

MÁQUINAS ELÉTRICAS II

Larissa de Matos Guedes
Pedro Augusto do Nascimento
Thiago Moreira Brito

CONTROLE E PROCESSOS INDUSTRIAIS

MÁQUINAS ELÉTRICAS II

Larissa de Matos Guedes
Pedro Augusto do Nascimento
Thiago Moreira Brito

CONTROLE E PROCESSOS INDUSTRIAIS



Autores

Larissa de Matos Guedes

Possui Curso Técnico Profissionalizante em Eletrotécnica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás (1997). Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Goiás (2004), graduação em Programa de Formação de Professores pela Universidade Católica de Brasília (2008), mestrado (2006) e doutorado (2013) em Engenharia Elétrica, ambos, pela Universidade de Brasília. Atualmente é professora da Secretaria de Educação do Distrito Federal. Tem experiência na área de engenharia elétrica, com ênfase em sistemas elétricos de potência.

Pedro Augusto do Nascimento

Nasceu em 1984 em Goiânia, Goiás. cursou Licenciatura em Física pela Universidade Católica de Brasília (2008), atuou como professor de física em escolas de Ensino Médio e cursos pré-vestibulares no Distrito Federal e em Minas Gerais até 2012. Durante esse período, também, trabalhou como professor de laboratório. Atualmente é professor no curso de Eletrotécnica na Escola Técnica de Brasília.

Thiago Moreira Brito

Nasceu em 1979 em Goiânia, Goiás. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Goiás (2003). É especialista em Docência Superior pela Universidade Gama Filho. Atualmente é professor titular do Centro Universitário Euro Americana e professor formador na Rede e-Tec Brasil do MEC.

Design Instrucional

NT Editora

Projeto Gráfico

NT Editora

Revisão

NT Editora

Capa

NT Editora

Edição Eletrônica

NT Editora

Ilustração

Marcelo Moraes

NT Editora, uma empresa do Grupo NT

SCS Quadra 2 – Bl. C – 4º andar – Ed. Cedro II

CEP 70.302-914 – Brasília – DF

Fone: (61) 3421-9200

sac@grupont.com.br

www.nteditora.com.br e www.grupont.com.br

Guedes, Larissa de Matos; Nascimento, Pedro Augusto do; Brito, Thiago Moreira.

Máquinas elétricas II / Larissa de Matos Guedes; Pedro Augusto do Nascimento; Thiago Moreira Brito. – 1. ed. – Brasília: NT Editora, 2015.

152 p. il. ; 21,0 X 29,7 cm.

ISBN 978-85-8416-079-2

1. Máquinas elétricas. 2. Geradores.

I. Título

Copyright © 2015 por NT Editora.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida por qualquer modo ou meio, seja eletrônico, fotográfico, mecânico ou outros, sem autorização prévia e escrita da NT Editora.

ÍCONES

Prezado(a) aluno(a),

Ao longo dos seus estudos, você encontrará alguns ícones na coluna lateral do material didático. A presença desses ícones o(a) ajudará a compreender melhor o conteúdo abordado e também como fazer os exercícios propostos. Conheça os ícones logo abaixo:



Saiba Mais

Esse ícone apontará para informações complementares sobre o assunto que você está estudando. Serão curiosidades, temas afins ou exemplos do cotidiano que o ajudarão a fixar o conteúdo estudado.



Importante

O conteúdo indicado com esse ícone tem bastante importância para seus estudos. Leia com atenção e, tendo dúvida, pergunte ao seu tutor.



Dicas

Esse ícone apresenta dicas de estudo.



Exercícios

Toda vez que você vir o ícone de exercícios, responda às questões propostas.



Exercícios

Ao final das lições, você deverá responder aos exercícios no seu livro.

Bons estudos!

Sumário

1. FUNDAMENTOS DA CONSERVAÇÃO ELETROMECÂNICA DE ENERGIA.....	7
1.1 Conservação da Energia	7
1.2 Motores e geradores	10
1.3 Equilíbrio	12
1.4 Centro de Massa	13
1.5 Torque.....	17
1.6 Equilíbrio Rotacional	21
2. MÁQUINAS DE CORRENTE CONTÍNUA	31
2.1 Revisão de indução eletromagnética	33
2.2 Princípio de funcionamento dos motores elétricos	38
2.3 Comutador.....	40
2.4 Torque – velocidade	47
2.5 Controle de velocidade.....	48
3. MÁQUINAS DE CORRENTE ALTERNADA - MÁQUINAS ASSÍNCRONAS	56
3.1 Nomenclaturas.....	58
3.2 Princípios de funcionamento.....	66
3.3 Placa de identificação	74
3.4 Esquemas de ligação.....	76
4. MÁQUINAS DE CORRENTE ALTERNADA - MÁQUINAS SÍNCRONAS	81
4.1 Princípio de funcionamento.....	82
4.2 Controle do fator de potência	92
4.3 Diagramas fasorial e circuito equivalente	93
4.4 Aplicação	95
5. OUTROS MOTORES	103
5.1 Fontes de alimentação	105
5.2 Motor universal	107
5.3 Motor linear	109
5.4 Tipo de rotor	111
5.5 Mecanismos de partida.....	114
5.6 Motores de passo	119
6. GERADORES.....	126
6.1 Princípio de funcionamento.....	127
6.2 Gerador síncrono.....	140
6.3 Comportamento do gerador em vazio e sobre carga.....	141
6.4 Conversores de frequência rotativos e estáticos	142

Seja bem-vindo ao curso **Máquinas Elétricas II**.

Os motores elétricos são máquinas largamente utilizadas desde os eletrodomésticos até em processos de automação das indústrias. O eletrotécnico é o profissional capacitado, capaz de: operar, comprar, instalar e fazer a manutenção nos motores e geradores elétricos.

Essa disciplina tem como objetivo capacitar o aluno a trabalhar com essas máquinas elétricas. Ao final do curso, você irá conhecer os princípios de funcionamento, aprender a identificar os tipos de motores e geradores e suas principais partes, além de conhecer um pouco sobre a manutenção desses aparelhos. Pretende-se que o estudante tenha segurança ao trabalhar direta ou indiretamente com as máquinas e o conhecimento de como se capacitar ou atualizar nesse tema.

Ao longo desse curso, nosso colega de turma Nikola, nos acompanhará.

Bons estudos!

Os autores.

Estou muito ansioso por esse curso, quero aprender bastante.



1. FUNDAMENTOS DA CONSERVAÇÃO ELETROMECAÂNICA DE ENERGIA

Objetivos

Ao final desta lição, você deverá ser capaz de:

- Definir o que é a lei de conservação da energia;
- Entender o que são os motores e os geradores elétricos;
- Compreender o que é equilíbrio para física;
- Conhecer o que é o centro de massa;
- Saber o que é e como se calcula o torque;
- Explicar o que é equilíbrio rotacional e qual é a sua importância.

1.1 Conservação da Energia

A energia que utilizamos na Terra é proveniente das fusões nucleares que acontecem no Sol. Essa energia chega ao nosso planeta na forma de ondas eletromagnéticas (luz, calor etc.), e é capturada pelas plantas, pelos animais e por algumas substâncias como a água. É a energia do Sol que movimenta o ciclo da água e possibilita que a energia das quedas d'água seja utilizada para geração de energia elétrica.

Nos transformadores de entrada das linhas de distribuição, a energia elétrica é convertida em magnética e em elétrica novamente, e isso se repete nos transformadores de saída dessas linhas. Por fim, a energia elétrica é convertida em luz, calor, som e movimento para os usuários finais por meio dos mais variados equipamentos. Esse caminho da energia, das fusões nucleares no Sol até os eletrodomésticos em nossas casas, está ilustrado na figura 1.1.

