

TRANSPETRO 2026

AMOSTRA GRATUITA

ENGENHARIA ELÉTRICA

Conversão eletromecânica de energia

Esta é uma aula completa, exatamente como está no material.
Uma aula por item do edital: teoria enxuta, tabelas e esquemas,
e questões CESGRANRIO comentadas uma a uma.

Material completo desta área: engenhariadaaprovacao.com.br/materiais/transpetro-2026/engenharia-eletrica

Uso individual. Material independente.



ENGENHARIA DA APROVAÇÃO

Engenharia Elétrica

Conversão eletromecânica de energia

Aula 14 • Fundamentos de máquinas elétricas

Concurso Transpetro • Nível superior
Ênfase 23: Engenharia Elétrica

RESUMO ESTRATÉGICO • AULA 14



Como usar este material

Dos campos magnéticos às portas de potência: domine as relações que explicam motores, geradores e a produção de um campo girante.

1. Leia os blocos e explique as distinções com suas palavras.
2. Refaça os exemplos; observe condições, unidades e limites de cada regra.
3. Responda às perguntas de autoavaliação e retorne ao bloco indicado quando necessário.
4. Resolva a bateria sem consultar as respostas. Depois, use os comentários para justificar a correta e descartar as demais.

A REGRA QUE ORGANIZA O CONTEÚDO

Defina o sentido dos vetores, converta as unidades e separe potência convertida, perdas e potência útil.

O que a banca cobra nesta aula

O mapa abaixo organiza o treino por assunto. A seleção é didática; não constitui estimativa estatística da incidência dos tópicos na prova.

Mapa de estudo

Bloco	O que dominar	Questões na bateria
1	Movimento, torque e potência	0
2	Corrente, campo e fluxo magnético	2
3	Indução: Faraday, Lenz e valor eficaz	2
4	Força no condutor e máquina linear CC	2
5	Espira girante: tensão e conjugado	0
6	Campo girante e velocidade síncrona	1
7	Geração trifásica e ligações	0
8	Perdas, rendimento e potência aparente	1
9	Regulação e leitura de condições de operação	0

1 · Movimento, torque e potência

A conversão eletromecânica liga duas portas de energia. No motor, entra potência elétrica e sai potência mecânica; no gerador, a direção se inverte. O campo magnético permite a interação entre os circuitos elétricos e a parte móvel. O transformador também usa campo magnético para transferir energia, mas não possui uma porta mecânica de conversão: é uma máquina elétrica estática.

Rotação não é sinônimo de torque. Um corpo pode girar com velocidade constante e torque resultante nulo. Torque é o momento de uma força em relação a um eixo; sua unidade é $N \cdot m$. Já a velocidade angular indica a rapidez e o sentido da mudança de posição. Em um problema plano, escolha um sentido positivo e conserve essa escolha nas equações.



Translação e rotação: o que corresponde a quê

Grandeza	Translação	Rotação
Posição	x [m]	θ [rad]
Velocidade	$v = dx/dt$ [m/s]	$\omega = d\theta/dt$ [rad/s]
Aceleração	$a = dv/dt$ [m/s ²]	$\alpha = d\omega/dt$ [rad/s ²]
Inércia e dinâmica	Massa m ; $\Sigma F = ma$	Momento de inércia J ; $\Sigma \tau = J\alpha$
Trabalho, força/torque constantes	$W = Fd$, força paralela ao deslocamento	$W = \tau\Delta\theta$, ângulo em rad
Potência instantânea	$P = F \cdot v$	$P = \tau\omega$, torque no eixo de rotação

Conversão de velocidade

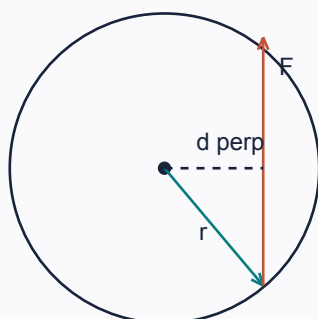
$$\omega = 2\pi n/60; n = 60f_m; v = r\omega$$

n em rpm; f_m em rotações por segundo; ω em rad/s; r em metros.

Momento da força

$$\tau = r \times F; |\tau| = rF \sin \theta = Fd_{\perp}$$

θ é o ângulo entre r e F ; $d_{\perp}$ é a distância perpendicular do eixo à linha da força.



$$\tau = Fd_{\perp}$$

Linha da força: vertical

Braço: distância horizontal

Torque: anti-horário

Se $d_{\perp} = 0$, o torque é zero.

Figura 1 · Braço perpendicular e força aplicada: importa a distância até a linha de ação.

A equação $\Sigma F = ma$ é a segunda lei de Newton. Para um eixo fixo e J constante, seu equivalente rotacional é $\Sigma \tau = J\alpha$. No motor, o torque eletromagnético precisa vencer o torque da carga e as resistências mecânicas; só o excedente acelera o rotor. Na partida, ω pode ser zero embora exista torque elevado. Nesse instante, $P = \tau\omega$ é zero, sem que isso implique corrente elétrica nula.

Potência no eixo

$$P \text{ [W]} = \tau \text{ [N}\cdot\text{m]} \times \omega \text{ [rad/s]}$$

Para torque e velocidade no mesmo eixo. Não multiplicar N·m diretamente por rpm.

EXEMPLO 1 · Converter antes de multiplicar

Um eixo fornece $18 \text{ N}\cdot\text{m}$ a 1.500 rpm . Primeiro, $\omega = 2\pi \times 1.500/60 = 50\pi \approx 157,08 \text{ rad/s}$. Depois, $P = 18 \times 157,08 \approx 2.827 \text{ W}$. Se a rotação dobrar com o mesmo torque, a potência dobra. Se a potência ficar constante e a rotação dobrar, o torque cai à metade.

EXEMPLO 2 · Acelerar exige torque resultante

Com $J = 0,40 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, torque eletromagnético de $12 \text{ N}\cdot\text{m}$ e carga resistente de $8 \text{ N}\cdot\text{m}$, desprezando as demais perdas, $\alpha = (12 - 8)/0,40 = 10 \text{ rad/s}^2$. Se os torques se igualarem, $\alpha = 0$; o eixo pode continuar girando.

As unidades usuais de placa também exigem cuidado: $1 \text{ cv} \approx 735,5 \text{ W}$ e $1 \text{ hp} \approx 745,7 \text{ W}$. Em questão de prova, use o valor expressamente fornecido, mesmo que arredondado. Potência mecânica de placa não é a potência elétrica de entrada: falta considerar o rendimento.

2 · Corrente, campo e fluxo magnético

Uma corrente produz campo magnético. O vetor H , em A/m , descreve a intensidade do campo; B , em tesla, é a densidade de fluxo magnético. O material modifica a relação entre eles. Em meio linear e isotrópico, $B = \mu H$; em um material ferromagnético real, a permeabilidade pode variar com o ponto de operação e a história de magnetização. Não trate μ como constante universal.

Lei circuital de Ampère

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{\text{envolvida}}; H\ell \approx Ni$$

Modelo magnetostático/quase estático; N espiras atravessam o caminho. H aproximadamente uniforme ao longo de ℓ .

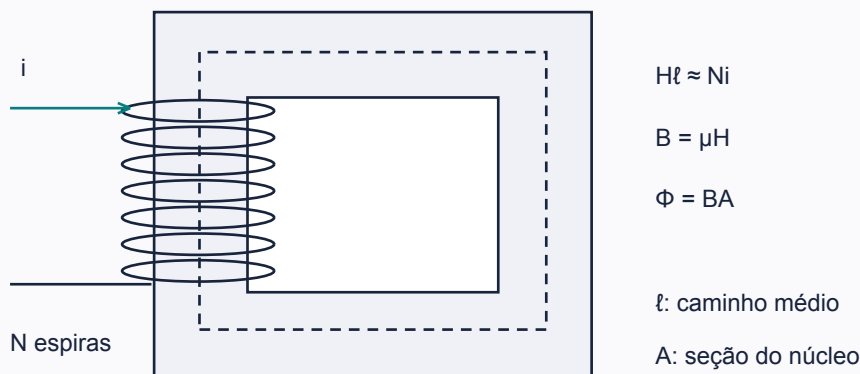


Figura 2 · Bobina e caminho magnético médio: a corrente concatenada é Ni .

