

OBJETIVO

Analisar os processos básicos de conversão eletromecânica de energia presentes nos diversos tipos de máquinas elétricas rotativas (motores e geradores).

INTRODUÇÃO

Conforme verificado no estudo anterior do eletroímã, um campo magnético que se estabelece entre duas faces polares opostas dá origem a enormes forças de atração, especialmente se o entreferro for pequeno. Vimos também que a função básica do núcleo ferromagnético é dirigir o fluxo magnético até as faces polares, permitindo concentrar a energia magnética quase que totalmente no entreferro.

Nas máquinas elétricas rotativas o objetivo é converter as forças de atração/repulsão entre os pólos magnéticos, em conjugado que movimenta o rotor (caso do motor) ou então, converter a energia mecânica responsável pelo movimento do rotor, em energia elétrica (caso do gerador).

Na sequência, realize os experimentos indicados por ♦ colocando no relatório as respectivas observações/conclusões e as respostas às questões formuladas.

CLASSIFICAÇÃO DAS MÁQUINAS

As máquinas elétricas rotativas podem ser classificadas de acordo com o princípio físico de funcionamento. No caso de motores, o conjugado pode ser produzido de quatro maneiras básicas.

(A) Reação de correntes induzidas

Na figura 1 tem-se um ímã que pode ser girado a uma velocidade ω_1 em frente a um disco de alumínio que também pode rodar.

- ♦ Posicione o disco afastado do ímã. Com o ímã travado, gire o disco suavemente e cronometre a duração do giro.
- ♦ Repita o item anterior posicionando o disco próximo ao ímã. Relate o que ocorreu e justifique os fenômenos observados.
- ♦ Mantendo o disco próximo ao ímã, gire suavemente o ímã em qualquer sentido e observe o que ocorre com o disco.

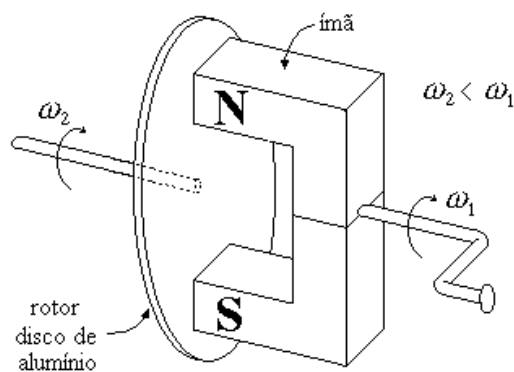
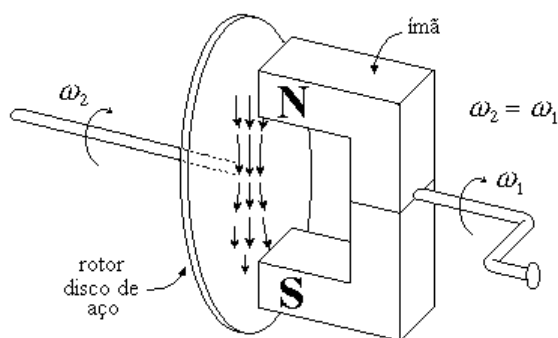


Figura 1 - Motor de Indução Elementar

Com base nas observações explique, justificando, cada questão.

- (i) por que aparece conjugado motriz?
- (ii) a velocidade do disco (ω_2) é igual à do ímã (ω_1)?
- (iii) verifique se essa máquina tem conjugado de partida¹, com o ímã já em movimento.
- (iv) qual o efeito que a carga mecânica provoca sobre ω_2 ?
- (v) essa máquina elementar tem aplicação prática? Onde?

(B) Ciclo de histerese



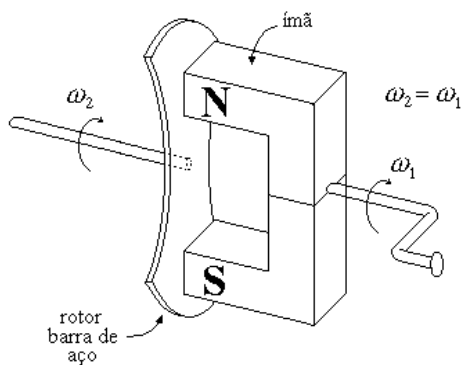
O rotor é constituído por um disco circular de material ferromagnético não magnetizado.

Figura 2 - Motor de Histerese Elementar

- ♦ Gire suavemente o ímã em qualquer sentido e observe o que ocorre com o rotor, visando responder todas as questões anteriores também para esse caso. Destaque as diferenças fundamentais.