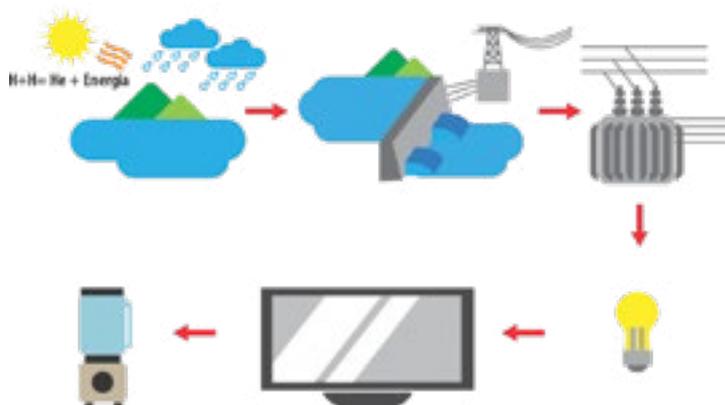


Figura 1.1



Uau! Pensei que essa história da energia não teria fim, imagine se a energia continuasse a se transformar infinitamente: Seria interessante, não?

Na verdade, Nikola, esse processo de fato é infinito: a energia continuará se transformando e espalhando, já que não podemos destruir ou acabar com ela. Chamamos isso de **Lei da Conservação da Energia**, onde a energia não pode ser criada ou destruída; pode apenas ser transformada de uma forma para outra, ou transportada de um lugar para outro, mas com sua quantidade total constante.



Exercitando!

Pense nos seguintes questionamentos e exemplos:

1. De onde vem a energia que utilizamos nos automóveis?
2. Um carro consome mais combustível quando seu ar condicionado está ligado?
3. Fileiras de geradores eólicos são usadas em regiões ventosas para gerar energia elétrica. A potência gerada afeta a rapidez do vento? Isto é, nos lugares atrás desses moinhos de vento haveria mais vento se os moinhos não estivessem lá?

...

A resposta para essas perguntas é uma só: o Sol. Sejam os combustíveis fósseis (gasolina ou diesel) ou o álcool, todos têm sua origem por meio das transformações que a energia do Sol proporciona em nosso planeta. E de fato um carro consome mais combustível, ou mais energia, na medida em que se exige mais dele. Quando acionamos, por exemplo, os faróis, rádio ou ar condicionado, estamos demandando mais combustível do carro. As fileiras de geradores elétricos transformam a energia do movimento dos ventos, ou energia cinética, em energia elétrica. Logo, se o vento perde energia para os geradores, ele se torna mais lento, de fato a intensidade do vento, após passar pelos geradores, diminuem. Na maioria dos casos, essa variação de intensidade é muito pequena, pois esse tipo de gerador é instalado em locais onde transitam massas de ar gigantescas.



Saiba Mais!

Com exceção das energias nuclear e geotérmica, a fonte de quase toda nossa energia é o Sol. O Sol movimenta as massas de água e ar, além de ser a responsável pelas transformações químicas que nos fornece petróleo, carvão, gás natural e madeira. Além disso, há processos de obtenção direta, a partir do Sol, como os painéis de aquecimento d'água e as células foto voltaicas.

Mas o Sol não é nossa única fonte de energia. Um ótimo exemplo é a energia geotérmica que, aliás, não é muito popular no Brasil. Já energias como a solar, a eólica e a hidráulica possuem a vantagem de não prejudicarem o meio ambiente. Na figura 1.2, temos um esquema para geração de energia elétrica a partir da energia geotérmica de rocha-seca.

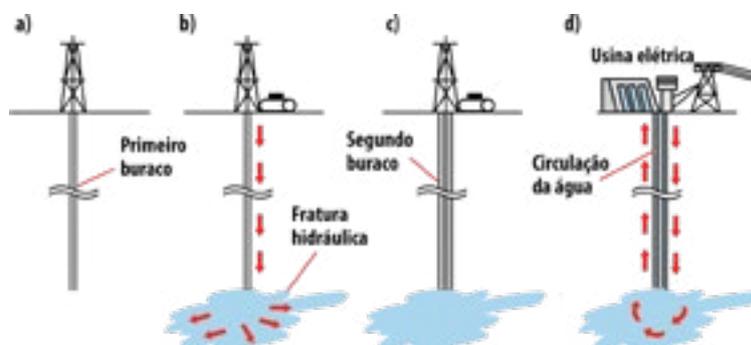


Figura 1.2

Em **(a)**, um buraco de vários quilômetros de comprimento é escavado até o núcleo de granito seco, pois, em média, a cada 30 m de profundidade, a temperatura da Terra aumenta 1°C por estar se aproximando do núcleo da Terra. Em **(b)**, é bombeada água com alta pressão no buraco até provocar fraturas na rocha, o que cria uma cavidade no núcleo da rocha. Em **(c)**, um segundo buraco é feito até a cavidade. Em **(d)**, a usina está em funcionamento. A água é bombeada para cavidade e lá é superaquecida. Utilizando o calor proveniente do centro da Terra, a alta temperatura empurra a água com alta velocidade e pressão pelo segundo buraco; nesse instante, a água é utilizada para alimentar as turbinas e depois é reintroduzida na cavidade, realizando o ciclo fechado.

Na figura 1.3, podemos ver a usina geotérmica de Larderello – Itália. Esta usina já chegou a produzir 10% da energia geotérmica em todo o mundo, com um total de 4.800 GWh por ano, dando energia para um milhão de casas italianas. O *Guinness Book of Records*, em 1988, declarou: o poço geotérmico, em 3 de dezembro de 1979, tem uma profundidade de 12.311 metros.



Figura 1.3

1.2 Motores e geradores



Processo reversível: processo que pode ser desfeito.

A troca de energia entre um sistema elétrico e um sistema mecânico é denominada Conversão Eletromecânica. Trata-se de um **processo** quase totalmente **reversível**, exceto por pequenas perdas por aquecimento. O aparelho capaz de converter energia elétrica em mecânica é denominado motor; e o aparelho que faz o processo contrário, que converte energia mecânica para elétrica, é chamado de gerador.

As nomenclaturas para os tipos de corrente, seja gerada seja utilizada, são as mesmas que temos empregado até agora – “ca” ou “ac” para corrente alternada e “cd” ou “dc” para corrente contínua.



Importante!

É fundamental dominar os conceitos de torque, centro de massa e equilíbrio, discutidos nos próximos tópicos dessa lição.

Motores elétricos são máquinas muito utilizadas por terem baixo custo, facilidade de transporte, não descartam qualquer tipo de resíduo poluente, são de fácil montagem, além de possuírem grande versatilidade de adaptação às cargas dos mais diversos tipos e melhores rendimentos. Os motores elétricos são os mais utilizados de todos os motores.

Todas essas vantagens dos motores elétricos têm motivado até a indústria automobilística a investir em carros com motores elétricos. No Brasil já existem alguns protótipos de carros totalmente elétricos. Os carros elétricos chamam atenção por serem extremamente silenciosos, terem um motor mais leve que os motores a combustão e necessitam de um conjunto de baterias, que, apesar de exigirem um grande espaço, dispensam o convencional tanque de combustível e o cano de escapamento. Em média, o custo por quilômetro rodado fica baixíssimo, como se ele fizesse 60 km/l de gasolina. E custa cerca de 40% mais caro.



Deflexão: mudança de trajetória, muito utilizada para se referir aos raios de luz ou a vetores.



Hans Christian Ørsted

Em 1820, o então Secretário Vitalício da Academia de Ciências de Copenhague, Hans Christian Ørsted, publicou seu trabalho sobre a interação entre eletricidade e magnetismo. Ørsted ficou mundialmente famoso por ter observado a **deflexão** de uma agulha imantada sofre o efeito de uma corrente elétrica. Por meio de experiências continuadas durante alguns dias, Ørsted formulou a Lei Fundamental do Eletromagnetismo, em que o efeito magnético da corrente elétrica tem um movimento circular em torno dela.

Em 1821, Michael Faraday foi convidado por um editor de uma importante revista da época (*Annals of Philosophy*) a escrever um artigo de revisão sobre o novo campo de pesquisas eletromagnéticas.

Interessante ressaltar que Faraday nunca frequentou uma universidade. E mesmo assim foi um cientista notável que recebeu títulos honorários e homenagens de toda parte do mundo.

