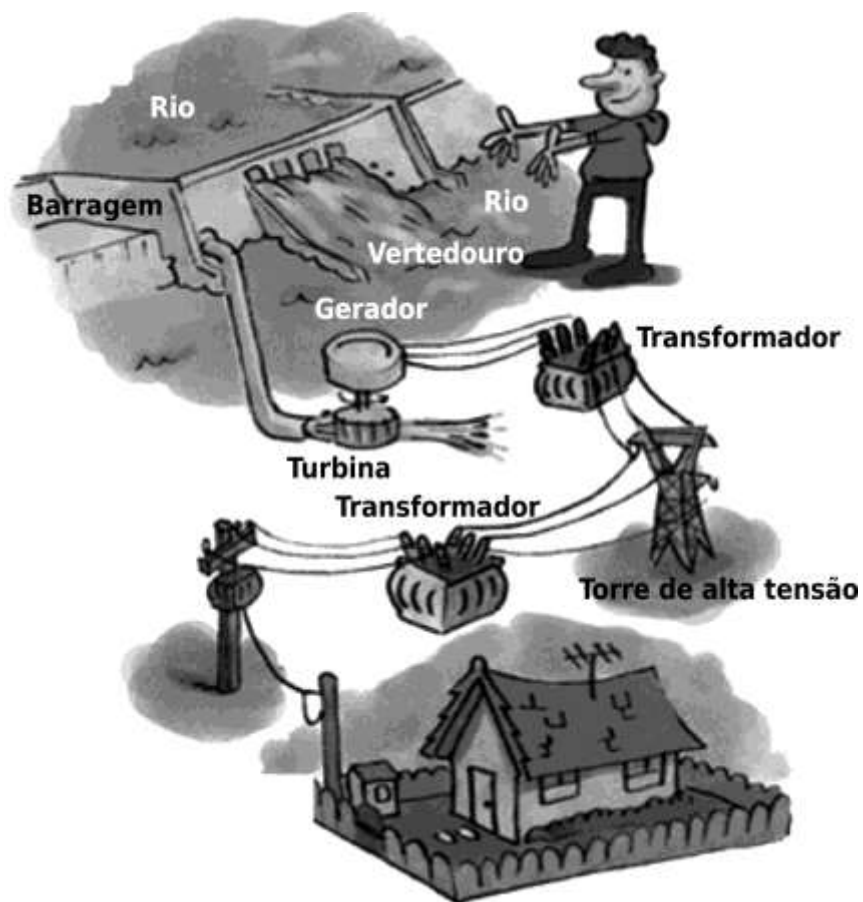


Introdução à

ENGENHARIA ELÉTRICA DE POTÊNCIA

Richard M. Stephan



Agosto, 2018

AGRADECIMENTOS

Aos meus colegas Sérgio Sami Hazan e Rubens de Andrade Jr., pelo apoio e incentivo na condução desta disciplina, desde 2010.

A Arlindo Penteado, Márcio Sens, Tiago José Moraes, Silvano José da Silva, Walter Mannheimer, José Roberto Cardoso, Oumar Diene e Frederico Pontes pelas valiosas sugestões.

A Jane Ribeiro pelo trabalho de diagramação e arte.

DEDICATÓRIA

Aos meus avôs, Salvador Magdalena e Richard Stephan, passado ainda presente nas minhas lembranças.

Aos meus netos, Felipe, Bernardo, Pedro e Artur, futuro desde já presente nos meus sonhos.

*“Ninguém ensina ninguém,
ninguém aprende sozinho,
homens e mulheres se educam,
mediatizados pelo mundo”.*

Paulo Freire

Índice

	pág.
1 Introdução.....	1
2 Energia e Eletricidade	3
3 Eletromagnetismo	4
4 CC x CA.....	6
5 Potência Elétrica.....	7
6 Monofásico x Trifásico.....	12
7 Frequências de 50Hz, 60Hz e 400Hz.....	14
8 Modelagem e Sistemas Lineares	15
9 Sistemas de Potência.....	16
10 Harmônicos e Resposta em Frequência	17
11 Sistemas de Controle	20
12 Eletrônica de Potência	23
13 Supercondutividade.....	26
14 Os Cursos de Engenharia.....	27
15 O Trabalho do Engenheiro Eletricista.....	29
16 Conclusão	31
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32
APÊNDICES	
Especialidades da Engenharia.....	34
O que a Engenharia tem de Essencial?	35
A Tecnologia de Samba	37
Exercícios (Portal de Periódicos da CAPES)	38
Canção da Patente.....	41
Sugestões de Temas para Seminários dos Alunos	42
Domínios na Internet para Consulta	43