Permeabilidade e densidade de fluxo

$$\mu = \mu_r \mu_0; B = \mu H \approx \mu Ni/\ell$$

μ em H/m ; μ_r adimensional. Para cálculos usuais, $\mu_0 \approx 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$.

A regra da mão direita tem duas leituras úteis. Em torno de um fio retilíneo, o polegar acompanha a corrente e os dedos indicam a circulação do campo. Numa bobina, os dedos acompanham a corrente nas espiras e o polegar indica o campo no interior. Ser um vetor não obriga o campo a variar no tempo: campos estáticos também têm módulo, direção e sentido.

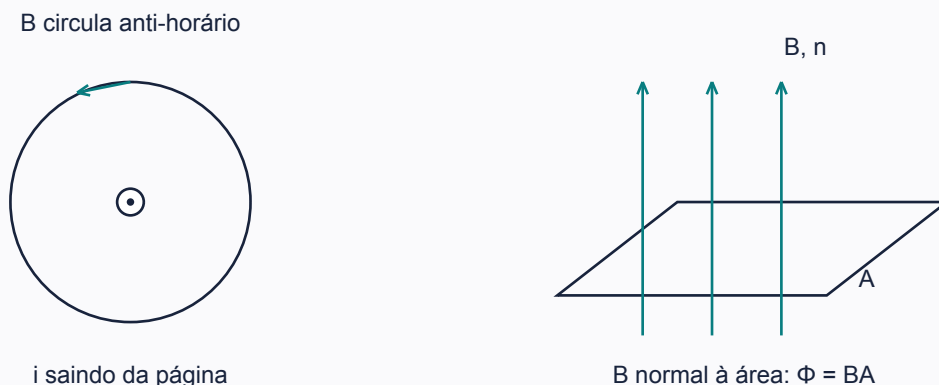


Figura 3 · Campo em torno do fio e fluxo através de uma área: direção e orientação da superfície são essenciais.

Fluxo e fluxo concatenado

$$\Phi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}; \Phi = BA \cos \beta; \lambda = N\Phi$$

β entre $\mathbf{B}$ e a normal à área. A expressão BA exige campo uniforme e perpendicular à superfície.

Unidades e conversões magnéticas

Símbolo	Grandeza e unidade
H	Intensidade de campo, A/m.
B	Densidade de fluxo, T = Wb/m ² . 1 T = 10 ⁴ gauss.
Φ	Fluxo, Wb. 1 maxwell = 10 ⁻⁸ Wb.
λ	Fluxo concatenado; soma dos fluxos das espiras, Wb·espira.
A e ℓ	Área em m ² e comprimento em m. 1 cm ² = 10 ⁻⁴ m ² .

EXEMPLO 3 · Do enrolamento ao fluxo

Para $N = 300$, $i = 0,20$ A, $\ell = 0,30$ m e $\mu_r = 1.000$, o modelo linear fornece $H = 200$ A/m e $B \approx 0,2513$ T. Se $A = 4$ cm² = 4×10^{-4} m² e $\mathbf{B}$ for normal à seção, $\Phi \approx 1,005 \times 10^{-4}$ Wb. O resultado depende da hipótese de μ_r constante.

EXEMPLO 4 · Não confundir área com seu vetor normal

Se $B = 0,5$ T atravessa uniformemente $A = 20$ cm², o fluxo máximo é $0,5 \times 0,002 = 0,001$ Wb. Com 60° entre $\mathbf{B}$ e a normal, $\Phi = 0,0005$ Wb. Com $\mathbf{B}$ paralelo ao plano da área, o fluxo é zero.

3 · Indução: Faraday, Lenz e valor eficaz

Uma mudança do fluxo concatenado induz força eletromotriz. A mudança pode vir de um campo variável, do movimento do circuito ou da alteração da orientação da superfície. Para uma bobina estacionária, com N espiras concatenando o mesmo fluxo, a lei de Faraday relaciona diretamente a fem à derivada do fluxo. A lei de Lenz fixa o sentido: a ação da corrente induzida se opõe à variação que a produz.



Lei de Faraday–Lenz

$$e = -d\lambda/dt = -N d\Phi/dt$$

Fem orientada segundo o percurso escolhido. O sinal se refere à oposição à variação, não à oposição obrigatória ao próprio fluxo.

EXEMPLO 5 · Variação uniforme

O fluxo em cada uma de 250 espiras aumenta de 0,4 mWb para 1,0 mWb em 5 ms. O módulo médio da fem é $250 \times (0,0006/0,005) = 30$ V. Duplicar N duplica a fem; manter o fluxo constante faz $d\Phi/dt = 0$, ainda que Φ não seja zero.

Se um fluxo para dentro da página cresce, a corrente induzida tende a criar fluxo para fora. Se aquele fluxo diminui, a corrente tende a sustentá-lo, produzindo fluxo para dentro. Portanto, a frase “o campo induzido é sempre contrário ao campo aplicado” está errada. É a mudança que encontra oposição.

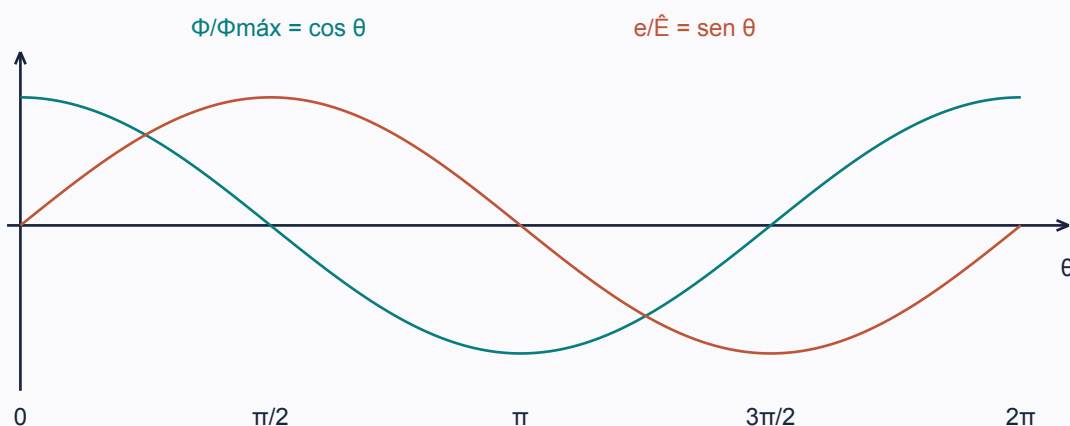


Figura 4 · Fluxo senoidal e fem normalizada: a derivada desloca os máximos em um quarto de ciclo.

Fem eficaz para fluxo senoidal

$$E_{\text{rms}} = (2\pi/\sqrt{2}) f N \Phi_{\text{máx}} \approx 4,44 f N \Phi_{\text{máx}}$$

f em Hz; $\Phi_{\text{máx}}$ em Wb. É valor eficaz por enrolamento; não confundir fluxo máximo com fluxo eficaz.

A constante 4,44 vale para fluxo senoidal e espiras concatenando esse fluxo. Ela resulta de derivar a senoide e dividir a amplitude por $\sqrt{2}$. A média de uma senoide completa é zero; o fator de forma de aproximadamente 1,11 relaciona o eficaz à média do módulo da senoide. Não se aplica esse fator a qualquer forma de onda. Se Φ for dado em maxwell, converta para Wb; com B em gauss e A em cm^2 , o produto BA exige o fator 10^{-8} para obter Wb.

EXEMPLO 6 · Eficaz por bobina

Uma bobina de 200 espiras concatena fluxo senoidal de pico 2 mWb a 60 Hz. $E \approx 4,44 \times 60 \times 200 \times 0,002 = 106,56$ V. Aumentar a frequência mantendo N e o fluxo de pico constantes aumenta E na mesma proporção.