Faraday estudou grande parte do que havia sido publicado sobre o eletromagnetismo. Repetiu diversos experimentos que outros pesquisadores descreveram em seus artigos e buscou melhores interpretações para eles. Isso levou a um correto entendimento do fenômeno relatado por Ørsted, embora ainda não houvesse clareza sobre o conceito de campo magnético, gerado pela corrente elétrica.

Após vários experimentos, dentre eles o primeiro transformador, no dia 17 de outubro de 1831, Faraday realizou seu experimento, mais conhecido como o primeiro gerador elétrico. A indução de corrente pela movimentação de uma barra magnética dentro de uma bobina, através desse experimento, Faraday foi o primeiro a transformar energia mecânica em energia elétrica. Na figura 1.4, vemos um modelo de disco de Faraday, o primeiro gerador elétrico. Trata-se de um disco de cobre entre os polos de um ímã ferradura. Quando o disco é girado pela manivela, uma corrente elétrica flui radialmente a partir do disco; são as correntes parasitas.

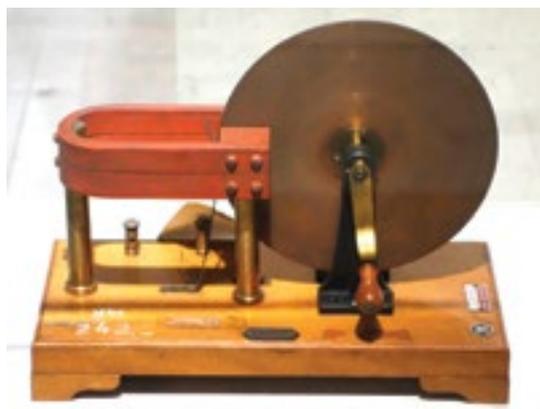
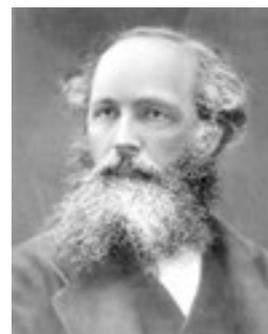


Figura 1.4

No fim desse mesmo ano, Faraday publicou a formulação original da lei de indução eletromagnética. Essa primeira versão da lei de indução era apenas qualitativa. A precária formação de Faraday não lhe permitiu tais elaborações, de forma que a Lei da Indução só foi escrita em linguagem matemática posteriormente por James Clerk Maxwell e constitui uma das quatro leis fundamentais do eletromagnetismo.



Exercitando!

Assinale a alternativa correta:

- a) O sol é a única fonte de energia no Planeta Terra.
- b) A energia pode ser criada ou destruída, mas esse é um processo caro e exige tecnologia.
- c) A energia pode apenas ser transformada de uma forma para outra, ou transportada de um lugar para outro, mas com sua quantidade total constante.
- d) Devido ao princípio de conservação da energia, as fontes de energia do planeta Terra são infinitas.

...

De acordo com o princípio da conservação da energia, ela não pode ser criada ou destruída, mas apenas transformada ou transportada mantendo sua quantidade total constante. Se sua resposta foi a alternativa "c", muito bem.



1.3 Equilíbrio



Proposição:
ato ou efeito de
propor, de sub-
meter a exame
ou deliberação.

A física define o equilíbrio como um estado de movimento em que o corpo preenche duas proposições:

(1) que as resultantes das forças F_n externas que agem sobre o corpo seja nula;

$$\sum \vec{F}_n = 0$$

(2) que a resultante dos torques que atuam sobre o corpo, em relação a qualquer ponto, sejam nulas.

$$\sum \vec{\tau}_n = 0$$

Vamos analisar a primeira proposição: força resultante tem de ser nula. Em corpos pequenos, considerados pontos materiais, isto é, simples, principalmente se as forças forem opostas. Na figura 1.5, temos três exemplos de forças em equilíbrio. Em (a) e (b), as forças têm módulos iguais e os ângulos entre elas favorecem que elas se anulem; em (c) temos um exemplo em que forças com módulos diferentes e orientações também diferentes se anulam.

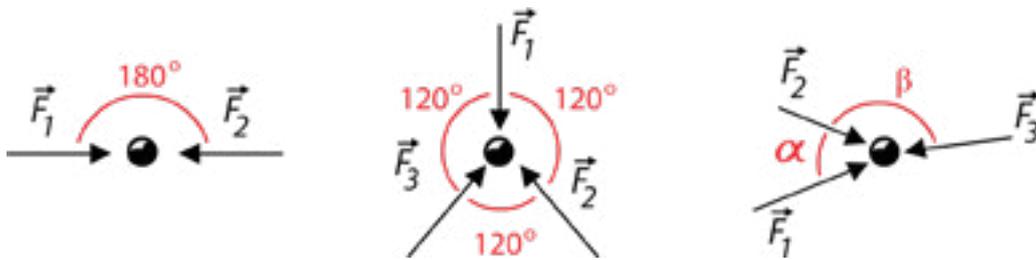


Figura 1.5

Na figura 1.6, temos um exemplo de forças com módulos iguais ($|\vec{F}_1| = |\vec{F}_2|$), mas aplicadas em um corpo extenso, ou seja, que suas dimensões não são mais desprezíveis. Da forma como estão sendo aplicadas, sem se cruzarem, essas forças juntas provocarão um movimento de rotação no objeto. Por essa razão, existe a segunda proposição: que o somatório dos torques também tem que ser nulo para o corpo estar em equilíbrio.

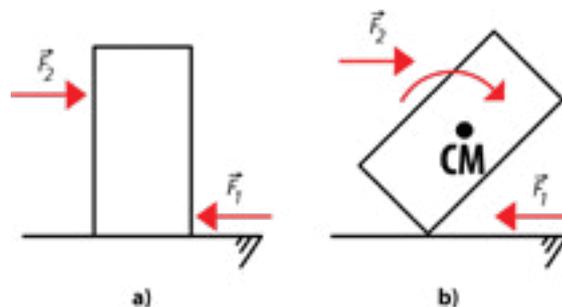


Figura 1.6

Observei que na Figura 1.6 (b) você colocou um ponto no centro do objeto com a sigla CM. O que é isso? E o que é torque? Sempre escuto essa palavra, mas não sei explicar ao certo o que significa.



Ótimas observações Nikola! O pontinho destacado no centro do objeto é denominado Centro de Massa, conceito que estudaremos a seguir. O torque será visto mais adiante.

1.4 Centro de Massa

O centro de massa é o ponto de equilíbrio de um objeto. Em muitos casos, esse ponto está no meio de um objeto. Em objetos com distribuição de massa **homogênea**, podemos afirmar que o centro de massa é o mesmo centro geométrico, centro de gravidade ou **baricentro**, ou seja, esse ponto fica no centro do objeto, como mostram os exemplos da figura 1.7.

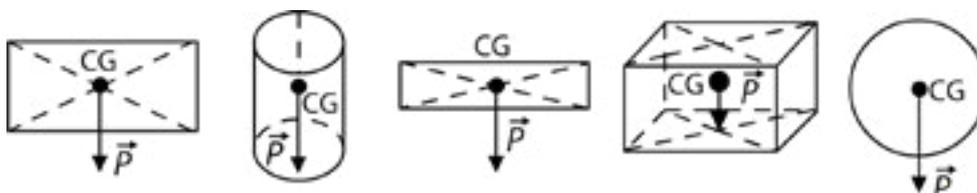


Figura 1.7

Existem algumas formas de encontrar o centro de massa de um objeto. Para o primeiro método é necessário subdividir o objeto em algumas partes, e conhecer os tamanhos e pesos das partes. Se duas partículas **puntiformes** tiverem massas m_1 e m_2 e as coordenadas x_1 e x_2 , respectivamente, sobre o eixo dos x , a coordenada do centro de massa x_{CM} se define por:

$$x_{CM} = \frac{m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2}{m_{total}}$$

Podemos trabalhar com quantas partes forem necessárias. Basta acrescentá-las à fórmula:

$$x_{CM} = \frac{m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2 + m_3 \cdot x_3 \dots}{m_{total}}$$



Homogêneo: é algo único, sem partes/elementos/substâncias diferentes. Da mesma natureza que outro, da mesma espécie, da mesma categoria, idêntico, igual, análogo.