¹ Por conjugado de partida entenda-se como a capacidade do rotor em conseguir girar a partir da condição de velocidade nula (parado) qualquer que seja a velocidade relativa entre ele e o campo girante.

(C) Minimização da relutância magnética



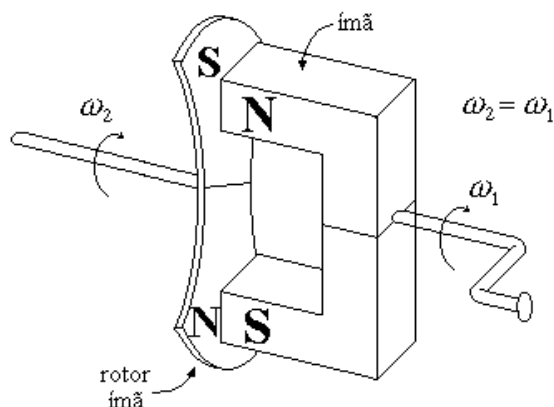
O disco é substituído por uma peça também de material ferromagnético, formando dois pólos simétricos não magnetizados.

Figura 3 - Motor de Relutância

- ◆ Gire suavemente o ímã em qualquer sentido e observe o que ocorre, visando responder as questões anteriores e também a seguinte:

(vi) constatando que o acoplamento entre o rotor e o ímã é *elástico*, o que ocorre se o rotor “pular” um pólo? E o que se pode concluir?

(D) Atração entre pólos magnéticos



O rotor também é um ímã apresentando o mesmo formato do rotor da figura 3.

Figura 4 - Motor Síncrono Elementar de Ímã Permanente

- ◆ Repita o experimento anterior e observe o resultado. Responda todas as perguntas anteriores.

Para melhor sintetizar as características das quatro máquinas analisadas, preencha a tabela 1 com **SIM** ou **NÃO**.

Tabela 1

TIPO	$\omega_1 = \omega_2$?	HÁ CONJUGADO DE PARTIDA?
INDUÇÃO		
HISTERESE		
RELUTÂNCIA		
SÍNCRONA		

Nos quatro tipos de máquinas analisados, a presença de um campo magnético girante é fundamental para a produção de conjugado, ou seja, o movimento do rotor. E o campo girante é produzido manualmente, o que não é uma solução prática, evidentemente. Portanto:

- (a) É possível produzir campo girante a partir de bobinas fixas?
- (b) E, ao contrário, é possível conseguir o giro de um rotor imerso em um campo magnético estacionário ?

A primeira questão é fundamental para viabilizar os motores elétricos anteriormente descritos e a segunda questão tem a ver com o princípio de funcionamento dos motores de corrente contínua que serão vistos adiante.

CAMPO MAGNÉTICO GIRANTE

Uma possibilidade para a obtenção de um campo magnético girante, consiste em se utilizar um conjunto de três bobinas idênticas, dispostas geometricamente conforme indicado na figura 5(a).

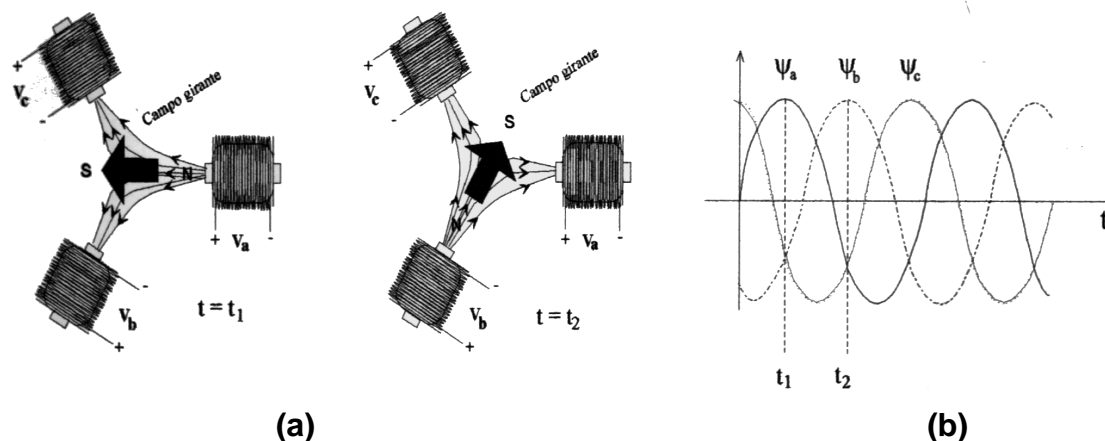


Figura 5 - Campo Magnético Girante

Se forem interligadas em Y ou Δ e conectadas a uma fonte de tensão senoidal trifásica equilibrada, resultam os fluxos magnéticos nas 3 fases (ψ_a , ψ_b e ψ_c) mostrados na figura 5(b).