O fluxo alternado também induz correntes no próprio metal do núcleo. Essas correntes parasitas dissipam calor. Chapas finas, isoladas entre si, dificultam os grandes percursos condutores; materiais de maior resistividade também reduzem essas correntes. Laminação reduz principalmente perdas por correntes parasitas, sem eliminar automaticamente as perdas por histerese.

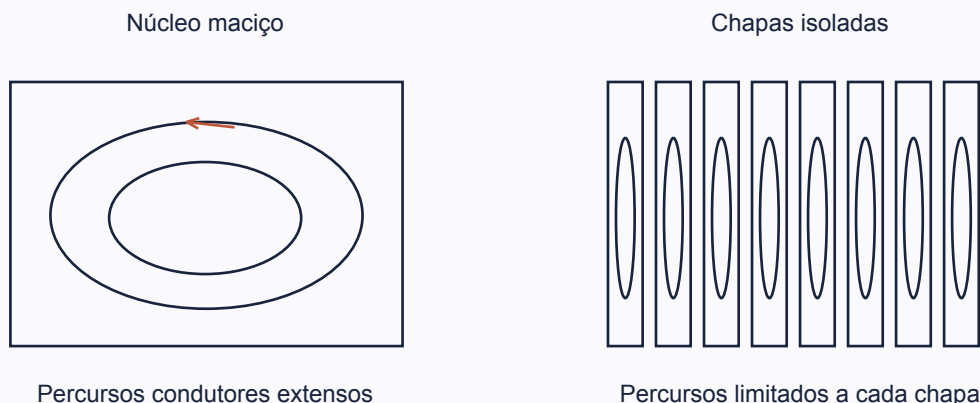


Figura 5 · Núcleo maciço e laminado: as camadas isolantes interrompem percursos extensos de corrente parasita.

4 · Força no condutor e máquina linear CC

Um condutor percorrido por corrente sofre força quando está imerso em campo magnético. Para um trecho retilíneo, use o vetor comprimento no sentido da corrente convencional. O produto vetorial decide a direção e o sentido; o seno decide o módulo. Um fio paralelo ao campo tem força magnética nula, mesmo conduzindo corrente elevada.

Ação motora

$$\mathbf{F} = i(\mathbf{l} \times \mathbf{B}); |\mathbf{F}| = Bi\ell \sin \gamma$$

γ entre o fio e $\mathbf{B}$. Em configuração perpendicular, $|\mathbf{F}| = Bi\ell$.

Fem de movimento

$$\mathbf{e} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{l}; |\mathbf{e}| = B\ell v$$

A segunda forma exige $\mathbf{v}$, $\mathbf{B}$ e o condutor mutuamente perpendiculares. A polaridade depende da orientação escolhida.

EXEMPLO 7 · Regra vetorial e módulo

Com corrente de 4 A no sentido +y, comprimento 0,25 m e $B = 0,6$ T para dentro da página ($-z$), $\mathbf{F}$ aponta para $-x$, pois $y \times (-z) = -x$. Seu módulo é $4 \times 0,25 \times 0,6 = 0,60$ N. Inverter só a corrente inverte $\mathbf{F}$; inverter corrente e campo conserva $\mathbf{F}$.

Considere uma barra que desliza sem atrito sobre trilhos, ligada a uma fonte CC por uma resistência R . Para $\mathbf{B}$ entrando na página e velocidade para a direita, a fem de movimento torna a extremidade superior positiva. Adote a corrente positiva descendo pela barra. A resistência limita a corrente; a fem induzida cresce com a velocidade.

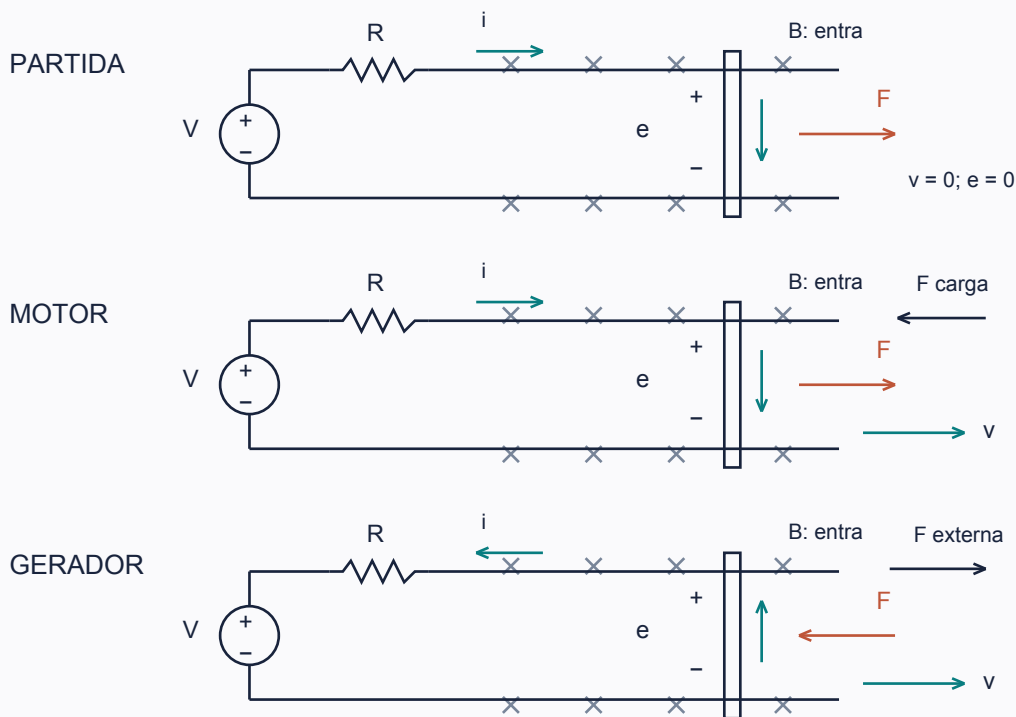


Figura 6 · A mesma máquina linear: partida, ação motora e ação geradora. As setas de corrente mostram o sentido real de cada regime.

Equações do modelo linear

$$i = (V - e)/R; e = B\ell v; F_{em} = B\ell i$$

Sinais referidos à corrente descendente e ao movimento para a direita. Para $R > 0$.

O que muda entre os regimes

Situação	Grandezas	Efeito
Partida, $v = 0$	$e = 0; i = V/R$	Força inicial acelera a barra.
Vazio ideal em regime	$e = V; i = 0$	Velocidade constante; sem atrito nem carga, não há potência mecânica útil.
Motor com carga	$0 < e < V; i > 0$	A fonte entrega energia; a força eletromagnética vence a carga.
Gerador	$e > V; i < 0$	Uma força externa move a barra; a força eletromagnética se opõe ao movimento e a fonte absorve energia.

Ao aplicar carga resistente, a velocidade cai inicialmente; e diminui, i aumenta e a força motora cresce até o novo equilíbrio. Para gerar, uma força externa pode elevar a velocidade além da condição de vazio. A corrente se inverte sem exigir inversão do movimento. Isso demonstra reversibilidade; não significa que toda máquina real possa gerar em qualquer ligação ou que seu sentido de giro nunca possa ser invertido.

Conversão e perda resistiva

$$P_{conv} = ei = F_{em} v; V_i = ei + i^2 R$$

Igualdade entre as potências convertidas, sob a convenção de sinais. A potência da fonte não é toda convertida quando R e i são não nulos.

EXEMPLO 8 · Motor e balanço de potência

$V = 24 \text{ V}$, $R = 2 \Omega$, $B = 0,5 \text{ T}$ e $\ell = 0,4 \text{ m}$. Sob carga de 1 N , $i = 1/(0,5 \times 0,4) = 5 \text{ A}$. Logo $e = 24 - 2 \times 5 = 14 \text{ V}$ e $v = 14/0,2 = 70 \text{ m/s}$. A fonte entrega 120 W , a resistência dissipa 50 W e a conversão fornece 70 W . É um modelo didático, não dimensionamento de uma máquina real.