Baricentro: é um ponto em torno do qual existe um equilíbrio de forças. Nos triângulos é o encontro de suas medianas.

Puntiformes: aquilo que pode ser considerado um ponto, que tem tamanho desprezível.

Vamos utilizar esse conceito para encontrar o centro de massa do objeto da figura 1.8: são duas massas esféricas de massas diferentes presas por uma haste. A distância entre os centros das esferas é de 12 cm.

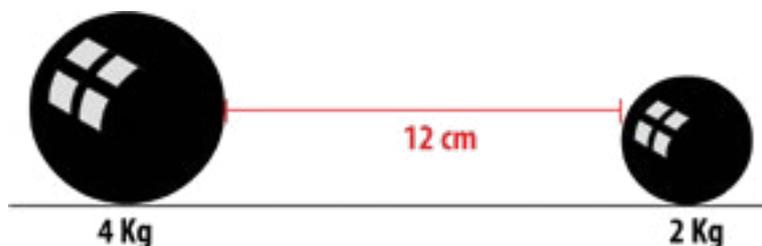


Figura 1.8

Com essas informações, podemos projetar as massas e distâncias em um eixo cartesiano, como mostra a figura 1.9, e calcular o centro de massa do objeto. Chamamos de m_1 a massa com 4 kg e m_2 a de m_2 , colocamos na origem do gráfico (coordenadas 0,0) m_1 e, conseqüentemente, m_2 ficará sobre a coordenada (12,0).

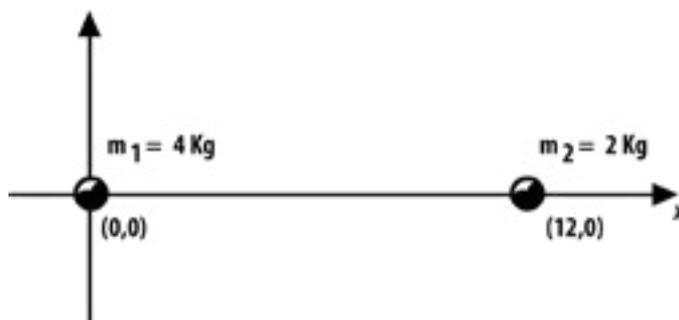


Figura 1.9

Com essas informações, podemos substituir as variáveis e encontrar a posição do centro de massa do objeto.

$$x_{CM} = \frac{m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2}{m_{total}} \rightarrow x_{CM} = \frac{4 \times 0 + 2 \times 12}{4 + 2} \rightarrow x_{CM} = 4$$

Isso significa que o centro de massa está na posição $x=4$ no eixo cartesiano (figura 1.10), ou seja, a quatro centímetros do centro da esfera de massa 4 kg. Esse resultado nos indica que o centro de massa não fica no meio da barra, pois as massas têm pesos diferentes.

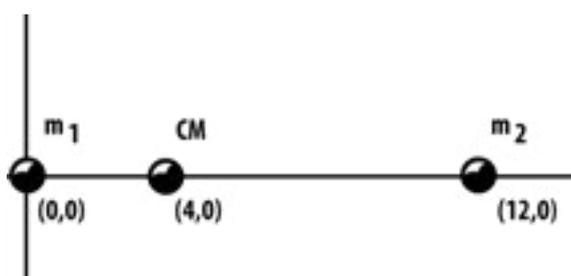
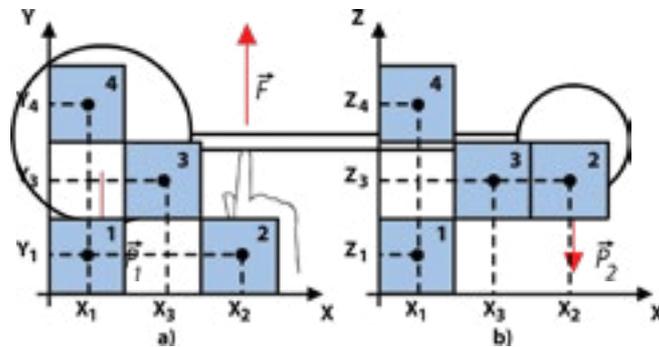


Figura 1.10

A aplicação prática desse conhecimento está no equilíbrio. Supondo que seja preciso equilibrar o objeto em questão, agora sabemos que é necessário apenas um apoio na posição $x=4$ e que esse apoio suporte a massa total do objeto (6 kg), como ilustrado na figura 1.11.



Esse exemplo ilustra bem a primeira condição de equilíbrio, pois o somatório das forças é igual a zero. Isso é possível, pois são forças opostas, isto é:

$$\vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \vec{F} = 0$$

Essa técnica também pode ser aplicada em sistemas mais complexos, com duas ou três coordenadas. Basta resolver uma coordenada de cada vez. Na figura 1.12, temos a representação de um objeto hipotético, formado por quatro caixas iguais, de lado "l" e massa "m". Para descobrir o centro de massa desse objeto utilizamos suas projeções no eixo cartesiano.

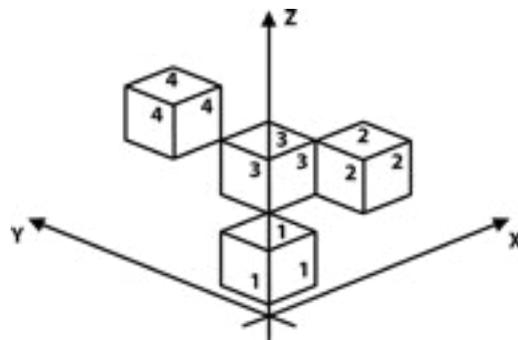


Figura 1.12

O procedimento é o mesmo que fizemos com o objeto da figura 1.8, porém é necessário repetir para todas as três dimensões do objeto. Coordenadas x , y e z . Com a projeção x,y (figura 1.13 (a)) conseguimos calcular duas coordenadas. Observe que, para as coordenadas x , os valores de x_1 e x_4 são iguais, enquanto em y_1 e y_2 são iguais. E com a projeção x,z ou y,z podemos calcular a última coordenada.

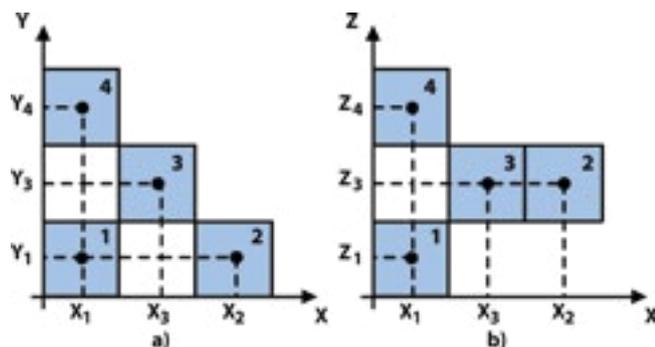


Figura 1.13



Hipotético: fictício, imaginado, pressuposto, presumido, presumível, provável, teórico.

Logo teremos:

$$x_{CM} = \frac{m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2 + m_3 \cdot x_3 + m_4 \cdot x_4}{m_{total}}$$

$$y_{CM} = \frac{m_1 \cdot y_1 + m_2 \cdot y_2 + m_3 \cdot y_3 + m_4 \cdot y_4}{m_{total}}$$

$$z_{CM} = \frac{m_1 \cdot z_1 + m_2 \cdot z_2 + m_3 \cdot z_3 + m_4 \cdot z_4}{m_{total}}$$



Exercitando!

Vamos supor que cada uma das caixas, da figura 1.12, têm lado $l = 20$ cm e massa de 1 kg. Encontre as coordenadas x , y e z do centro de massa desse objeto.

...