Responda, justificando, as perguntas a seguir.

- (vii) Analisando o fluxo total resultante nos instantes t_1 e t_2 ,vo que aconteceu com o campo magnético nesse intervalo de tempo?
- (viii) Como varia a intensidade do campo magnético resultante?
- (ix) Como varia a velocidade angular do campo resultante?
- (x) Qual a relação entre a velocidade angular do campo girante e a freqüência da fonte de tensão?
- (xi) Se um dipolo magnético (bússola) for colocado no centro geométrico, o que ocorrerá?

- ♦ Faça a montagem da figura 5 e verifique experimentalmente.
- (xii) E se colocarmos um rotor cilíndrico de alumínio, o que ocorrerá?
 - ♦ Verifique experimentalmente e comente.
- (xiii) O que determina o sentido de rotação?
 - ♦ Verifique experimentalmente e comente.
- (xiv) Sugira outros tipos de rotores que produzam conjugado ao serem imersos neste campo magnético girante. Se possível, verifique experimentalmente.

VISUALIZAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO GIRANTE E ESTACIONÁRIO

Uma forma alternativa para se visualizar a ação do campo magnético girante sobre o rotor, é observar o efeito luminoso de *leds* (diodos emissores de luz) alimentados pela tensão induzida em três bobinas posicionadas na borda de um disco e equidistantes entre si (figura 6).

- ♦ Analise o que deve ocorrer nos *leds* em cada uma das seguintes situações:
 - disco travado e ímã sendo girado
 - disco sendo girado e ímã travado
 - ambos sendo girados diferentemente.

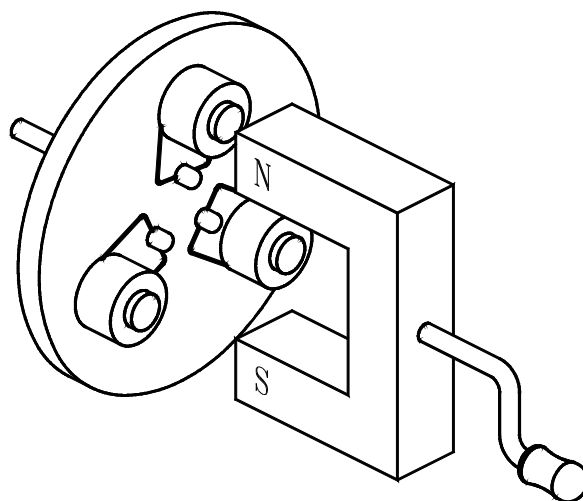


Figura 6 - Rotor com Bobinas e *Leds*

- (xv) Faça a correspondência de cada caso com um tipo de máquina onde essa situação ocorre.

CAMPO MAGNÉTICO ESTACIONÁRIO - MÁQUINA DE CORRENTE CONTÍNUA

A questão agora é conseguir o movimento do rotor com campo magnético **estacionário** no estator. Este campo estacionário pode ser obtido de duas maneiras diferentes: o estator sendo um ímã permanente ou no estator tem-se uma bobina alimentada com corrente contínua. A figura 7 ilustra a primeira situação.

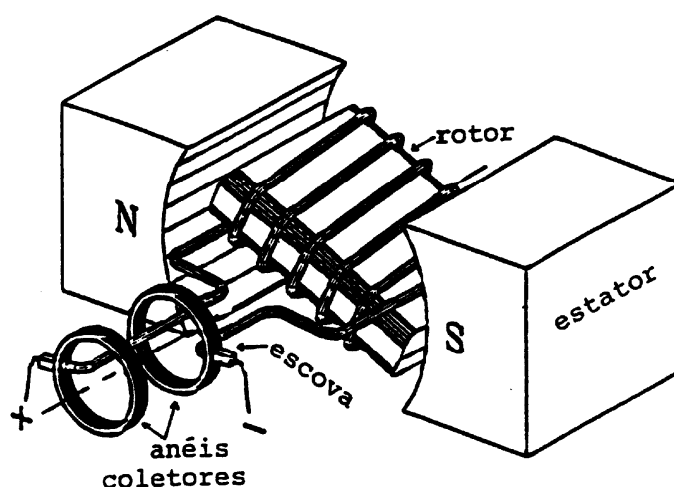


Figura 7 - Rotor Com Anéis Coletores

Pelas espiras (rotor) circula corrente **contínua** conduzida através das escovas de carvão via anéis condutores conectados às extremidades da bobina.