EXEMPLO 9 · Regeneração com o mesmo sentido de movimento

Nos mesmos parâmetros, uma força externa mantém $v = 140 \text{ m/s}$. Então $e = 28 \text{ V}$ e $i = (24 - 28)/2 = -2 \text{ A}$. A força eletromagnética é $-0,4 \text{ N}$. Entram mecanicamente 56 W , dos quais 8 W são perdidos em R e 48 W retornam à fonte. O modelo pressupõe que a fonte aceite essa potência.

Uma carga pode ser uma mola ideal. A lei de Hooke fornece a força restauradora $F_{\text{mola}} = -kx$, em que x é o deslocamento em relação ao comprimento natural e k , a constante elástica em N/m . O sinal indica oposição ao deslocamento. No equilíbrio, a barra está parada: $e = 0$, $i = V/R$ e o módulo da força elástica iguala $Bi\ell$.

Barra com mola em equilíbrio

$$k\Delta x = Bi\ell; B = k\Delta x/(i\ell)$$

Use módulos positivos no equilíbrio estático. Δx e ℓ em metros; k em N/m ; i em ampères.

EXEMPLO 10 · Da mola ao campo

Uma barra de $0,20 \text{ m}$ conduz 3 A e estica uma mola de 30 N/m em 2 cm . A força restauradora tem módulo $30 \times 0,02 = 0,60 \text{ N}$. No equilíbrio, $B = 0,60/(3 \times 0,20) = 1 \text{ T}$. Esse cálculo usa a corrente final, quando a velocidade e a fem de movimento são nulas.

5 · Espira girante: tensão e conjugado

Uma espira girando num campo uniforme permite enxergar a origem da tensão alternada. Estator é a parte estacionária; rotor, a parte móvel. Considere uma espira retangular com área $A = 2r\ell$, girando a velocidade ω constante. Os dois lados ativos de comprimento ℓ cortam o campo em sentidos opostos, mas suas tensões se somam no percurso da espira. Os lados de retorno não contribuem para a fem terminal nesse modelo ideal.

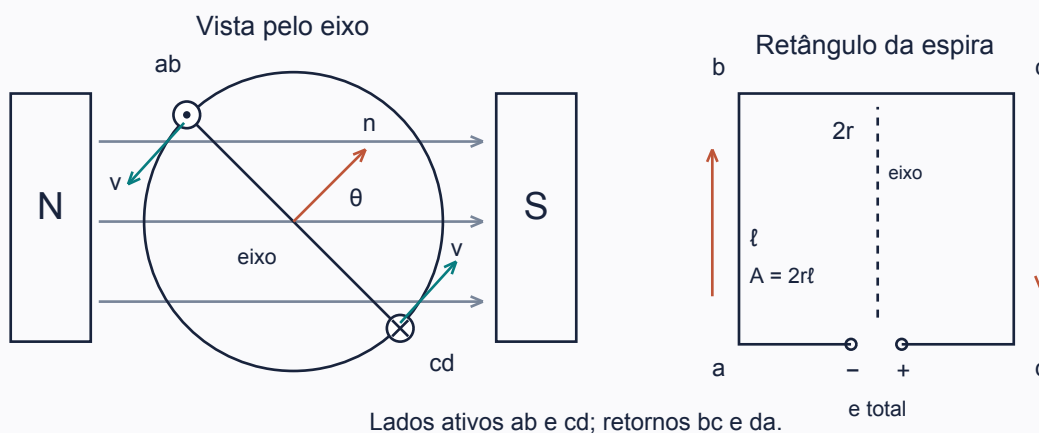


Figura 7 · Espira em rotação entre N e S. Pontos e cruzes indicam fem para fora e para dentro da página; as setas vermelhas orientam a fem nos lados ativos.

Gerador elementar

$$\Phi(t) = BA \cos(\omega t); e(t) = NBA\omega \sin(\omega t)$$

$\theta = \omega t$ é medido entre a normal à espira e B ; N espiras idênticas. Em uma espira, $N = 1$.

Quando o fluxo pela espira é máximo, sua taxa de variação e a tensão são zero. Quando a normal fica perpendicular ao campo, o fluxo é zero e o módulo da tensão é máximo. Essa relação evita decorar figuras sem compreender a orientação. Tensão gerada depende do fluxo, da velocidade e da construção do enrolamento; carga e corrente são outras condições do circuito.

EXEMPLO 11 · Uma bobina em rotação

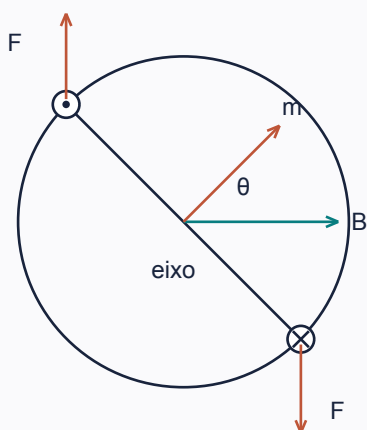
Para $N = 50$, $B = 0,20$ T, $A = 0,010$ m² e $\omega = 100$ rad/s, a amplitude é $\hat{E} = NBA\omega = 10$ V e o eficaz é $10/\sqrt{2} \approx 7,07$ V. Com $\theta = 30^\circ$, a tensão instantânea é 5 V; com $\theta = 90^\circ$, é 10 V.

No funcionamento como motor, a corrente nos lados ativos produz forças opostas, formando um binário. As duas forças podem somar zero como força de translação e ainda produzir torque resultante não nulo. Seus momentos em torno do eixo têm o mesmo sentido. Já os lados de retorno têm contribuição nula ao torque em torno do eixo do modelo.

Torque de uma bobina

$$\tau = m \times B; m = NiA n; |\tau| = NiAB \sin \theta$$

n é a normal unitária orientada pela regra da mão direita. θ é o ângulo entre o momento magnético m e B .



Forças opostas: força total zero.

Momentos com o mesmo sentido.

τ tende a alinhar m com B .

No desenho: torque horário.

O sentido muda se i se inverter.

Figura 8 · Momento magnético e campo: o torque tende a alinhar a normal orientada da espira com B .

EXEMPLO 12 · Torque máximo e posição de equilíbrio

$N = 20$, $i = 3$ A, $A = 0,015$ m² e $B = 0,40$ T dão $\tau_{\text{máx}} = 0,36$ N·m. Com $\theta = 30^\circ$, $\tau = 0,18$ N·m. Em $\theta = 0^\circ$, o torque é zero. Não use a direção de uma força isolada para concluir o sentido dos dois momentos.

No modelo de dois campos, a mesma ideia é escrita como $\tau = k(B_{\text{rotor}} \times B_{\text{estator}})$, com k dependente da geometria. O módulo é proporcional ao seno do ângulo entre os campos. Campo girante e estratégias de comutação permitem sustentar o torque; uma espira CC em um campo fixo não continua produzindo torque de mesmo sentido indefinidamente.

6 · Campo girante e velocidade síncrona

Três correntes senoidais equilibradas, defasadas 120° no tempo, alimentando enrolamentos simétricos separados 120° elétricos no espaço, produzem um campo resultante de módulo constante e direção girante. Cada fase, isoladamente, produz uma componente pulsante. A soma vetorial das três componentes é que cria o campo girante. O eixo magnético de cada fase é normal ao plano de sua bobina, orientado pela mão direita para corrente positiva. Na figura, a, b e c nomeiam esses eixos magnéticos, e não a posição de um condutor isolado.

Correntes e eixos espaciais

$$i_a = \hat{I} \sin \omega t; \quad i_b = \hat{I} \sin(\omega t - 120^\circ); \\ i_c = \hat{I} \sin(\omega t - 240^\circ)$$

Eixos espaciais das fases a, b, c em 0° , 120° e 240° elétricos, respectivamente.