Um erro comum nesse tipo de problema é supor que $x_1 = 20$ por $l = 20$, a coordenada x_1 indica o centro da caixa, por isso $x_1 = 10$. Então se você encontrou $x_{cm} = 25$ cm, $y_{cm} = 25$ cm e $z_{cm} = 30$ cm, está correto. Pois se temos:

$$x_{CM} = \frac{m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2 + m_3 \cdot x_3 + m_4 \cdot x_4}{m_{total}} \rightarrow x_{CM} = \frac{10x_1 + 50x_1 + 30x_1 + 10x_1}{4} \rightarrow x_{CM} = 25$$

$$y_{CM} = \frac{m_1 \cdot y_1 + m_2 \cdot y_2 + m_3 \cdot y_3 + m_4 \cdot y_4}{m_{total}} \rightarrow y_{CM} = \frac{10x_1 + 10x_1 + 30x_1 + 50x_1}{4} \rightarrow y_{CM} = 25$$

$$z_{CM} = \frac{m_1 \cdot z_1 + m_2 \cdot z_2 + m_3 \cdot z_3 + m_4 \cdot z_4}{m_{total}} \rightarrow z_{CM} = \frac{10x_1 + 30x_1 + 30x_1 + 50x_1}{4} \rightarrow z_{CM} = 30$$



Importante!

Ao projetar um motor elétrico, o engenheiro precisa tomar muito cuidado com o centro de massa. É necessário distribuir a massa de maneira que o centro de massa do motor esteja sobre o eixo de rotação. Existem muitos softwares, ou formas experimentais, que auxiliam o correto posicionamento do centro de massa durante o projeto, mas os conhecimentos adquiridos nesse tópico serão essenciais para a manutenção de máquinas elétricas como motores e geradores.

Saiba Mais!

O centro de massa de um objeto é o seu ponto de equilíbrio. Podemos utilizar a distribuição de massa para criar objetos muito interessantes, como a brincadeira de equilibrar dois garfos com um palito de dentes ou o passarinho de brinquedo que se equilibra na ponta do bico. Isso é possível porque o centro de massa está exatamente no ponto de equilíbrio: no centro dos garfos e no bico do pássaro.



Figura 1.14

1.5 Torque

No movimento rotacional, o equivalente da força é o torque. A palavra torque vem do latim, que significa torcer. Uma força pode dar a um corpo dois tipos de movimento, de **translação** e **rotação**. Atribuímos uma grandeza física às forças que tem o objetivo de **rotacionar** algo, essa grandeza é intitulada torque, ela é obtida multiplicando o módulo da força pela distância de onde a força foi aplicada ao ponto de rotação.

$$\tau = r \cdot F \cdot \text{sen}(\theta)$$

Sendo **r** a distância do ponto em que é aplicada a força ao ponto de rotação, **F** a força que produz o torque e θ o ângulo entre **F** e **r**.

- Símbolo: τ – letra grega tau.
- Unidade: Nm.

Observe o exemplo: três forças de módulos iguais (\vec{F}_1 , \vec{F}_2 e \vec{F}_3) são aplicadas em diferentes pontos de uma porta, como indica a figura 1.15.

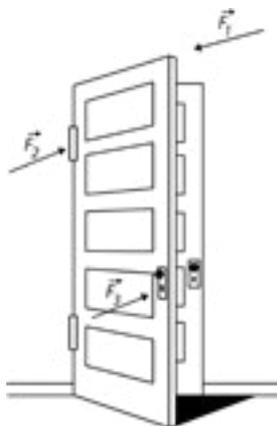


Figura 1.15



Translação: movimento de um local para outro, transferir-se.

Rotação: movimento giratório de um corpo em torno de um eixo fixo, material ou não; revolução, giro; rotação da Terra.

Rotacionar: mover em movimentos circulares.

Pergunta-se: as três forças conseguem dar a porta a mesma aceleração angular?

Analisando o torque, podemos responder essa pergunta, pois ele serve para quantificar a capacidade de rotação da força. Para melhor compreendermos esse exemplo das três forças, de módulos iguais, aplicadas à porta, vamos supor que essas forças tenham módulo igual a 10 N. Na figura 1.16(a), podemos ver a vista superior da porta com as três forças aplicadas, \vec{F}_1 empurra a lateral da porta, \vec{F}_2 é aplicada sobre a dobradiça e \vec{F}_3 é aplicada sobre a maçaneta.

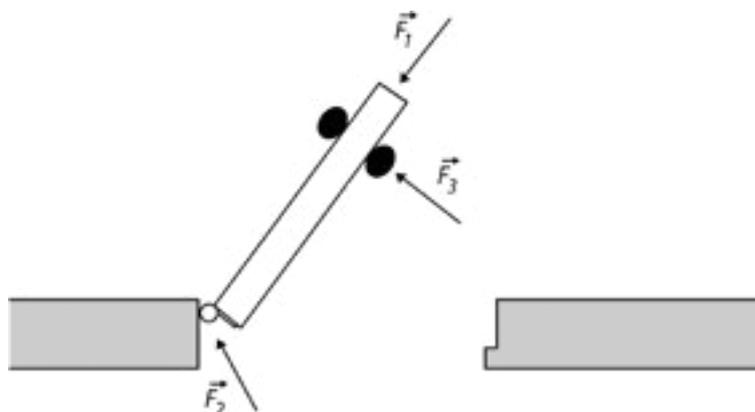


Figura 1.16

Na figura 1.17, temos o esquema simplificado das forças sobre a porta. Nesse esquema a porta é representada apenas como uma reta e a dobradiça como ponto de rotação. Vamos imaginar que entre a maçaneta e a dobradiça, ou seja, do ponto de aplicação de \vec{F}_3 ao ponto de rotação, à distância (r) é igual a 1 m.

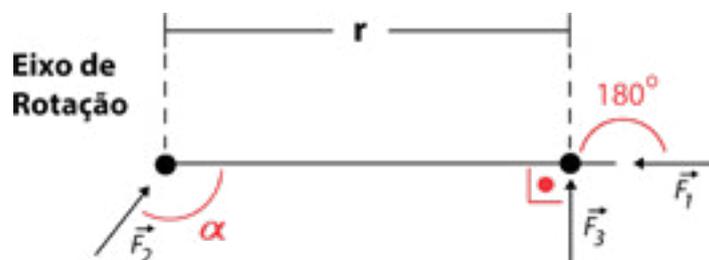


Figura 1.17

Utilizando os dados da figura 1.17, calculamos o torque produzido por cada força.

Torque de	Torque de	Torque de
$\tau_1 = r_1 \cdot F_1 \cdot \text{sen}(\theta_1)$	$\tau_2 = r_2 \cdot F_2 \cdot \text{sen}(\theta_2)$	$\tau_3 = r_3 \cdot F_3 \cdot \text{sen}(\theta_3)$
$\text{sen}(180^\circ) = 0$	$\text{sen}(\alpha) \neq 0$	$\text{sen}(90^\circ) = 1$
$\tau_1 = 1 \times 10 \times 0$	$\tau_2 = 0 \times 10 \times \text{sen}(\alpha)$	$\tau_3 = 1 \times 10 \times 1$
$\tau_1 = 0$	$\tau_2 = 0$	$\tau_3 = 10 \text{ Nm}$

Tabela 1.1

Observe que forças de mesma intensidade aplicadas em pontos e ângulos diferentes produzem torques distintos. Essa grandeza é bem intuitiva, pois a experiência nos confirma que, no exemplo da porta, a força \vec{F}_3 é a mais eficiente devido à distância ao ponto de rotação e o ângulo de 90° com a porta. Isso fica evidente no torque de \vec{F}_1 , que é nulo, pois a força é aplicada com um ângulo de 180° , por isso diretamente sobre o ponto de rotação, e não tangente a ele.

O torque de \vec{F}_2 é nulo, pois a distância r é igual à zero, afinal, a força está sendo aplicada sobre o ponto de rotação. A mesma força pode produzir torques diferentes mesmo se variarmos apenas a distância do ponto de aplicação da força ao ponto de rotação. Na figura 1.18, vemos que a força \vec{F}_3 é aplicada em diferentes pontos da porta, mas sempre perpendicular (com 90°) a ela.