(xvi) Considerando que no instante em que se inicia a passagem da corrente contínua no rotor, este está na posição indicada na figura 7, explique o que ocorrerá com o rotor.

- ♦ Verifique experimentalmente.

Considere a substituição dos dois anéis contínuos por um único anel seccionado (comutador) conforme ilustrado na figura 8.

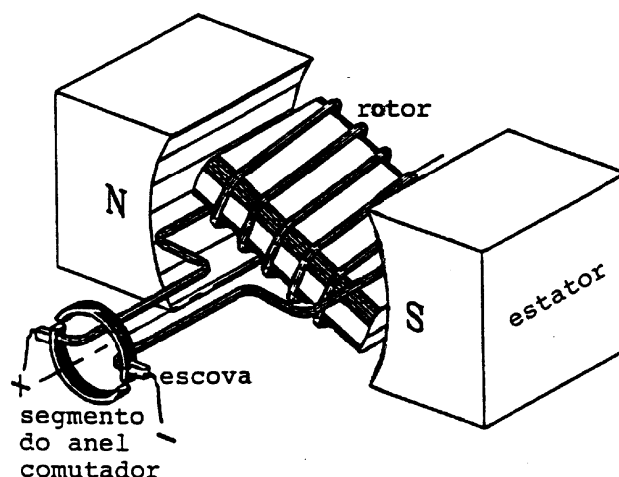


Figura 8 - Rotor Com Comutador

(xvii) Considerando que no instante em que se inicia a passagem da corrente contínua no rotor, este está na posição indicada na figura 8, explique o que ocorrerá com o rotor.

♦ Verifique experimentalmente.

(xviii) Considere a possibilidade de o rotor da figura 7 ser girado mecanicamente, substituindo-se a fonte c.c. conectada ao rotor, por um galvanômetro com zero central. O que ocorrerá? Justifique.

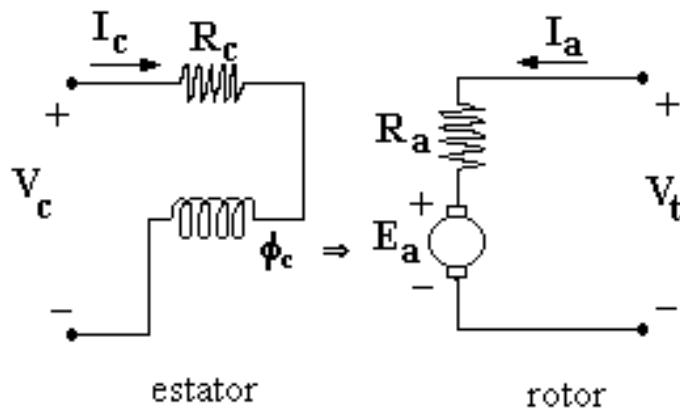
♦ Verifique experimentalmente.

(xix) E se este mesmo procedimento for adotado para o rotor da figura 8, o que ocorrerá? Justifique.

♦ Verifique experimentalmente.

Usualmente, na máquina de corrente contínua, o enrolamento do rotor é chamado de enrolamento de **armadura** ou **induzido**; e o enrolamento do estator, de enrolamento de **campo** ou de **excitação**.

Um motor de corrente contínua, cujo estator possui bobinas para produzir o campo magnético, pode ser representado eletricamente como ilustrado na figura 9.



K_a - constante de projeto da máquina

R_c - resistência ôhmica do enrolamento do estator

R_a - resistência ôhmica do enrolamento do rotor

ϕ_c - fluxo de excitação

E_a - tensão gerada no enrolamento do rotor devido a ϕ_c

$$V_t = E_a + R_a \cdot I_a$$

$$E_a = K_a \cdot \phi_c \cdot \omega$$

(*) No caso de gerador, inverte-se apenas o sentido da corrente I_a ($I_g = -I_a$).

Figura 9

Note que em regime de corrente contínua, a corrente de campo é limitada apenas pela resistência do circuito. Apenas em condições transitórias o efeito da indutância torna-se importante.

TIPOS DE EXCITAÇÃO

Em um motor c.c. com estator e rotor bobinados, estes podem ser conectados de quatro maneiras distintas, conforme descrito a seguir.