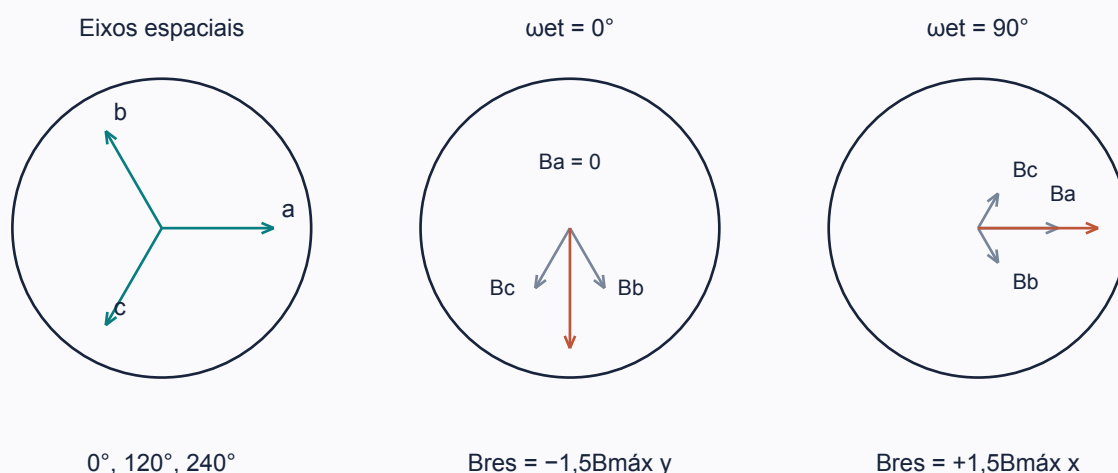


Figura 9 · Eixos das fases e soma dos campos nos instantes $\omega t = 0^\circ$ e 90° .

Com a convenção indicada, em $\omega t = 0^\circ$ a componente a é nula, b tem coeficiente $-\sqrt{3}/2$ e c tem $+\sqrt{3}/2$. Somando as projeções, o resultado é $-1,5B_{máx}$ na direção y. Em $\omega t = 90^\circ$, os coeficientes são 1, $-1/2$ e $-1/2$, e o resultado é $+1,5B_{máx}$ na direção x. Em ambos os casos o módulo é igual; a orientação avançou 90° .

Campo resultante ideal

$$B_{res} = 1,5B_{máx} [\sin(\omega t)x - \cos(\omega t)y]$$

x e y são vetores unitários. $B_{máx}$ é a amplitude da componente fundamental de uma fase. Válido para sistema e enrolamentos equilibrados do modelo.

Permutar duas fases inverte a sequência e o sentido do campo girante. Não é necessário permutar as três. Trocar apenas rótulos sem alterar a ligação física não modifica a máquina. O rotor síncrono acompanha o campo em regime; o rotor de indução em operação motora gira normalmente abaixo dele, pois precisa de velocidade relativa para induzir corrente.

Relações elétricas e mecânicas

$$\theta_e = (p/2)\theta_m; \quad \omega_e = (p/2)\omega_m; \quad n_s = 120f/p$$

p é o número total de polos, sempre par; f em Hz; ns em rpm. Não substituir p por pares de polos sem mudar a fórmula.

Velocidades do campo a 60 Hz

Polos p	Pares p/2	ns [rpm]
2	1	3.600
4	2	1.800
6	3	1.200
8	4	900
12	6	600
24	12	300

EXEMPLO 13 · Ângulo elétrico não é ângulo mecânico

Em seis polos, $p/2 = 3$. Uma separação de 120° elétricos corresponde a $120^\circ/3 = 40^\circ$ mecânicos. A cada volta mecânica ocorrem três ciclos elétricos. Em quatro polos, a mesma separação elétrica corresponde a 60° mecânicos.

EXEMPLO 14 · Do campo à alimentação

Para um gerador de oito polos girando a 750 rpm, $f = pn/120 = 8 \times 750/120 = 50$ Hz. Mantendo oito polos e elevando a velocidade para 900 rpm, a frequência passa a 60 Hz.

O entreferro separa rotor e estator, permitindo a rotação sem contato. Ele aumenta a relutância do caminho magnético; isso não significa, por si só, dissipação de potência ativa no ar. No rotor cilíndrico, o entreferro é aproximadamente uniforme. No de polos salientes, varia com a posição angular. A distribuição senoidal de campo é uma hipótese de projeto/modelagem, não consequência automática de qualquer cilindro.

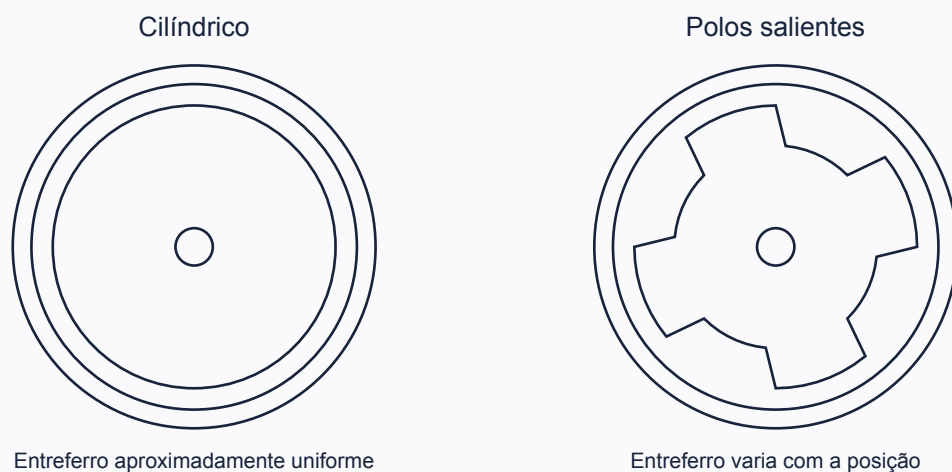
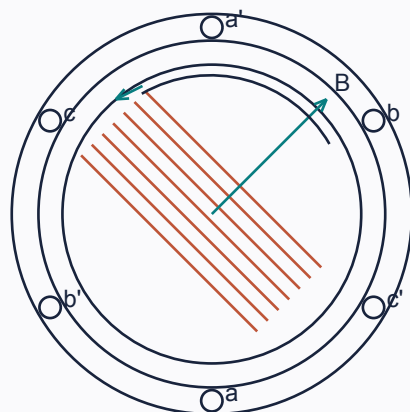


Figura 10 · Rotor cilíndrico e rotor de polos salientes: a diferença está no perfil do entreferro.

7 · Geração trifásica e ligações

Na construção usual do gerador síncrono com rotor bobinado, a corrente CC de campo cria o campo do rotor. Uma máquina primária aplica torque e o faz girar. O fluxo visto por cada enrolamento fixo do estator varia no tempo, induzindo três tensões defasadas. A corrente de campo pode ser contínua e, ainda assim, o fluxo visto pelo estator variar por causa da rotação.



Rotor: enrolamento excitado em CC

Estator: três enrolamentos fixos

ω_m : giro mecânico

$\omega_e = (p/2)\omega_m$

Entreferro: espaço entre as partes

Figura 11 · Enrolamentos do estator separados no espaço e rotor excitado em movimento.

A designação “síncrona” não deve ser reduzida a “sempre exige fonte CC externa”: existem máquinas com ímãs permanentes e outros sistemas de excitação. Para a máquina bobinada aqui modelada, a excitação produz o fluxo e o movimento fornece a energia mecânica convertida. A ausência de escovas em um sistema brushless também não significa ausência de excitação.

Tensões de fase equilibradas

$$\begin{aligned} e_a &= \hat{E} \sin \omega_e t; \quad e_b = \hat{E} \sin(\omega_e t - 120^\circ); \\ e_c &= \hat{E} \sin(\omega_e t - 240^\circ); \quad E_{\text{fase}} \approx 4,44 f N \Phi_{\text{máx}} \end{aligned}$$

Modelo senoidal e enrolamento ideal. Em um enrolamento distribuído real, pode ser necessário o fator de enrolamento k_w .