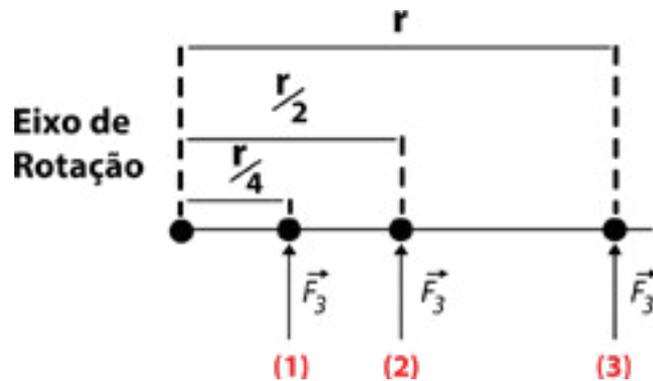


Figura 1.18

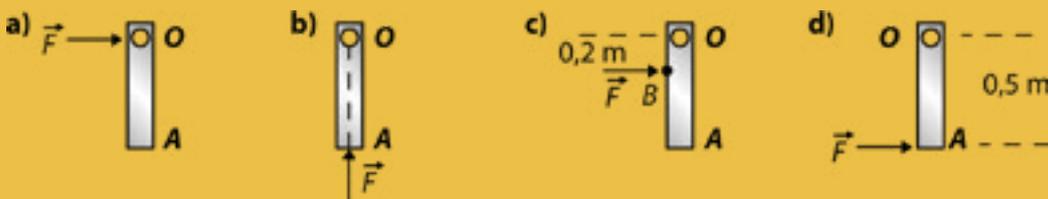
O torque é diretamente proporcional à distância r .

Situação	Distância	Torque de F_3	(τ_3)
(3)	r	$\tau_{(3)} = (r) \cdot F_3 \text{sen}(90^\circ)$	$\tau_{(3)}$
(2)	$r/2$	$\tau_{(2)} = (r/2) \cdot F_3 \text{sen}(90^\circ)$	$\tau_{(2)} = \tau_{(3)}/2$
(1)	$r/4$	$\tau_{(1)} = (r/4) \cdot F_3 \text{sen}(90^\circ)$	$\tau_{(1)} = \tau_{(3)}/2$

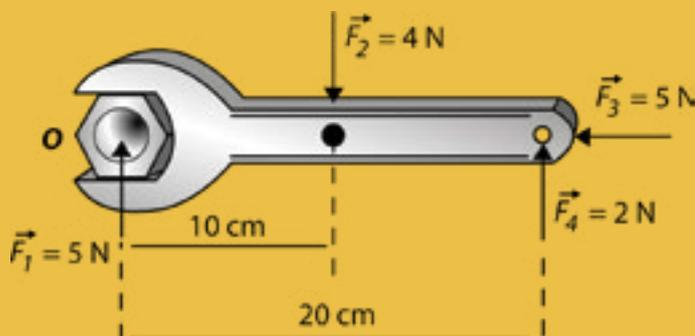
Tabela 1.2

Exercitando!

1) Uma barra AO fixada por um suporte no ponto O pode girar livremente. Calcule o torque produzido pela força de intensidade 10 N para cada uma das situações a seguir:



2) Determine o torque de cada uma das forças sobre a chave de fenda.



...

Na primeira questão, a mesma força aplicada em diferentes pontos gera diferentes torques. Em (a) a força é aplicada sobre o ponto de rotação, ou seja, " $r=0$ ", e por isso o torque é nulo. Na alternativa (b), o ângulo entre " r " e " F " é de 180° , e sendo $(180^\circ)=0$, o torque é nulo. Para alternativa (c) temos:

$$F = 10 \text{ N}$$

$$r = 0,2 \text{ m}$$

$$\text{sen}(90^\circ) = 1$$

$$\tau = 10 \times 0,2 \times 1 \rightarrow \tau = 2$$

E para a alternativa (d) temos:

$$F = 10 \text{ N}$$

$$r = 0,5 \text{ m}$$

$$\text{sen}(90^\circ) = 1$$

$$\tau = 10 \times 0,5 \times 1 \rightarrow \tau = 5$$

Na segunda questão, quatro forças atuam sobre a chave de fenda, temos que calcular o torque para as quatro forças. Observe o resumo a seguir:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= F_1 \times r_1 \times \text{sen}(\theta_1) & \tau_2 &= F_2 \times r_2 \times \text{sen}(\theta_2) & \tau_3 &= F_3 \times r_3 \times \text{sen}(\theta_3) & \tau_4 &= F_4 \times r_4 \times \text{sen}(\theta_4) \\ \tau_1 &= 50 \times 0 \times \text{sen}(0) & \tau_2 &= 4 \times 0,1 \times \text{sen}(90^\circ) & \tau_3 &= 5 \times 0,2 \times \text{sen}(180^\circ) & \tau_4 &= 2 \times 0,2 \times \text{sen}(90^\circ) \\ \tau_1 &= 0 & \tau_2 &= 0,4 & \tau_3 &= 0 & \tau_4 &= 0,4 \end{aligned}$$

Se você encontrou os mesmos valores para o torque das forças F_2 e F_4 na segunda questão, está correto, afinal, F_4 é a metade de F_2 , mas r_4 é o dobro de r_2 .

O borracheiro pode não ter a formação de um eletrotécnico, mas aprendeu, empiricamente, aplicar alguns conhecimentos da física. Imagine a força necessária para retirar os parafusos que prendem a roda de um caminhão, que provavelmente é enorme.

Mas na verdade, como o objetivo da força é fazer o parafuso girar, precisamos de um torque grande, e não necessariamente uma força grande. É por isso que o borracheiro usa uma chave com

cabo comprido ou uma barra de ferro para alongar o cabo da chave, como na figura 1.19. Dessa forma, aumentando a distância do ponto de aplicação da força para o ponto de rotação (o parafuso), aumentamos o torque sem exigir um esforço maior do profissional.



Figura 1.19

1.6 Equilíbrio Rotacional

O movimento de rotação está em toda parte. Os planetas giram em torno do Sol, enquanto os satélites giram ao redor dos planetas.

Ao longo do nosso dia vemos rodas, engrenagens, hélices, motores, eixos, ferramentas e muitas outras coisas executarem movimentos de rotação.

O equilíbrio nos movimentos de rotação segue as mesmas regras da física:

$$(1) \quad \sum \vec{F}_n = 0 \qquad (2) \quad \sum \vec{\tau}_n = 0$$

Isto é, a escolha do ponto de aplicação das forças é muito importante para fazer um corpo girar. Na figura 1.20, podemos ver um exemplo de como duas forças de módulos iguais e sentidos opostos podem fazer um corpo girar (a) ou não (b).

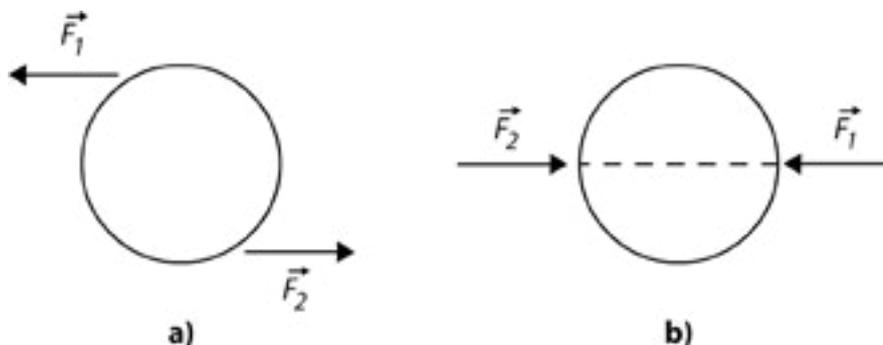


Figura 1.20

Além do ponto de aplicação da força, também é importante o ângulo que essa força tem entre r e F_1 . Na figura 1.21, a mesma força é aplicada a uma distância r do centro de rotação em três posições diferentes. Se o objetivo da força F_1 é girar o objeto, teremos uma eficiência diferente para cada situação, pois o torque produzido pela força também depende do ângulo entre r e F_1 .