1 Introdução

Ao entrar na Universidade, uma vez superada a barreira do vestibular ou do ENEM, o jovem estudante defronta-se com uma nova gama de situações. Velhos problemas da vida escolar darão lugar a outros ainda desconhecidos. Por exemplo, podemos adiantar, o tempo dedicado para cada hora de aula ou na leitura de cada página do livro texto aumentará significativamente quando comparado com a experiência do segundo grau. O auxílio explicador de pais e parentes raramente existirá. O estudo da matéria apresentada em aula deverá ser feito continuamente e até antecipadamente, pois a preparação para provas nas vésperas dos exames resulta, mais cedo ou mais tarde, em reprovação. Para superar esses desafios, a conversa com um professor ou orientador acadêmico, o relacionamento com veteranos e outros calouros, em suma, a integração na vida universitária certamente ajudará muito. No entanto, como necessidades e capacidades variam de aluno para aluno e de professor para professor, a satisfação nunca será plenamente atingida, não adianta sonhar. Cabe a cada um descobrir como otimizar sua experiência universitária.

Para complicar, as novidades e mudanças tecnológicas nos surpreendem cada vez com maior frequência e número. Por outro lado, a formação precisa ser acomodada em uma grade curricular de cinco anos. Diante desse quadro, o ensino universitário favorece o entendimento de princípios fundamentais da ciência e da técnica e a apresentação de métodos e ferramentas de trabalho, incluindo ainda o hábito de estudar e o conhecimento de outro idioma, especialmente o inglês. Esses valores acompanharão o diplomado em sua vida profissional e estão afinados com sérios estudos sobre os atributos desejados de um engenheiro (Mc Masters, 2005). Resume-se

dizendo que a universidade é o local do “know why”, do saber o porquê. O “know how”, o saber como, encontra-se principalmente nas indústrias e empresas. A exclusividade de uso do conhecimento fica garantida pelo registro de patentes ou pela manutenção de segredos industriais. Evidentemente, nada impede que a universidade desenvolva “know how”, mas esses casos resultam normalmente de parcerias universidade-empresa.

Ciente dessa dificuldade e diferentemente de outros livros de Introdução à Engenharia, de caráter geral e encaminhamento pedagógico na linha de orientação vocacional ou educacional (e.g. Agostinho, 2015; Raymond, 2013; Bazzo, 2006), a abordagem aqui adotada objetiva ir diretamente ao conhecimento técnico, descortinando o que oferece o curso de Engenharia Elétrica de Potência e o mundo de trabalho do Engenheiro Eletricista. O aprofundamento, desdobramento e relacionamento dos temas abordados formam o núcleo das matérias que serão vistas nos cinco anos do curso de Engenharia Elétrica.

A disciplina consta de 17 aulas de 100 minutos, uma por semana. Os alunos são convidados a se organizar em grupos de no máximo quatro, formando como uma pequena empresa de engenharia. Aulas expositivas e demonstrações, a cargo do professor, cobrem o material desse livro. Palestras de profissionais, visitas técnicas, apresentação de representantes de alunos e veteranos, engajados em equipes de competição, ocupam algum tempo de aula. Cada grupo é avaliado pela solução dos exercícios propostos no livro; pela apresentação de um seminário de 15 minutos, sobre tema de livre escolha relacionado com engenharia (ver apêndice); e pela leitura e interpretação de textos em inglês, dos quais se destacam as palestras apresentadas por Alec Broers, na BBC, em 2005, intitulada-

das “The Triumph of Technology”. A avaliação resulta em um total de pontos atribuído pelo professor, calculado pelo produto do número de alunos do grupo por uma nota média do grupo. Os próprios alunos dividem os pontos atribuídos entre si, não necessariamente em partes iguais, como se fosse o pagamento por um serviço prestado pela pequena empresa que constituíram.

Objetiva-se expor ao aluno seu caminho universitário através de atividades e exercícios, que o façam se sentir um profissional.

2 Energia e Eletricidade

A natureza demonstra abertamente seu vigor através dos relâmpagos, ventos, correntezas de água, ondas do mar, movimento de marés e irradiação solar. O homem também descobriu energia escondida no poder de combustão da lenha, carvão, petróleo, gás, óleos vegetais e na energia da fusão e fissão nuclear. O bem estar da humanidade depende do condicionamento e utilização destas fontes de energia. Com os fundamentos físicos da eletricidade estabelecidos na segunda metade do século XIX e início do século XX, todas as fontes acima citadas tornaram-se passíveis de conversão em energia elétrica, com exceção dos relâmpagos, os únicos a se apresentar diretamente sob a forma elétrica, e que, curiosamente, continuam indomáveis. Ao longo do século XX, os engenheiros conseguiram criar inúmeras aplicações da eletricidade que vão dos motores aos computadores, passando por sofisticados sistemas de comunicação e diagnóstico médico. Como bem descreve Bodanis (2008) *“Se um cônsul do Império Romano fosse de repente transportado para o ano de 1850, não teria nenhuma grande surpresa. Os veículos eram puxados por cavalos, as casas eram de madeira, a escuridão da noite era afastada por velas e lamparinas de óleo.”*

Passado pouco mais de um século da difusão dos geradores e lâmpadas elétricas e meio século da invenção dos computadores, o mundo transformou-se devido ao uso da eletricidade. Isto se deve, em grande parte, ao fato da energia elétrica ser de fácil transmissão e processamento comparativamente às demais formas de energia.