(a) Excitação independente - Neste caso existe uma fonte c.c. para o estator (campo) e uma outra para o rotor (armadura). Este tipo de excitação é similar ao de ímã permanente, porém permite o controle de velocidade tanto pelo ajuste da corrente no rotor como pela do estator.

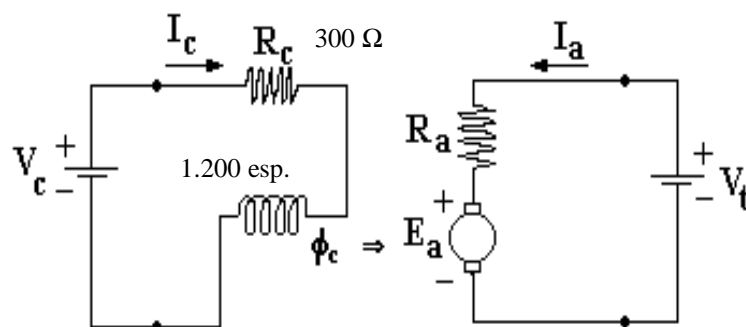


Figura 10 - Excitação Independente

- ♦ Com o material disponível, monte um motor c.c. com excitação independente, tomando o cuidado para que as correntes não ultrapassem 1 A.

(xx) Quais as maneiras para se inverter o sentido de rotação?

(b) Excitação paralela - Neste caso a corrente de excitação é obtida da mesma fonte que alimenta a armadura. Portanto a tensão sobre a armadura afeta a corrente de excitação.

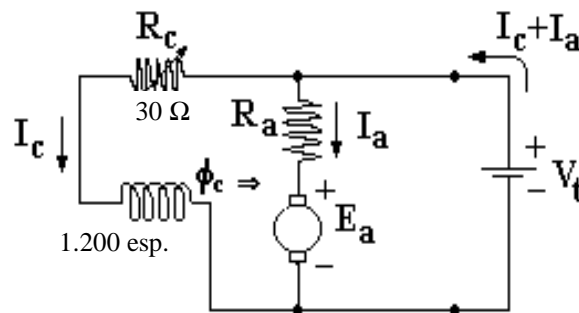


Figura 11 - Excitação paralela (*shunt*)

- ♦ Monte um motor c.c. com excitação paralela (*shunt*), limitando a corrente em 1 A.

(xxi) Quais as maneiras para se inverter o sentido de rotação neste caso ?

(c) Excitação série - Neste caso, apenas uma fonte c.c. alimenta os enrolamentos do estator e do rotor que estão ligados em série, ou seja, a corrente de excitação é a própria corrente de carga (corrente de armadura).

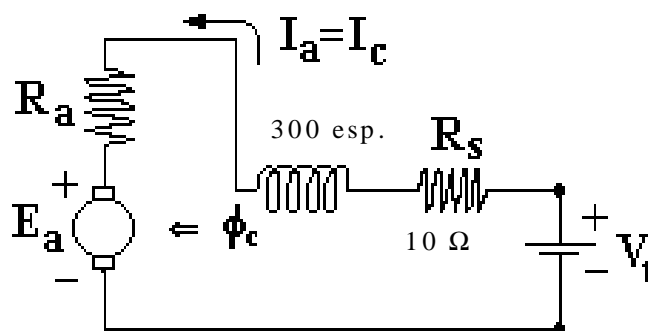


Figura 12 - Excitação Série

- ♦ Monte um motor c.c. com excitação série, limitando a corrente em 1 A.

(xxii) Quais as maneiras para se inverter o sentido de rotação?

(xxiii) O que ocorre se este motor for alimentado com corrente alternada?

(xxiv) Qual a aplicação usual desta versão?

(d) Excitação composta - Neste caso também existe apenas uma fonte c.c. que alimenta tanto a excitação paralela como a série. A conexão entre os enrolamentos resulta na excitação composta curta ou longa, com características similares (figura 13).

