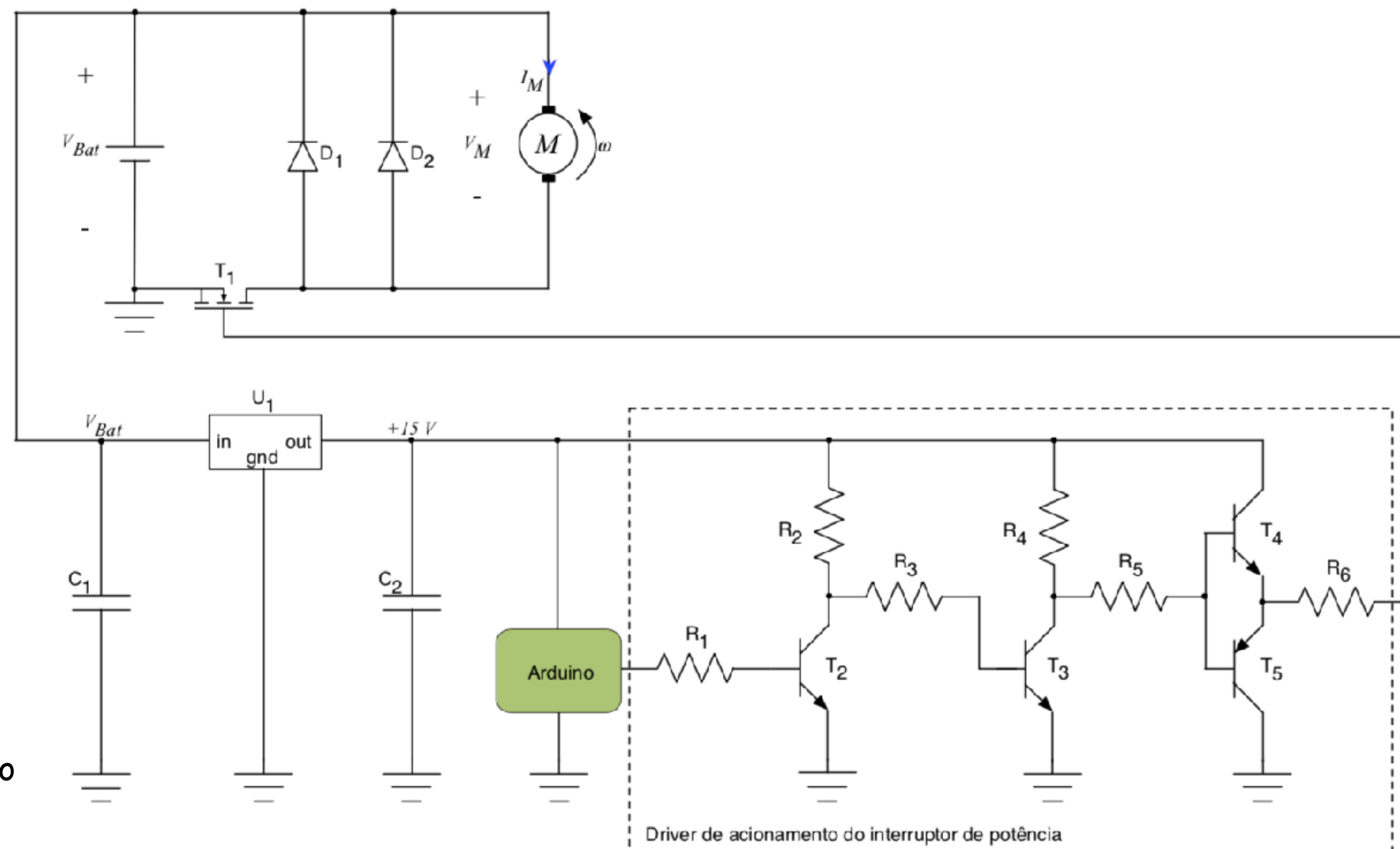
HS4225

Circuitos de acionamento de motores cc

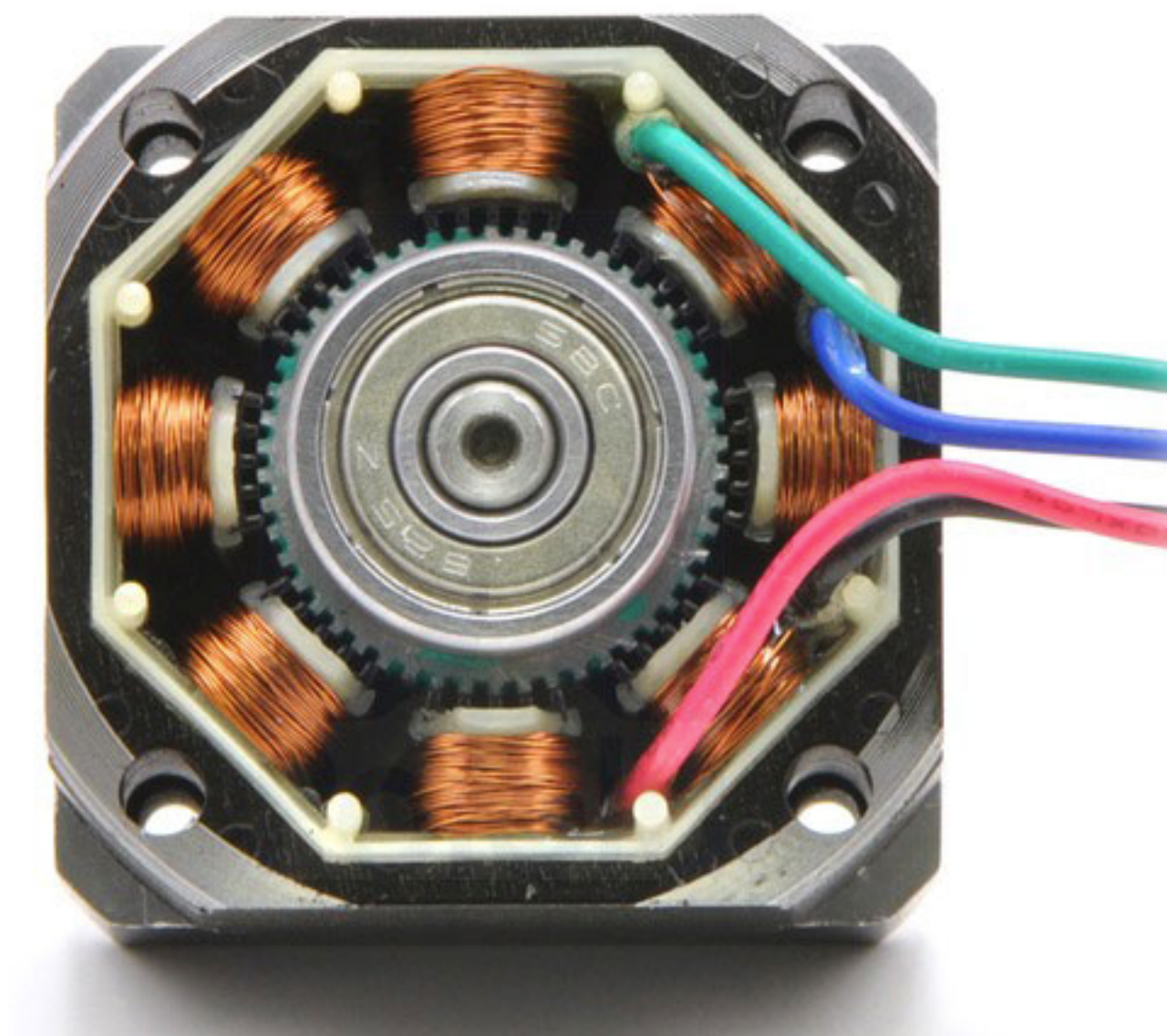