EXERCÍCIO 1: Consulte o domínio da International Energy Agency (www.iea.org) onde estão disponíveis informações estatísticas na forma de gráficos. Concentre-se nas informações sobre geração de eletricidade a partir de diferentes fontes primárias. Compare a situação brasileira com a de outro país ou região do mundo e apresente suas conclusões.

3 Eletromagnetismo

Formar um Engenheiro Eletricista sem conhecer Eletromagnetismo seria como construir uma casa sem alicerce, sobre um terreno arenoso. Os complexos fenômenos da eletricidade e do magnetismo, observados por Faraday, Oersted, Ampère, Gauss e outros, foram genialmente sintetizados por James Clarke Maxwell (*1831; †1879) e colocados na forma de quatro equações com as contribuições posteriores de Oliver Heaviside e Willard Gibbs:

$$\begin{aligned}\nabla \cdot D &= \rho \\ \nabla \cdot B &= 0 \\ \nabla \otimes E &= -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \otimes H &= J + \frac{\partial D}{\partial t}\end{aligned}$$

Em que:

D – vetor densidade de fluxo elétrico

E – vetor intensidade do campo elétrico

B – vetor densidade de fluxo magnético

H – vetor intensidade de campo magnético

ρ – densidade volumétrica de carga elétrica

J – vetor densidade de corrente elétrica

∂t – diferencial de tempo

$\nabla \bullet$ – divergente de um campo vetorial

$\nabla \otimes$ – rotacional de um campo vetorial

∇ – operador matemático representado por $\frac{\partial}{\partial x} \hat{x} + \frac{\partial}{\partial y} \hat{y} + \frac{\partial}{\partial z} \hat{z}$

Estas equações estabelecem o relacionamento entre campos elétricos e magnéticos e foram colocadas na forma diferencial, por ser mais compacta do que a forma integral. Certamente assusta um pouco, não parece um cartão de boas vindas. Mas o conteúdo necessário para o entendimento será apresentado em disciplinas de Cálculo Diferencial e Integral, Cálculo Vetorial e Eletromagnetismo ao longo dos dois primeiros anos do curso. Com um pouco de dedicação, tudo isto será devidamente entendido. Agora seria interessante saborear a beleza desta formulação: o conceito de campo elétrico, que necessita de dois vetores (D , E) para ficar totalmente definido; o conceito de campo magnético, que também necessita de dois vetores para sua determinação (B , H); a elegante formulação matemática com o operador ∇ , conhecido como operador nabla; os estranhos nomes divergente e rotacional; o fato de poder condensar tanto conhecimento em apenas quatro equações. Com esta formulação, foi possível, por exemplo, prever a existência das ondas eletromagnéticas, mais adiante comprovadas por Heinrich Hertz, que nasceu em 1857 e faleceu com apenas 37 anos de idade. O engenheiro italiano Guglielmo Marconi utilizou esse conhecimento para

criar o telégrafo em 1896 e o brasileiro Pe. Roberto Landell de Moura comprovou a transmissão de sinais de voz sem fio já em 1900. As máquinas elétricas, indispensáveis na conversão de energia mecânica em elétrica e vice-versa, também exemplificam o condicionamento das leis do eletromagnetismo para proveito do homem. No domínio do LANTEG (<http://www.dee.ufrj.br/lanteg>) existem várias dessas máquinas didaticamente representadas em realidade virtual.

4 CC x CA

A energia elétrica encontra-se disponibilizada na forma contínua (CC) ou alternada (CA). Inicialmente, por volta de 1890, houve muita discussão a respeito de qual seria a forma mais conveniente (White, 2003). De um lado Nikola Tesla defendia a corrente alternada e, do outro, Thomas Edison a corrente contínua. Interesses comerciais tornaram esta disputa polêmica e acirrada. A facilidade de elevar ou abaixar o nível da tensão alternada fez com que esta se saísse vitoriosa, pela economia na transmissão de energia, como será entendido no próximo capítulo. A forma contínua encontra sua principal aplicação através das baterias, empregadas nos automóveis, lanternas, telefones celulares, sempre que o armazenamento de energia elétrica se fizer necessário.

Com o advento da eletrônica de potência, a partir da segunda metade do século XX, o condicionamento de sinais de corrente contínua se tornou economicamente viável. Para longas distâncias de transmissão, ponto a ponto, sem bifurcações intermediárias, a opção CC pode chegar a ser mais atraente. O Brasil transmite metade da energia elétrica produzida na usina hidroelétrica de Itaipu com linhas de corrente contínua.