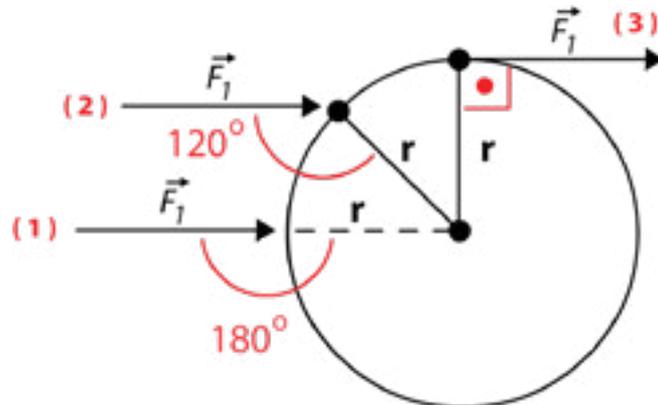


Figura 1.21

Na análise feita, a situação (3) apresenta 100% de eficiência, pois tem o torque máximo possível a partir da força F_1 . Já na situação (1) a eficiência da força, quando o objetivo é girar o objeto, é 0%, pois o torque é nulo.

Situação	Seno	Torque de F_3	Eficiência de F_1 , em girar objeto
(3)	$\text{sen}(90^\circ) = 1$	$\tau_{(3)} = r \cdot F_1 \text{sen}(90^\circ)$	$\tau_{(3)} \rightarrow 100\%$
(2)	$\text{sen}(120^\circ) = \frac{\sqrt{3}}{2} \cong 0,87$	$\tau_{(2)} = r \cdot F_1 \text{sen}(120^\circ)$	$\tau_{(2)} \rightarrow 87\% \tau_{(3)}$
(1)	$\text{sen}(180^\circ) = 0$	$\tau_{(1)} = r \cdot F_1 \text{sen}(180^\circ)$	$\tau_{(1)} = 0$

Tabela 1.3



Ou seja, se nosso objetivo é fazer girar, a força deve ser aplicada de forma a não passar pelo centro de massa. Pois se ela passa por esse ponto, vai estar apenas empurrando o objeto, e não gerando qualquer torque.

Ótima observação Nikola. Sua conclusão é muito importante, pois saber onde fica o centro de massa é muito importante para qualquer movimento de rotação. Observe este exemplo: apesar de não termos abordado especificamente os modelos de motores elétricos, a figura 1.22, mostra dois motores: um motor de indução CA (a) e um motor trifásico (b). Onde você acha que fica o centro de massa desses motores, Nikola?



Figura 1.22

Sem sombra de dúvida no eixo de rotação! Até pelo formato deles podemos intuir isso.



Exatamente, o centro de massa localizado no centro do eixo de rotação garante que o motor gire de forma estável. Em alguns casos, é mais fácil reposicionarmos o centro de massa. Quando levamos um carro para balancear as rodas, é exatamente isso que o mecânico faz. Com o desgaste irregular dos pneus e pequenas irregularidades da roda, o centro de massa do sistema (roda pneu) se afasta do eixo de rotação, o que provoca trepidações que podem ser sentidas no volante ao dirigir.

Para corrigir isso, o mecânico utiliza pequenos contrapesos de chumbo para redistribuir as massas do sistema e deixar o centro de massa o mais próximo do eixo possível (figura 1.23 (a)). Esse é um exemplo em que uma máquina faz o trabalho de encontrar o centro de massa do objeto (figura 1.23 (b)).



Figura 1.23

Existem vários modelos de rolamento: de esfera, roletes ou rolos, como os da figura 1.24, cones, agulha e outros. Eles podem ser: abertos ou vedados, mas todos eles utilizam óleos ou graxas como lubrificantes. Normalmente, só os abertos devem ser lubrificadas periodicamente. Rolamentos vedados, quando abertos, quase sempre são perdidos.



Figura 1.24

Também há rolamentos de acoplamento e mancais, que são dispositivos fixos que apoiam eixos girantes, como os mostrados na figura 1.25.



Figura 1.25



Saiba Mais!

Os rolamentos são comercializados de acordo com o tamanho e a carga de trabalho. É comum que o profissional que trabalha com motores e geradores elétricos tenha que retirar ou instalar um rolamento. Esse serviço pode ser executado com um martelo. Contudo, são necessárias várias marteladas, bem suaves, nas paredes laterais do rolamento. Esse procedimento é o menos indicado, pois pode empenar o eixo e danificar o rolamento.



Uma forma de minimizar os riscos é utilizar um cano de aço: com ele, é mais fácil das marteladas atuarem paralelas ao eixo e diretamente sobre o rolamento. Contudo, mesmo utilizando o cano de aço ainda há riscos de danificar o eixo e o rolamento.

Então se programe: um bom eletrotécnico deve conhecer as ferramentas que irá precisar. Uma ótima ferramenta para esse tipo de trabalho é o “saca rolamento”. É meio que uma garra e um torno juntos, ela agarra o rolamento e, com o auxílio de uma rosca, puxa o rolamento sem empenar o eixo ou danificar o rolamento.

Essa ferramenta também é conhecida como saca polia, extrator de rolamento ou extrator de polia.

Figura 1.26

Exercitando!

Um jovem e sua namorada passeiam de carro por uma estrada e são surpreendidos com um furo no pneu. Quando eles foram trocar o pneu, o jovem, que pesa 750 N, pisa na extremidade de uma chave de roda, inclinada em relação à horizontal, como mostra a figura 1.27 (a), mas só consegue soltar o parafuso quando ele coloca todo o seu peso sobre a chave. A namorada do jovem, que pesa 510 N, encaixa a mesma chave, mas na horizontal, em outro parafuso, e pisa na extremidade da chave, exercendo sobre ela uma força igual a seu peso, como mostra a figura 1.27 (b).

Supondo que este segundo parafuso esteja tão apertado quanto o primeiro, e levando em conta as distâncias indicadas nas figuras, verifique se a moça consegue soltar esse parafuso. Justifique sua resposta.

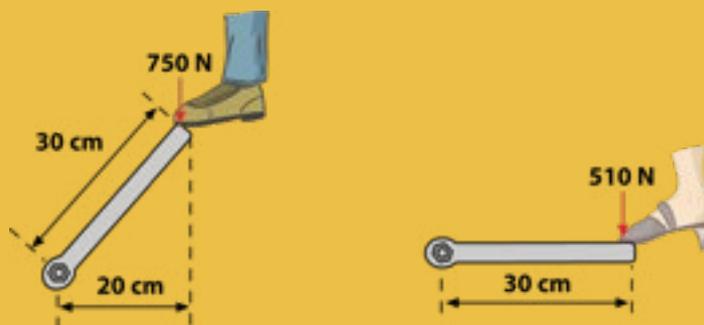


Figura 1.27

...

Se sua resposta foi sim, está correto, pois o torque realizado pelo peso da moça é ligeiramente superior ao torque que o peso do rapaz provoca sobre o parafuso, isso ocorre devido ao ângulo da força com a chave, ou seja:

Temos:

Peso do rapaz = 750 N

$r = 0,3 \text{ m}$

$$r = 0,3 \text{ m}$$

$$\text{sen}(\theta) = \frac{0,2}{0,3} = 0,67$$

$$\tau_{\text{rapaz}} = F_{\text{peso}} \times r \times \text{sen}(\theta)$$

$$\tau_{\text{rapaz}} = 750 \times 0,3 \times 0,67$$

$$\tau_{\text{rapaz}} = 150 \text{ Nm}$$

Peso da moça = 510 N

$$r = 0,3 \text{ m}$$

$$\text{sen}(90^\circ) = 1$$

$$\tau_{\text{moça}} = F_{\text{peso}} \times r \times \text{sen}(\theta)$$

$$\tau_{\text{rapaz}} = 510 \times 0,3 \times 1$$

$$\tau_{\text{rapaz}} = 153 \text{ Nm}$$

Resumindo

Estudamos nessa lição os fundamentos da conservação eletromecânica de energia.