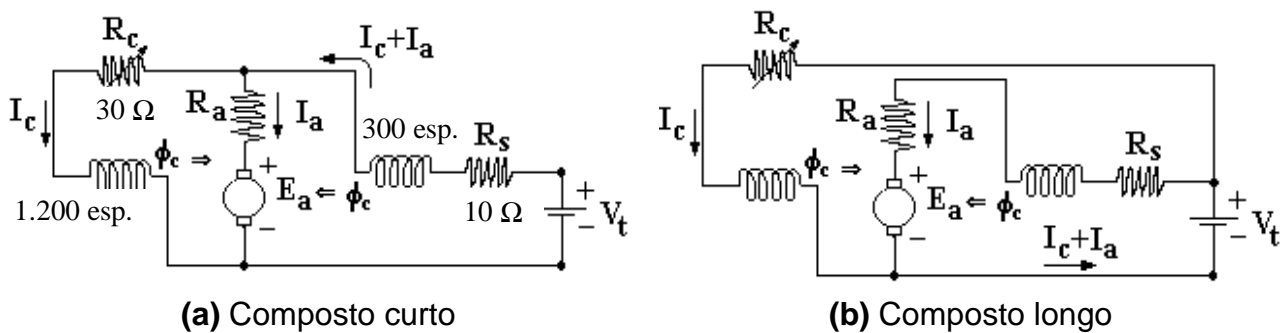


Figura 13 - Excitação Composta

- ♦ Monte um motor c.c. com um dos tipos de excitação composta, limitando a corrente em 1 A.

OUTROS TIPOS DE MOTORES

São muitas as possibilidades de se construir máquinas elétricas, que podem assumir dimensões diminutas (motor microscópico) ou gigantescas (geradores de Itaipú). Algumas aplicações especiais merecem destaque: motor de passo e motor linear.

MOTOR DE PASSO

O motor de passo (*step motor*) é um motor que responde a pulsos elétricos e que provocam a rotação de um determinado ângulo (p.ex.: 15° por pulso).

Construtivamente, em geral, o rotor é um ímã permanente com N_r **pares de pólos salientes** de modo a estabelecer um deslocamento do rotor $\Delta\theta_r = \Delta\theta_e / (N_r \cdot n)$, com $\Delta\theta_e = 360^\circ / N_e$, sendo $\Delta\theta_e$ o passo polar do estator, N_e a quantidade de pólos do estator e n a quantidade de bobinas do estator energizadas [$1 \leq n \leq (N_e - 1)$]. Caso o rotor seja apenas um núcleo de material ferromagnético, N_r é a **quantidade de pólos**.

A quantidade de passos por volta corresponde a $PPV = 360^\circ / \Delta\theta_r$ e as rotações por segundo são dadas por $RPS = f / PPV$, sendo f a frequência de aplicação dos pulsos nas bobinas do estator.

Um exemplo simples de motor de passo é mostrado na figura 14.

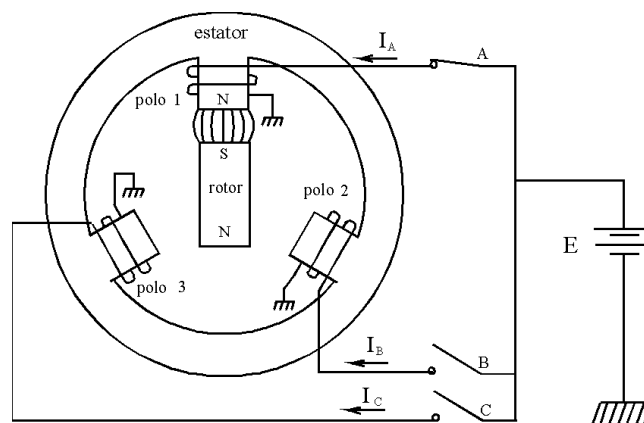


Figura 14

Se as chaves A, B e C são fechadas uma por vez, obtenha o **PPV** e o sentido de rotação quando:

- (a) o rotor é um ímã permanente;
- (b) o rotor é um núcleo ferromagnético.

- ◆ Anote as características do motor de passo existente no laboratório:

$n =$ _____	$N_e =$ _____	PPV = _____
-------------	---------------	-------------

- ◆ Observe o seu funcionamento utilizando o circuito de controle esquematizado na figura 15.