EXERCÍCIO 2: Procure saber mais sobre as hidrelétricas de Itaipu, Belo Monte e Três Gargantas. Onde estão localizadas? Quantos são os geradores? Qual a potência instalada? Qual a frequência elétrica da geração? Alguma delas é classificada como “fio d'água”?

5 Potência Elétrica

5.1 Fundamentos

Potência (p) é a grandeza definida como a razão entre o trabalho (W) executado e o intervalo de tempo (Δt) necessário para sua realização. Matematicamente, escreve-se:

$$p = W / (\Delta t) \quad (1)$$

Por exemplo, considerando dois elevadores, aquele capaz de transportar os mesmos passageiros em menor tempo é acionado por motores mais potentes. Considerando dois veículos de igual massa, o mais potente atinge velocidades maiores em um mesmo intervalo de tempo.

Por sua vez, o trabalho é medido pelo produto da força (f) pelo deslocamento (Δx) na direção da força. Assim:

$$p = (f \cdot \Delta x) / \Delta t = f \cdot (\Delta x / \Delta t) = f \cdot v \quad (2)$$

em que “ v ” é a velocidade.

Esta relação ensina que potência pode ser obtida com pouca força e muita velocidade, como é o caso de pugilistas peso pena, ou com muita força e baixa velocidade, mais parecido com o desempenho dos pesos pesados.

Mecanicamente, para uma dada potência, a negociação entre velocidade e força se consegue com engrenagens, como as que se encontram no câmbio dos automóveis ou bicicletas.

Demonstra-se que a potência elétrica fica determinada pelo produto da tensão (v) pela corrente (i). Uma dada potência pode ser obtida com tensões elevadas e baixas correntes, ou vice-versa. Com o equipamento elétrico chamado de transformador, consegue-se alterar os níveis de tensão e corrente alternada (CA). Ele faz o papel das engrenagens na engenharia elétrica.

Os condutores que transportam a corrente elétrica funcionam como canos para o transporte de água. Quanto maior o diâmetro da tubulação ou condutor, maior a capacidade de transporte. No caso dos sistemas elétricos, os condutores são comumente feitos de cobre, material cobiçado. Assim, costuma ser economicamente interessante elevar a tensão para diminuir a corrente. Por este motivo, aparelhos de ar refrigerado acima de 15.000BTU são fabricados para 220V e não 127V. Para a transmissão de energia elétrica, empregam-se no Brasil tensões de 138kV, 230kV, 345kV, 500kV e até 765kV. Tensões elevadas trazem o problema do isolamento elétrico. Arcos elétricos (relâmpagos) ocorrem a partir de diferenças de potencial (tensões) da ordem de 30kV para cada centímetro de afastamento. Ou seja, para isolar uma tensão de 765kV necessita-se de um distanciamento no ar de pelo menos 25,5 cm.

EXERCÍCIO 3: Calcule o trabalho necessário para levar uma saca com 10kg de alimento do andar térreo de um prédio até o quarto andar, localizado 10 metros acima. Considere a aceleração da gravidade 10 m/s^2 .

a) Exprima o resultado em kWh. Calcule o custo deste trabalho tomando como base o valor de 1kWh da conta de energia elétrica da sua casa. Quanto seria justo dar de gorjeta para alguém fazer este transporte para você? Comente.

b) Em quanto tempo você faria este deslocamento pela escada? Qual a sua potência? Compare com a potência de um ferro de passar roupas ou chuveiro elétrico e comente o resultado.

5.2 Potência em circuitos CA

Predominantemente, as tensões CA fornecidas pelos geradores elétricos seguem um perfil senoidal:

$$v(t) = \sqrt{2} V \text{ sen}(\omega t), \quad (3)$$

em que V representa o valor eficaz e ω a frequência angular do sinal de tensão. Sabe-se que o período (T) do sinal senoidal vale $T=2\pi/\omega$. O inverso do período recebe o nome de frequência (f). Portanto, $\omega = 2 \pi f$. Na maioria das residências brasileiras, $f=60$ Hz e $V=127$ volts.

A engenhosa escolha de geração senoidal permite que os sinais elétricos de tensão e corrente nos mais diferentes pontos do sistema elétrico, em condições de regime permanente, também sejam senoidais de mesma frequência.

Considerando agora a corrente:

$$i(t) = \sqrt{2} I \text{ sen}(\omega t - \varphi), \quad (4)$$

a potência elétrica, dada pelo produto tensão vezes corrente, vale:

$$\begin{aligned} p(t) &= 2 VI \text{ sen}(\omega t) \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi) = \\ &= [VI \cos \varphi (1 - \cos 2\omega t)] - [VI \sin \varphi \sin 2\omega t] = \\ &= \text{parcela I} - \text{parcela II} \end{aligned} \quad (5)$$

Os gráficos de tensão, corrente e potência estão indicados na Figura 1 para $V=2$ volts, $I=1$ ampère e $\varphi = \pi/3 = 1,05$ rad. Nota-se que:

- A frequência da potência é o dobro da frequência da tensão ou corrente.
- A parcela I só assume valores maiores do que zero, mas a potência total possui também valores negativos, em vista da contribuição da parcela II.