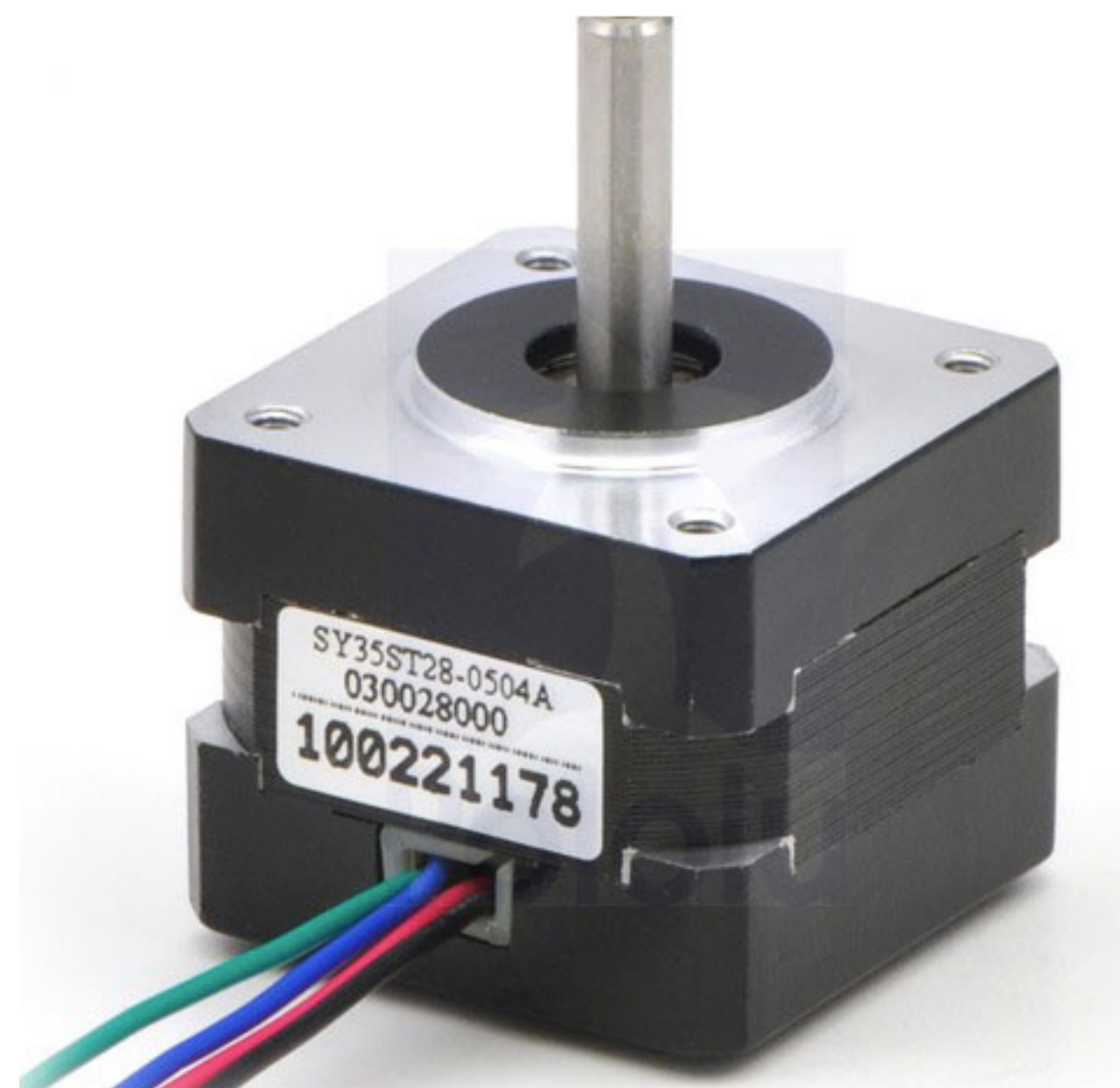
Exemplo de projeto de circuito de acionamento:

- Motor de 3000 RPM, de 24 V e 500 W;
- Acionamento transistorizado;
- Controle por placas Arduino.

Circuito completo



Motores de passo



Fonte: <https://www.popolu.com>