Fase e linha em ligação equilibrada

Ligação	Tensão	Corrente
Estrela (Y)	$V_L = \sqrt{3} V_{\text{fase}}$	$I_L = I_{\text{fase}}$
Triângulo (Δ)	$V_L = V_{\text{fase}}$	$I_L = \sqrt{3} I_{\text{fase}}$

A tensão entre duas linhas na estrela é uma diferença fasorial, não a soma aritmética de dois valores eficazes. Por isso aparece $\sqrt{3}$. No triângulo, cada bobina fica diretamente entre duas linhas. Essas relações descrevem a ligação; não autorizam afirmar que a mesma máquina produzirá a mesma potência em qualquer tensão ou ligação.

EXEMPLO 15 · Da bobina aos terminais

Três bobinas idênticas geram 127 V eficazes cada. Em estrela, a tensão entre linhas é $\sqrt{3} \times 127 \approx 220$ V. Em triângulo, é 127 V. Se a corrente de cada bobina for 10 A, as correntes de linha são 10 A em estrela e cerca de 17,32 A em triângulo, respeitadas as condições de operação.

O conjugado eletromagnético resulta da interação entre os campos de rotor e estator. No motor ele sustenta a carga; no gerador atua como reação resistente à máquina primária. O valor τ_w corresponde à conversão eletromecânica interna. Para encontrar a potência útil nos terminais ou no eixo, as perdas ainda precisam ser descontadas.



8 · Perdas, rendimento e potência aparente

O rendimento compara grandezas de mesma natureza energética: potência útil de saída dividida pela potência total de entrada. No motor, a saída é mecânica; no gerador, é elétrica. A potência aparente, em VA, não pode ser colocada diretamente no denominador do rendimento: antes obtenha a potência ativa com o fator de potência.

Conservação de energia e rendimento

$$P_{\text{entrada}} = P_{\text{saída}} + P_{\text{perdas}}; \eta = P_{\text{saída}} / P_{\text{entrada}}$$

η é uma fração; multiplique por 100 para expressar em %. Declare se a alimentação de campo está incluída no balanço.

Entrada elétrica senoidal

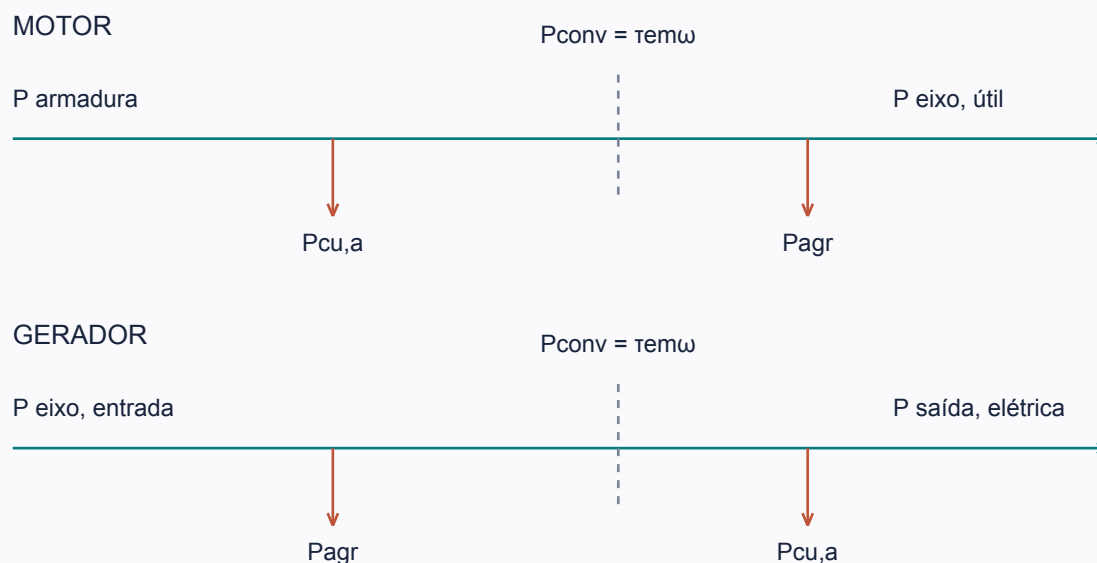
$$P = S \cos \varphi; S_{3f} = \sqrt{3} V_L I_L; P_{3f} = 3 V_{\text{fase}} I_{\text{fase}} \cos \varphi$$

Sistema trifásico equilibrado. Para alimentação distorcida, fator de potência total não se resume ao cosseno de defasagem.

Onde a potência se perde

Categoria	Origem e cálculo
Cobre dos enrolamentos	Aquecimento resistivo. Em três fases equilibradas, $P_{cu} = 3 I_{\text{fase}}^2 R_{\text{fase}}$. No campo CC, $P_{\text{campo}} = I_f^2 R_f$.
Ferro ou núcleo	Histerese e correntes parasitas; dependem do material, fluxo e frequência. Não há um expoente universal válido para todas as perdas de núcleo.
Mecânicas	Atrito em mancais e perdas de ventilação. Não confundir com potência útil entregue à carga.
Suplementares	Efeitos adicionais associados à operação. Percentuais fixos são aproximações declaradas, não uma identidade física.

Para localizar a conversão, adotaremos um balanço em regime permanente com excitação independente. P_{cu} representa apenas perdas no cobre da armadura. P_{agr} reúne perdas de ferro, mecânicas e suplementares no lado mecânico da fronteira $P_{conv} = \tau \omega$. Esse agrupamento contábil permite usar o mesmo diagrama nos dois sentidos; perdas de ferro continuam sendo magnéticas, e não atrito.



Excitação independente P_f : adicionar à entrada total, uma única vez.

Figura 12 · Fronteira de conversão: $P_{conv} = \tau \omega$. P_{agr} agrupa ferro, mecânicas e suplementares; a excitação independente entra separadamente no rendimento.

Balanço pela fronteira de conversão

Operação	Equações em regime
Motor	$P_{armadura} = P_{cu,a} + P_{conv}$; $P_{conv} = P_{eixo,útil} + P_{agr}$.
Gerador	$P_{eixo,entrada} = P_{agr} + P_{conv}$; $P_{conv} = P_{saída,elétrica} + P_{cu,a}$.
Excitação independente	Motor: $P_{entrada,total} = P_{armadura} + P_f$. Gerador: $P_{entrada,total} = P_{eixo,entrada} + P_f$.

P_f é a potência ativa fornecida ao circuito de campo separado. Em campo CC estacionário ideal, sem perdas adicionais da excitatriz, $P_f = I_f^2 R_f$. Ela entra uma única vez no balanço total e não está incluída em $P_{cu,a}$ nem em P_{agr} . Se a excitação for obtida do próprio eixo ou dos terminais, redesenhe essa porta interna para evitar contagem dupla.

A resistência do fio pertence ao cálculo de perdas de cobre; a permeabilidade pertence ao circuito magnético. Aumentar a resistência dos enrolamentos aumenta $i^2 R$ para a mesma corrente. Já aumentar a resistividade do material do núcleo pode reduzir as correntes parasitas. São percursos elétricos diferentes, que não podem ser tratados como se fossem o mesmo componente.

EXEMPLO 16 · Motor: ativa, aparente e útil

Um motor entrega 9 kW no eixo com $\eta = 0,90$ e fator de potência 0,80. A entrada ativa é $9/0,90 = 10$ kW. A aparente é $10/0,80 = 12,5$ kVA. As perdas são 1 kW. Dividir 9 kW por 12,5 kVA daria 0,72, que não é o rendimento do motor.

EXEMPLO 17 · Corrente de fase no cobre

Em triângulo, com $I_{linha} = 30$ A e $R_{fase} = 0,20 \Omega$, $I_{fase} = 30/\sqrt{3}$ A. Logo $P_{cu} = 3 \times (30/\sqrt{3})^2 \times 0,20 = 180$ W. Usar diretamente 30 A em cada fase produziria 540 W, três vezes o valor correto.