- c) O valor médio da potência vale $P = VI \cos \varphi$, conhecido como potência ativa. Isto corresponde ao valor médio da parcela I.
- d) A parcela II possui valor médio nulo e valor máximo dado por $Q = VI \sin \varphi$. Isto significa uma troca de potência entre os geradores e as cargas industriais, comerciais e residenciais. Q é chamada de potência reativa.
- e) Chama-se fator de potência o valor $\cos \varphi$. A legislação brasileira penaliza as indústrias cujo fator de potência seja menor do que 0,92. Nota-se que quanto menor $\cos \varphi$ tanto maior a região de potência negativa. Esta taxaço existe uma vez que não há interesse em permitir a presença desta parcela de potência negativa, ou seja, fluindo da carga para a geração.
- f) P e Q possuem dimensão de potência, no entanto, para diferenciar, expressa-se P em W (watt) e Q em var.
- g) A grandeza $S = VI$ é conhecida como potência aparente e relaciona-se com P e Q através de $S^2 = P^2 + Q^2$, formando um triângulo retângulo de hipotenusa S e catetos P e Q.

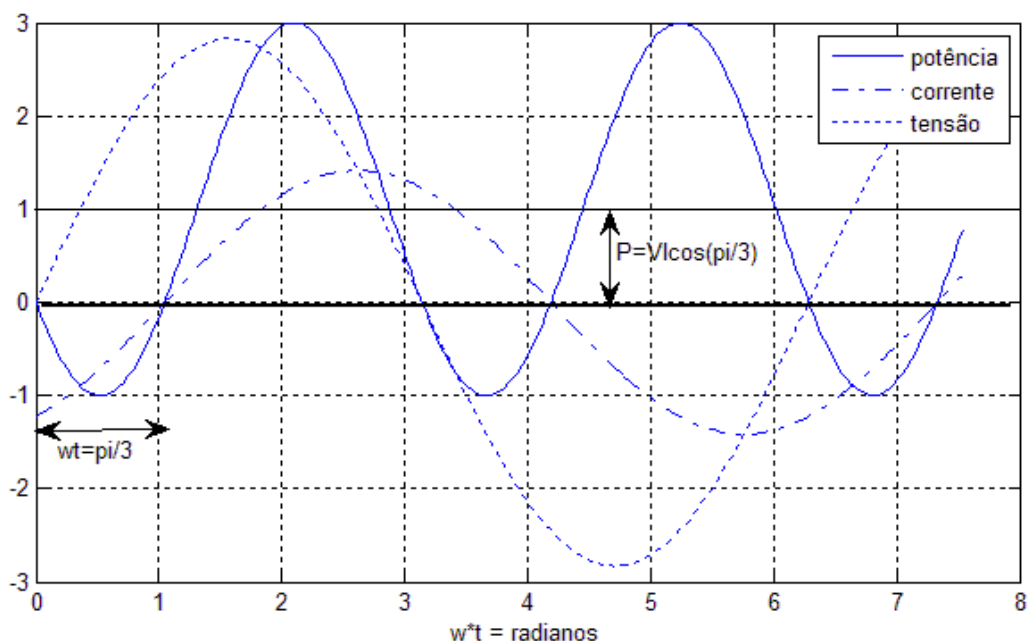


Figura 1. Potência nos circuitos CA ($V=2V$, $I=1A$, $\varphi= \pi/3$, $\cos\varphi= 0,5$)

EXERCÍCIO 4: Define-se “valor eficaz” de um sinal $y(t)$ por:

$$Y_{rms} = \sqrt{\left(\frac{1}{T}\right) \int_0^T y(t)^2 dt}$$

O “valor eficaz” recebe também o nome “valor médio quadrático”, ou, em inglês, “root mean square” (rms).

a) Mostre que o valor eficaz do sinal $v(t)$ dado pela Eq. 3 vale V .

b) Verifique que a potência média dissipada sobre uma resistência R , alimentada pela tensão alternada (CA) dada por $v(t)$, possui o mesmo valor que a potência dissipada caso a fonte de tensão fosse uma bateria (tensão CC) de valor V .

c) Considerando R como a resistência de um chuveiro ou aquecedor elétrico, qual o significado do resultado do item anterior em termos da temperatura da água.

d) Você considera o nome “valor eficaz” apropriado?

EXERCÍCIO 5: Deduza a relação apresentada na Eq.(5).