Veja se você se sente apto a:

- Explicar o que é a lei de conservação da energia;
- Diferenciar o que são motores e geradores elétricos;
- Definir o que é equilíbrio para a física;
- Formular o que é o centro de massa;
- Aplicar como se calcula o torque;
- Demonstrar o que é equilíbrio rotacional e qual é a sua importância.

Parabéns, você conclui a lição 1 do nosso curso. Na próxima lição, você aprenderá sobre máquinas de corrente contínua. Até breve!



Parabéns, você finalizou esta lição!

Agora responda às questões ao lado.

Exercícios

Questão 01 – Julgue os itens a seguir, assinalando (F) para os falsos e (V) para os verdadeiros.

I. A energia que utilizamos na Terra chega ao nosso planeta na forma de ondas eletromagnéticas em basicamente luz e calor.

II. A energia do Sol movimenta o ciclo da água e possibilita que a energia das quedas d'água seja utilizada para geração de energia elétrica. Além disso, há processos de obtenção direta, a partir do Sol, como os painéis de aquecimento d'água e as células foto voltaicas.

III. Com exceção das energias nuclear e geotérmica, a fonte de quase toda nossa energia é o Sol.

IV. O Sol movimenta as massas de água e ar, além de ser o responsável pelas transformações químicas que nos fornece petróleo, carvão, gás natural e madeira.

Podemos afirmar que:

- Somente as alternativas I, III e IV estão corretas.
- Somente as alternativas II e IV estão corretas.
- Somente as alternativas I e III estão corretas.
- Todas as alternativas estão corretas.

Questão 02 – Assinale a alternativa **incorreta**.

a. Um processo quase totalmente reversível é a conversão eletromecânica, que há troca de energia entre um sistema elétrico e um sistema mecânico.

b. O aparelho capaz de converter energia mecânica em elétrica é chamado de gerador e a energia elétrica em mecânica é denominada motor.

c. Motores a combustão são máquinas muito utilizadas por terem baixo custo, facilidade de transporte, não descartam qualquer tipo de resíduo poluente e são de fácil montagem.

d. Motores elétricos possuem grande versatilidade de adaptação às cargas dos mais diversos tipos e melhores rendimentos, por isso são os mais utilizados de todos os motores.

Questão 03 – Com relação aos conceitos de equilíbrio assinale a alternativa correta.

a. Só é possível que um sistema entre em equilíbrio se um número par de forças agirem sobre ele.

b. Se o somatório das forças de um sistema for igual a zero, certamente esse sistema estará em equilíbrio.

c. A análise do torque é secundária, e por isso não é tão importante para o conceito de equilíbrio.

d. Um corpo só está em seu estado de equilíbrio, se e somente se, as resultantes das forças externas que agem sobre ele são nulas e a resultante dos torques que atuam sobre o corpo, em relação a qualquer ponto, também é nula.

Questão 04 – Em objetos com distribuição de massa homogênea, podemos afirmar que o centro de massa é o mesmo que:

- a. Centro geométrico, centro de gravidade ou baricentro.
- b. Baricentro, mediana e mancal.
- c. Centro geométrico, eixo de rotação e eixo de translação.
- d. Centro de gravidade, baricentro, ponto tangencial.

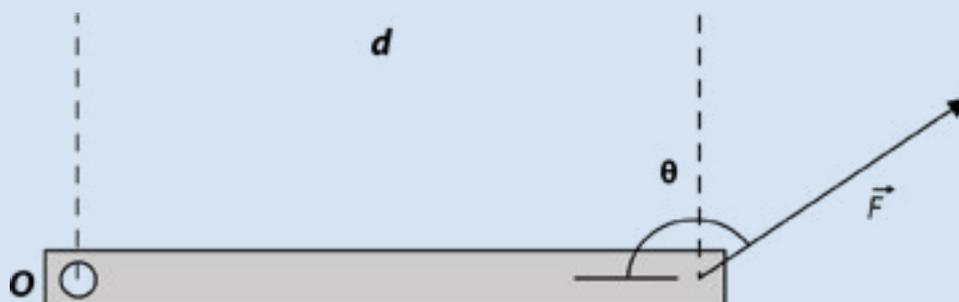
Questão 05 – Julgue os itens a seguir e assinale (F) para os falsos e (V) para os verdadeiros.

- I. No movimento rotacional, o equivalente da aceleração é o torque.
- II. A palavra torque vem do latim, que significa torcer.
- III. Toda força pode dar a um corpo um torque diferente de zero, independente do ponto de aplicação.
- IV. Atribuímos uma grandeza física às forças que tem o objetivo de rotacionar algo, essa grandeza é intitulada torque, ela é obtida multiplicando o módulo da força pela distância de onde a força foi aplicada ao ponto de rotação.

Podemos afirmar que:

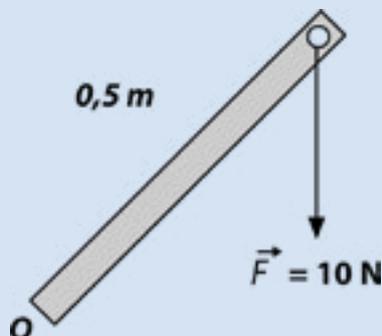
- a. Somente as alternativas I, III e IV estão corretas.
- b. Somente as alternativas II e IV estão corretas.
- c. Somente as alternativas I e III estão corretas.
- d. Todas as alternativas estão corretas.

Questão 06 – Determine o torque da força \vec{F} em relação ao ponto O, como indicado na figura. Dados: $F = 20 \text{ N}$; $d = 0,5 \text{ m}$; $\theta = 150^\circ$.



- a. 2 N.m
- b. 5 N.m
- c. 10 N.m
- d. 20 N.m

Questão 07 – Determine o torque da força \vec{F} em relação ao ponto O, como indicado na figura. Dados: $F = 10 \text{ N}$; $d = 0,5 \text{ m}$; $\theta = 30^\circ$.



- a. $2,0 \text{ N.m}$
- b. $2,5 \text{ N.m}$
- c. $8,5 \text{ N.m}$
- d. 12 N.m

Questão 08 – 8. Um motorista não consegue soltar o parafuso da roda do carro com uma chave de rodas em L. Somente consegue soltá-la quando empresta de outro motorista uma chave com o braço mais comprido. Observe o esquema das duas chaves. A grandeza física que aumentou com o uso da chave de braço maior foi:



- a. A força.
- b. O torque.
- c. A energia potencial.
- d. O impulso.

Questão 09 – Assinale a alternativa incorreta.

- a. O centro de massa de um motor é localizado exatamente no centro do eixo de rotação, pois, dessa forma, o motor gira de maneira estável.
- b. Os rolamentos são dispositivos que permitem o movimento relativo controlado entre partes de um sistema. Ele minimiza o atrito entre superfícies e, no caso dos eixos de rotação, é fundamental para que as peças permaneçam alinhadas, mesmo se movimentando tão rapidamente.
- c. Existem vários modelos de rolamento: de esfera, roletes ou rolos cones, agulha e outros.
- d. Eles podem ser: abertos ou vedados, mas todos eles utilizam óleos ou graxas como lubrificantes, ou seja, todo rolamento deve ser aberto e lubrificado durante a manutenção.

Questão 10 – Com relação à lei de conservação da energia, assinale a alternativa correta.

- a. A energia não pode ser criada ou destruída, mas pode ser transportada ou transformada.
- b. Usinas hidrelétricas criam energia elétrica a partir da água.
- c. Geradores elétricos são máquinas muito eficientes, pois quase toda energia é convertida em eletricidade, a parcela de energia destruída é mínima, em média 5%.
- d. O transporte de energia é um processo complexo, e não encontramos na natureza nenhum exemplo desse processo.