**EXEMPLO 18 · Gerador: localizar conversão e excitação**

Um gerador recebe 25 kW no eixo. Com $P_{\text{agr}} = 1,2$ kW, $P_{\text{conv}} = 25 - 1,2 = 23,8$ kW. Se $P_{\text{cu,a}} = 0,8$ kW, saem 23 kW elétricos. A excitação independente consome ainda 0,4 kW: $\eta = 23/(25 + 0,4) \approx 90,55\%$. O balanço total fecha: $25,4 = 23 + 1,2 + 0,8 + 0,4$ kW. Ignorar P_f daria 92%, rendimento de outra fronteira.

9 · Regulação e leitura de condições de operação

Regulação mede a variação de uma grandeza entre vazio e carga, sob condições definidas. Rendimento mede aproveitamento energético. Uma máquina pode ter bom rendimento e variação apreciável de tensão; portanto, os indicadores não são intercambiáveis. O denominador das expressões abaixo é o valor a plena carga.

Regulação de tensão

$$RT = (V_{\text{vazio}} - V_{\text{plena carga}}) / V_{\text{plena carga}} \times 100\%$$

Compare tensões sob a mesma referência de velocidade e excitação. A natureza da carga pode afetar o sinal.

Regulação de velocidade

$$RV = (n_{\text{vazio}} - n_{\text{plena carga}}) / n_{\text{plena carga}} \times 100\%$$

Compare o mesmo motor sob as condições de alimentação e controle especificadas.

EXEMPLO 19 · A escolha do denominador

Um gerador apresenta 242 V a vazio e 220 V a plena carga: $RT = (242 - 220)/220 \times 100\% = 10\%$. Dividir por 242 V resultaria em 9,09%, que responde a outra definição. Um motor passa de 1.800 para 1.728 rpm: $RV = 72/1.728 \times 100\% \approx 4,17\%$.

Regulação de tensão pode ser negativa em determinadas condições de carga: por exemplo, 210 V a vazio e 220 V carregado dão $RT \approx -4,55\%$. O sinal informa o sentido da variação, não uma violação da conservação de energia. Pequena regulação significa pouca variação da grandeza comparada; avaliar qualidade exige também observar aplicação, limites térmicos, rendimento e estabilidade.

Antes de aplicar uma expressão

Pergunta	Por que importa
É motor ou gerador?	Define qual porta fornece energia e qual entrega potência útil.
O fluxo é máximo, eficaz ou instantâneo?	Determina o uso correto de 4,44 e $\sqrt{2}$.
A velocidade é elétrica, mecânica ou rpm?	Determina o fator $p/2$ e a conversão $2\pi/60$.
Tensão/corrente são de fase ou linha?	Define as relações de estrela/triângulo e as perdas.
As perdas e a excitação foram incluídas?	Evita misturar potência convertida com potência útil.
Qual ângulo foi definido?	O seno da força e o cosseno do fluxo usam ângulos diferentes.



Quadro-síntese

Pista e regra de decisão

Pista	Regra
Rotação dada em rpm	$\omega = 2\pi n/60$; $P = \tau\omega$.
Bobina e núcleo linear	$Hl \approx Ni$; $B = \mu H$; $\Phi = BA$ quando B é normal à seção.
Fluxo variável	$e = -d\lambda/dt$; para senoide, $E_{rms} \approx 4,44fN\Phi_{m\acute{a}x}$.
Corrente em campo	$F = i(l \times B)$; módulo $Bi l \sin \gamma$.
Barra em movimento	$e = (v \times B) \cdot l$; $i = (V - e)/R$.
Espira motora	$\tau = NiAB \sin \theta$, θ entre a normal orientada e B .
Trifásico e polos	$B_{resultante} = 1,5B_{m\acute{a}x}$; $n_s = 120f/p$.
Grandeza de fase/linha	Y : $V_L = \sqrt{3}V_{fase}$; Δ : $I_L = \sqrt{3}I_{fase}$.
Rendimento	$\eta = P_{saída}/P_{entrada}$; entrada ativa = $S \times$ fator de potência.
Regulação	Diferença vazio – plena carga dividida pelo valor a plena carga.

As sete armadilhas da aula

- 1. Módulo sem direção.** Usar $Bi l$ e esquecer o produto vetorial pode inverter a resposta. *Bloco 4; questão 1.*
- 2. Laminação não é histerese.** A técnica combate principalmente correntes parasitas. *Bloco 3; questão 2.*
- 3. Barra em equilíbrio.** A fem de movimento é zero quando a barra para; a mola equilibra a força. *Bloco 4; questão 3.*
- 4. kVA não é kW.** Rendimento usa potência ativa na entrada. *Bloco 8; questão 4.*
- 5. Polos não são pares.** A fórmula com 120 usa o número total de polos. *Bloco 6; questão 5.*
- 6. Área precisa ser convertida ao quadrado.** 1 cm^2 corresponde a 10^{-4} m^2 . *Bloco 2; questão 6.*
- 7. Fem não exige corrente circulando.** Circuito aberto pode apresentar tensão induzida. *Bloco 3; questão 7.*



Antes da prova, responda sem consultar

Autoavaliação

Pergunta	Bloco
Como converter rpm em rad/s antes de calcular potência?	1
Pode haver rotação sem torque resultante?	1
O que diferencia H, B, Φ e λ ?	2
Qual ângulo entra no cosseno do fluxo?	2
A lei de Lenz se opõe ao fluxo ou à sua variação?	3
Quais hipóteses permitem usar a constante 4,44?	3
Como determinar o sentido de F e a polaridade de e?	4
Como a barra passa de motor a gerador sem inverter o movimento?	4
Por que as forças da espira produzem um binário?	5
Por que 120° elétricos correspondem a 40° mecânicos em seis polos?	6
Como passar da tensão da bobina para a tensão de linha?	7
Como distinguir rendimento, fator de potência e regulação?	8



Bateria de questões

Oito questões reais, com prioridade à CESGRANRIO, treinam força magnética, indução, unidades, velocidade e rendimento. Resolva sem consultar os comentários. Os valores e recortes históricos dos enunciados foram preservados.

QUESTÃO 01 — CESGRANRIO — TRANSPETRO — Engenharia Elétrica — 2023

Considere um condutor elétrico de comprimento igual a 0,5 m, instalado no eixo y de um sistema cartesiano. O condutor é percorrido por uma corrente elétrica de 10 A que se desloca no sentido positivo do eixo y . Esse mesmo condutor encontra-se em uma região do espaço na qual a densidade de fluxo magnético é de 2 T e que aponta para dentro do plano da página. Diante do exposto, constata-se que a força induzida no condutor é

- A) 10 N (apontando para a direção positiva do eixo x).
- B) 10 N (apontando para a direção negativa do eixo x).
- C) 20 N (apontando para a direção positiva do eixo x).
- D) 20 N (apontando para a direção negativa do eixo x).
- E) 10 N (apontando para a direção positiva do eixo y).

Minha resposta: _____

QUESTÃO 02 — CESGRANRIO — TRANSPETRO — Engenharia Elétrica — 2023

Os transformadores são máquinas elétricas estáticas que transferem energia elétrica do primário para o secundário, por meio de um circuito magnético. Com o intuito de aumentar o rendimento da máquina, uma técnica empregada em sua construção é a laminação do núcleo do transformador. Essa técnica de construção é empregada para diminuir as perdas por

- A) histerese
- B) capacitância de fuga
- C) indutância mútua
- D) correntes parasitas
- E) permeabilidade

Minha resposta: _____

QUESTÃO 03 — CESGRANRIO — UNIRIO — 2019

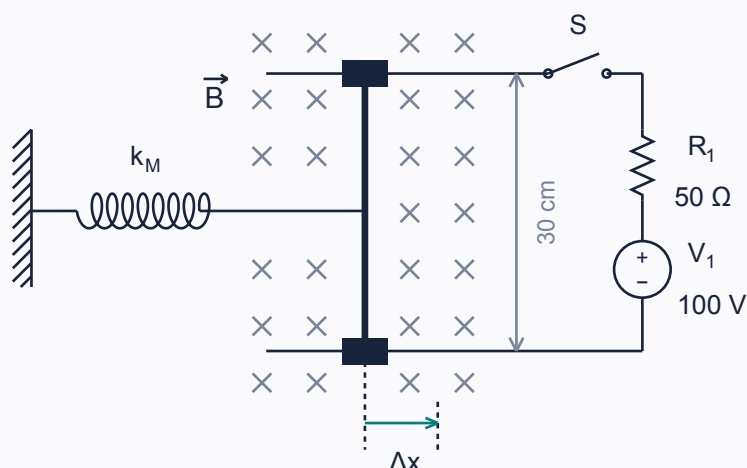
Um aparato experimental, usado para medir a intensidade de campo magnético, é ilustrado na Figura abaixo.