5.3 Potência Reativa

O fluxo de caixa de uma instituição sem fins lucrativos serve para exemplificar o que significa potência reativa. Suponha que exista uma entrada de R\$5mil todos os dias do mês, no entanto, nos quinze primeiros dias existem contas diárias a pagar no valor de R\$6mil e nos quinze dias restantes R\$4mil (considere os meses com 30 dias). Diariamente, o caixa fica negativo R\$1mil nos 15 primeiros dias do mês e R\$1mil positivo nos 15 dias restantes. O fluxo médio vale R\$5mil. A parcela de R\$1mil faz o papel da potência reativa. Em termos financeiros, na prática, existe o custo do dinheiro que precisa ser tomado emprestado nos primeiros dias do mês. Em termos elétricos, existe o custo das perdas adicionais nas linhas de transmissão e o custo maior da capacidade de potência que precisa estar instalada.

6 Monofásico x Trifásico

Como vimos, a potência (p) nos circuitos de corrente alternada oscila com o dobro da frequência da tensão de alimentação e existem momentos em que a potência flui da carga para a geração. O desempenho melhora com o sistema de geração trifásico, constituído por três sistemas monofásicos senoidais, porém defasados, como retratado matematicamente abaixo e graficamente na Figura 2 para uma rede com $V=127$ volts e $\omega = (2\pi \cdot 60)$ rad/s.

$$\begin{aligned}v_1(t) &= \sqrt{2} V \text{ sen}(\omega t) \\v_2(t) &= \sqrt{2} V \text{ sen}(\omega t + 2\pi/3) \\v_3(t) &= \sqrt{2} V \text{ sen}(\omega t - 2\pi/3).\end{aligned}\quad (6)$$

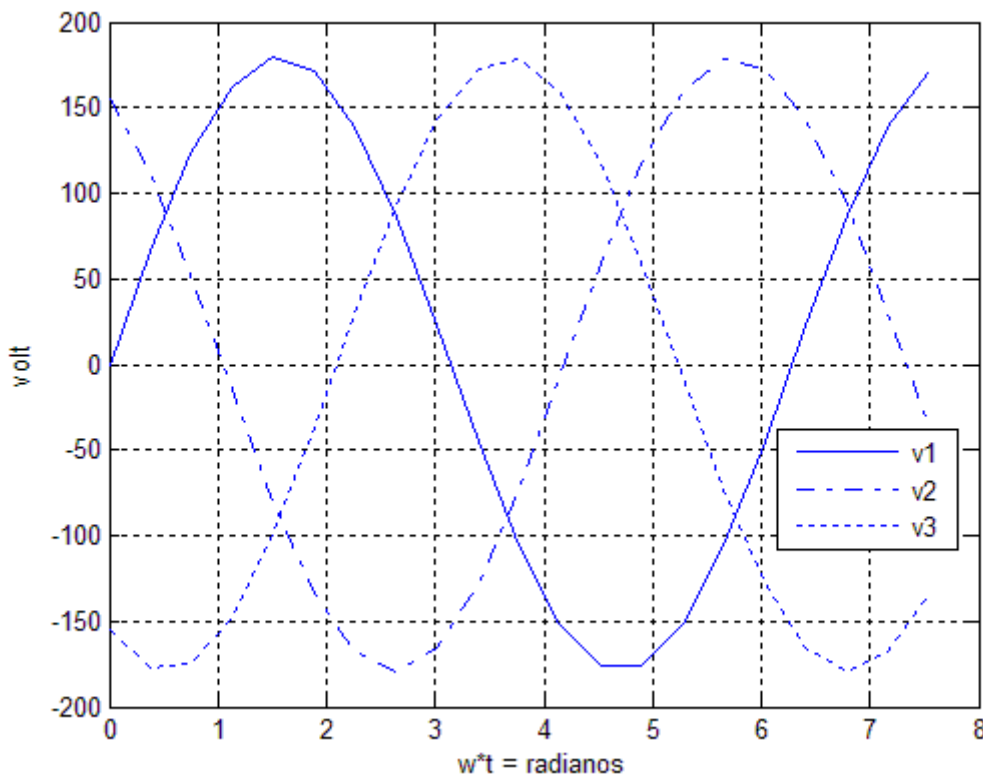


Figura 2. Tensões de alimentação de um sistema trifásico

Se as cargas dos três sistemas forem iguais, circularão as correntes:

$$\begin{aligned}i_1(t) &= \sqrt{2} I \text{ sen}(\omega t - \varphi) \\i_2(t) &= \sqrt{2} I \text{ sen}(\omega t + 2\pi/3 - \varphi) \\i_3(t) &= \sqrt{2} I \text{ sen}(\omega t - 2\pi/3 - \varphi).\end{aligned}\quad (7)$$

Agora, um pequeno exercício de trigonometria mostrará que se:

$$\begin{aligned} p_1(t) &= 2 VI \sin(\omega t) \cdot \sin(\omega t - \varphi) \\ p_2(t) &= 2 VI \sin(\omega t + 2\pi/3) \cdot \sin(\omega t + 2\pi/3 - \varphi) \\ p_3(t) &= 2 VI \sin(\omega t - 2\pi/3) \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3 - \varphi) \end{aligned} \quad (8)$$

então:

$$p = p_1 + p_2 + p_3 = 3 VI \cos \varphi. \quad (9)$$

Isto é um valor constante!!!