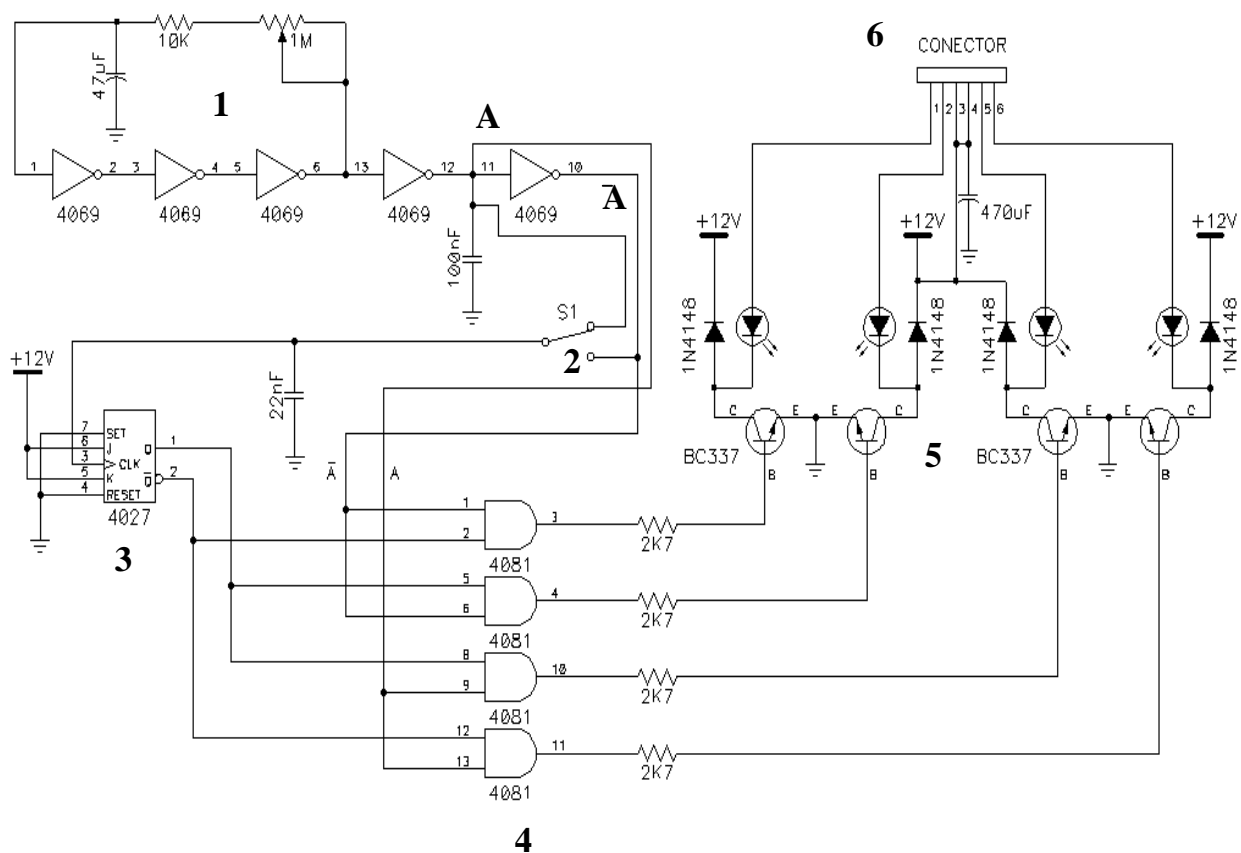


Figura 15

As partes principais do circuito de controle correspondem a:

- 1 - Gerador de *clock* com ajuste da freqüência
- 2 - Seletor de reversão do sentido de rotação
- 3 - Flip-flop divisor por dois da freqüência do *clock*
- 4 - Geração dos pulsos seqüenciais às fases
- 5 - *Drivers* de potência e leds indicadores
- 6 - Saída às fases do motor

Na figura 16 tem-se os sinais de controle e os respectivos pulsos fornecidos às fases do motor.