Nesse aparato, há dois trilhos condutores paralelos na horizontal, por onde uma barra condutora vertical de 30 cm de comprimento pode deslizar, com força de atrito desprezível, mantendo sempre o contato elétrico com eles.

Essa barra vertical está conectada a uma mola ideal que apresenta uma constante elástica $k_M = 20 \text{ N/m}$.

Nesse esquema, quando a chave S do circuito é fechada, observa-se que a barra vertical se desloca por uma distância $\Delta x = 1,5 \text{ cm}$, em relação à posição inicial em que a mola estava relaxada.

Considerando-se que o aparato está imerso em um campo magnético B uniforme, qual será, em Tesla, a intensidade desse campo?



Dados da figura: fonte de 100 V, resistor de 50Ω , barra de 30 cm, chave S e mola k_M ; B entra na página.

- A) 0,3
- B) 0,4
- C) 0,5
- D) 0,6
- E) 1

Minha resposta: _____

QUESTÃO 04 — CESGRANRIO — UNIRIO — 2019

Uma linha de produção é composta por quatro motores de indução monofásicos, operando em condições nominais. Cada motor tem potência nominal de 2 cv e fator de potência nominal de 0,8. A potência medida na saída do ramal que alimenta os motores é 10 kVA. Adotando-se 1 cv igual a 750 W, o valor do rendimento, em %, da linha de produção é

- A) 68
- B) 70
- C) 75
- D) 80
- E) 84

Minha resposta: _____

**QUESTÃO 05 — CESGRANRIO — LIQUIGÁS — 2015**

Uma turbina está acoplada ao eixo do rotor de um gerador síncrono. Para que a velocidade de rotação do eixo da turbina seja de 300 rpm sob frequência de tensão de 60Hz, o número de polos do gerador deve ser:

- A) 12.
- B) 16.
- C) 18.
- D) 20.
- E) 24.

Minha resposta: _____

QUESTÃO 06 — FCC — Tribunal Regional da 3ª Região — 2016

Considere um material ferromagnético com secção (área) transversal de 1 [cm²], no qual existe um fluxo magnético perpendicular de 20×10^{-3} [Wb]. Nessa situação, a densidade de fluxo magnético é, em [Gauss],

- A) $2 \cdot 10^2$.
- B) $5 \cdot 10^{-2}$.
- C) $2 \cdot 10^4$.
- D) $5 \cdot 10^2$.
- E) $2 \cdot 10^6$.

Minha resposta: _____

QUESTÃO 07 — FGV — Prefeitura de Caraguatatuba — 2024

A indução eletromagnética e a consequente força eletromotriz induzida ocorrem quando um condutor imerso em uma região de fluxo de campo magnético oscilante é percorrido por uma corrente elétrica induzida.

Esse princípio tem grande aplicação na indústria como, por exemplo, nos

- A) diodos.
- B) resistores.
- C) capacitores.
- D) transistores.
- E) geradores de corrente alternada.

Minha resposta: _____

QUESTÃO 08 — AOCP — Instituto Técnico Científico de Perícia — RN — 2018

Dada a seguinte equação, no que se refere aos campos magnetostáticos, é correto afirmar que a questão abaixo se trata da lei

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} = I$$

- A) de Coulomb das correntes.
- B) de Maxwell-Faraday.
- C) da superposição de campos magnetostáticos.
- D) das correntes de Biot-Savart-Ampère, de 1831.
- E) circuital de Ampère.

Minha resposta: _____



Resolução comentada

Os comentários retomam o bloco teórico e explicam por que as outras alternativas não atendem ao enunciado.

QUESTÃO 01 — Bloco 4 do resumo

Resposta: B. O módulo é $Bi\ell = 2 \times 10 \times 0,5 = 10 \text{ N}$, pois fio e campo são perpendiculares. Para o sentido, $+y \times (-z) = -x$. A acerta o módulo, mas inverte o sentido; C e D dobram indevidamente a força; E coloca a força ao longo do fio, contrariando o produto vetorial.

QUESTÃO 02 — Bloco 3 do resumo

Resposta: D. A divisão em chapas isoladas interrompe grandes trajetórias condutoras no núcleo e reduz correntes parasitas. Histerese é outro mecanismo de perda, ligado ao ciclo de magnetização. Capacitância, indutância mútua e permeabilidade não são as perdas dissipativas nomeadas pela técnica. A palavra que decide é laminação.

QUESTÃO 03 — Bloco 4 do resumo

Resposta: C. No equilíbrio final, a barra está parada e a fem de movimento é nula. A corrente é $100/50 = 2 \text{ A}$. A força elástica é $k\Delta x = 20 \times 0,015 = 0,30 \text{ N}$. Igualando-a a $Bi\ell$: $B = 0,30/(2 \times 0,30) = 0,50 \text{ T}$. As outras alternativas não satisfazem simultaneamente o circuito elétrico e o equilíbrio mecânico. Converter centímetros antes da conta evita fatores 10 e 100.

QUESTÃO 04 — Bloco 8 do resumo

Resposta: C. A potência útil total é $4 \times 2 \times 750 = 6.000 \text{ W}$. A entrada ativa é $10.000 \times 0,8 = 8.000 \text{ W}$. Logo $\eta = 6.000/8.000 = 0,75$, ou 75%. Os 10 kVA representam potência aparente; usá-los diretamente daria 60%, e tomar 0,8 como rendimento confundiria fator de potência com eficiência.

QUESTÃO 05 — Bloco 6 do resumo

Resposta: E. O rotor do gerador síncrono e o campo giram em sincronismo. De $n = 120f/p$, vem $p = 120 \times 60/300 = 24$ polos. São 12 pares de polos; a alternativa A explora essa confusão. As demais contagens não produzem simultaneamente 60 Hz e 300 rpm.

QUESTÃO 06 — Bloco 2 do resumo

Resposta: E. A área é 10^{-4} m^2 . Assim, $B = \Phi/A = 20 \times 10^{-3}/10^{-4} = 200 \text{ T}$. Como $1 \text{ T} = 10^4 \text{ gauss}$, $B = 2 \times 10^6 \text{ gauss}$. A para na unidade tesla; as demais não conservam as conversões. O valor imposto pelo enunciado é muito elevado para um núcleo ferromagnético usual; a questão é de conversão de unidades, não de dimensionamento físico.

QUESTÃO 07 — Bloco 3 do resumo

Resposta: E. O gerador converte energia mecânica em elétrica pela variação do fluxo concatenado. Diodos e transistores se baseiam em estruturas semicondutoras; resistores dissipam energia; capacitores armazenam energia no campo elétrico. A fem pode existir mesmo em circuito aberto, sem corrente: não transforme a redação introdutória da questão em requisito geral para a lei de Faraday.

QUESTÃO 08 — Bloco 2 do resumo

Resposta: E. A circulação de H em um caminho fechado igual à corrente que atravessa a superfície delimitada é a lei circuital de Ampère no regime magnetostático. Maxwell-Faraday envolve campo elétrico e variação de fluxo magnético. Biot-Savart calcula contribuições de corrente ao campo, em outra forma. Superposição é uma propriedade do modelo linear, não o nome dessa equação.



Gabarito rápido

Questão	1	2	3	4	5	6	7	8
Resposta	B	D	C	C	E	E	E	E