Os sistemas trifásicos ainda apresentam como vantagem a diminuição na quantidade de condutores e material magnético necessário na construção de equipamentos elétricos. Para dar uma ideia de como se consegue isto, recorre-se à visualização geométrica dada pela Figura 3. A projeção dos vetores I_1, I_2, I_3 sobre o eixo “y” fornece o valor das correntes i_1, i_2, i_3 da Equação (7). Em Engenharia Elétrica, I_1, I_2, I_3 são conhecidos como os fasores representativos das correntes. Como a soma destes fasores, sendo de mesma amplitude e defasados de 120° , é zero, conclui-se que a soma das projeções também será zero ($i_1+i_2+i_3=0$).

$$|I_1| = |I_2| = |I_3| = \sqrt{2} I$$

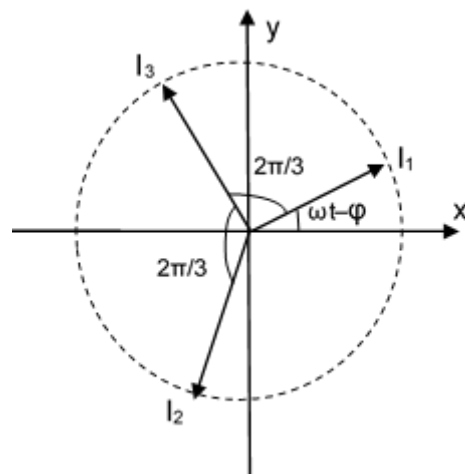


Figura 3. Fasores representativos de um sistema trifásico

Assim, três sistemas monofásicos de transmissão, devidamente defasados, podem ser substituídos por um trifásico com metade dos condutores necessários, como ilustrado na Figura 4.

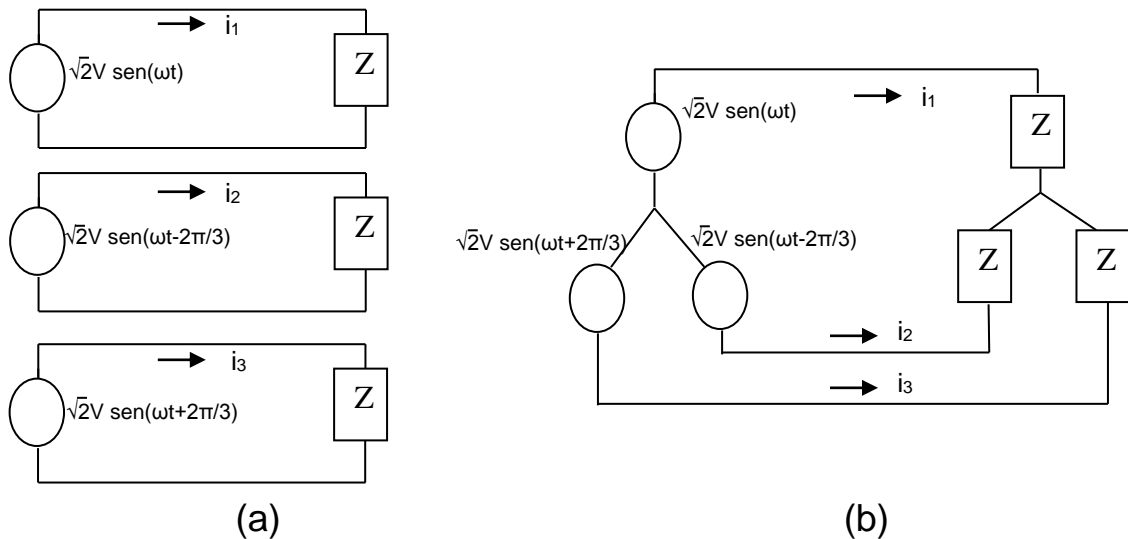


Figura 4.

- (a) três sistemas monofásicos com 6 condutores de alimentação
 (b) um sistema trifásico equivalente com apenas 3 condutores

EXERCÍCIO 6: A partir da Eq.(5) e valendo-se do conceito de fasor, deduza a Eq.(9).