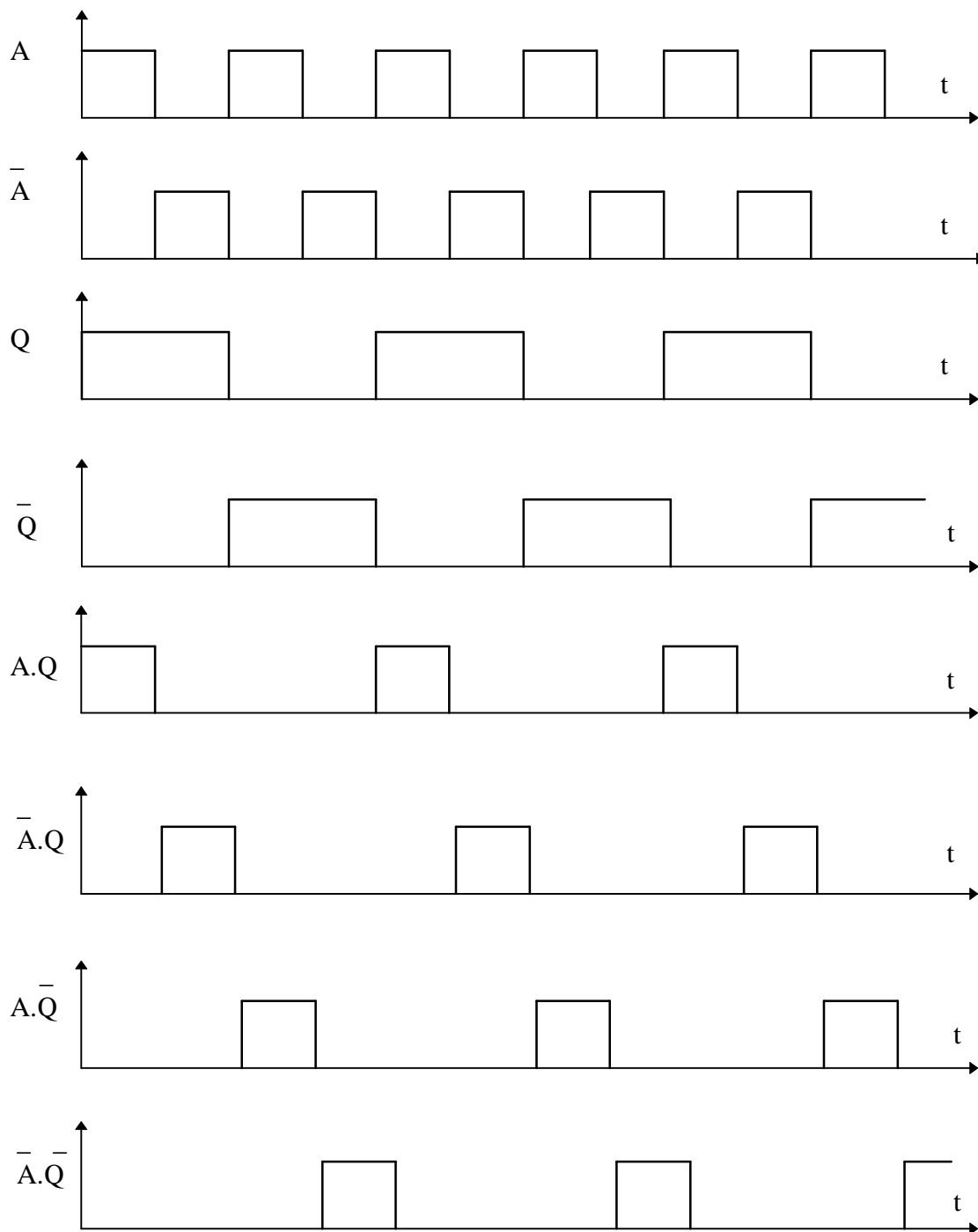


Figura 16

(xxv) Relate o funcionamento do motor de passo do laboratório, destacando:

- a reversão do sentido de rotação;
- a relação para a velocidade resultante em função da frequência dos pulsos.
- o valor de N_r (explicitar os cálculos).

MOTOR LINEAR

Já vimos como pode ser produzido um campo magnético girante trifásico. Se as bobinas forem dispostas em linha, o campo passa a ser deslizante, o que pode ser comprovado colocando um cilindro de alumínio sobre um plano isolante, conforme ilustrado na figura 17.

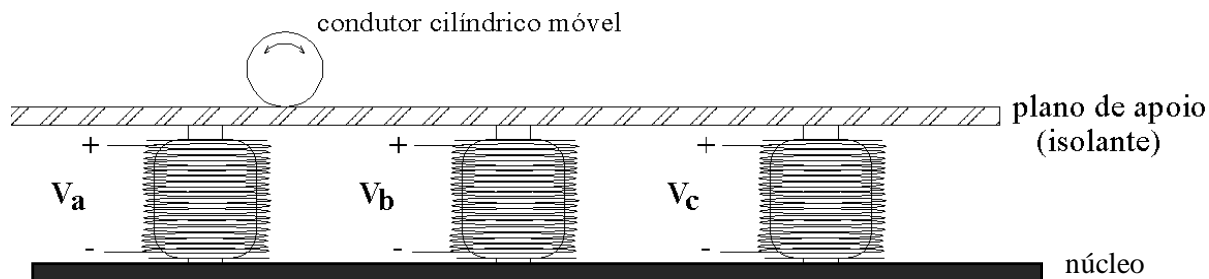


Figura 17 - Motor Linear Elementar

- ◆ Execute a montagem indicada na figura 17.
- ◆ Alimente as bobinas com tensões trifásicas e observe o que ocorre com o cilindro de alumínio.

(xxvi) Explique o princípio de funcionamento do motor linear.

(xxvii) Como se pode inverter o sentido de rolamento?

(xxviii) Cite possíveis aplicações.