7 Frequências de 50Hz, 60Hz e 400Hz

Decisões na vida são geralmente uma solução de compromisso. Nada possui apenas vantagens e sempre precisa-se ceder em algum aspecto. Assim ocorre com a frequência de operação de um sistema CA. Se for muito baixa, haverá percepção visual na alteração da luminosidade das lâmpadas. O volume dos equipamentos também será maior pois o fluxo magnético, que dita a área dos circuitos magnéticos, é inversamente proporcional à frequência. Se for muito alta, a impedância dos circuitos indutivos tornará impraticável a transmissão com longos cabos ou linhas. Industrialmente, as frequências de 50 e 60 Hz se estabeleceram como as mais empregadas, a escolha aparecendo quase como uma tentativa de reserva de mercado. A Europa adota largamente 50 Hz, enquanto os EUA,

60Hz. No Brasil, a frequência é de 60 Hz, mas em muitos outros países da América Latina adotou-se 50 Hz.

A frequência de 400 Hz apresenta vantagens no caso de sistemas de pequena extensão, como é o caso do sistema elétrico de aviões. O aumento da impedância fica largamente compensado pela diminuição do peso de geradores, motores e transformadores construídos para 400 Hz.

EXERCÍCIO 7: A hidroelétrica de Itaipu fornece energia tanto ao Brasil, que opera à 60 Hz, quanto ao Paraguai, que trabalha com 50 Hz. Qual solução foi adotada para conviver com esse fato?

8 Modelagem e Sistemas Lineares

Chama-se modelo de um sistema físico uma formulação que o represente de forma manipulável matematicamente. Os modelos são ferramentas muito importantes na solução dos problemas de engenharia. A partir dos modelos, torna-se possível prever e controlar o comportamento dos sistemas físicos. Aprimoramentos são introduzidos quando se percebe um distanciamento entre a realidade e aquilo que a modelagem fornece. Comumente se inicia com um sistema linear, ou seja, aquele que respeita o comportamento ilustrado na Figura 5, em que u_1 e u_2 representam sinais de entrada, y_1 e y_2 sinais de saída e α , β são constantes.

Justamente pela previsibilidade na sua resposta, existem muitas ferramentas e métodos de análise e controle para sistemas lineares. Os modelos lineares costumam ser válidos apenas para condições em torno de um ponto de operação estável e quando as variações, às quais o sistema for submetido, produzirem efeitos proporcionalmente pequenos.

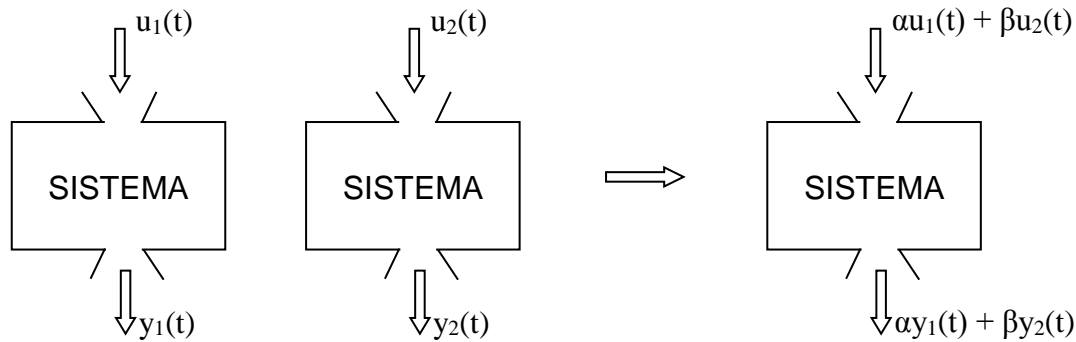


Figura 5. Propriedade dos sistemas lineares

Os sistemas de potência, objeto de estudo no curso de Engenharia Elétrica, só apresentam comportamento linear para variações de carga ou geração de pequeno valor, comparativamente ao que está sendo fornecido. Em situações de curto-circuito, perda de geração ou transmissão, entrada ou saída de grandes cargas, a dinâmica não linear prevalece. Além da não linearidade, os sistemas de potência apresentam características variantes no tempo e são de grande porte, com múltiplas entradas e saídas. Um prato cheio para trabalhos de engenharia!

9 Sistema de Potência

A Figura 6 mostra o Sistema Interligado Nacional (SIN) Brasileiro, obtido da página da ONS (ver Exercício 14). Os diferentes níveis de tensão das linhas de transmissão, representados em cores diferentes, a existência de transmissão em corrente contínua, o entrelaçamento dos circuitos, comprovam a grandiosidade dessa obra de engenharia. São mais de 150 GW de capacidade de geração, distribuída por quase 5.000 empreendimentos, dos quais praticamente 2/3 oriundos de hidroelétricas (Oliveira, 2017). A expansão, manutenção e operação deste complexa 'máquina', bem como a comercialização da energia elétrica, exigem engenheiros bem formados e capacitados para garantir o suprimento contínuo de eletricidade para o parque industrial, comercial e residencial do nosso País.

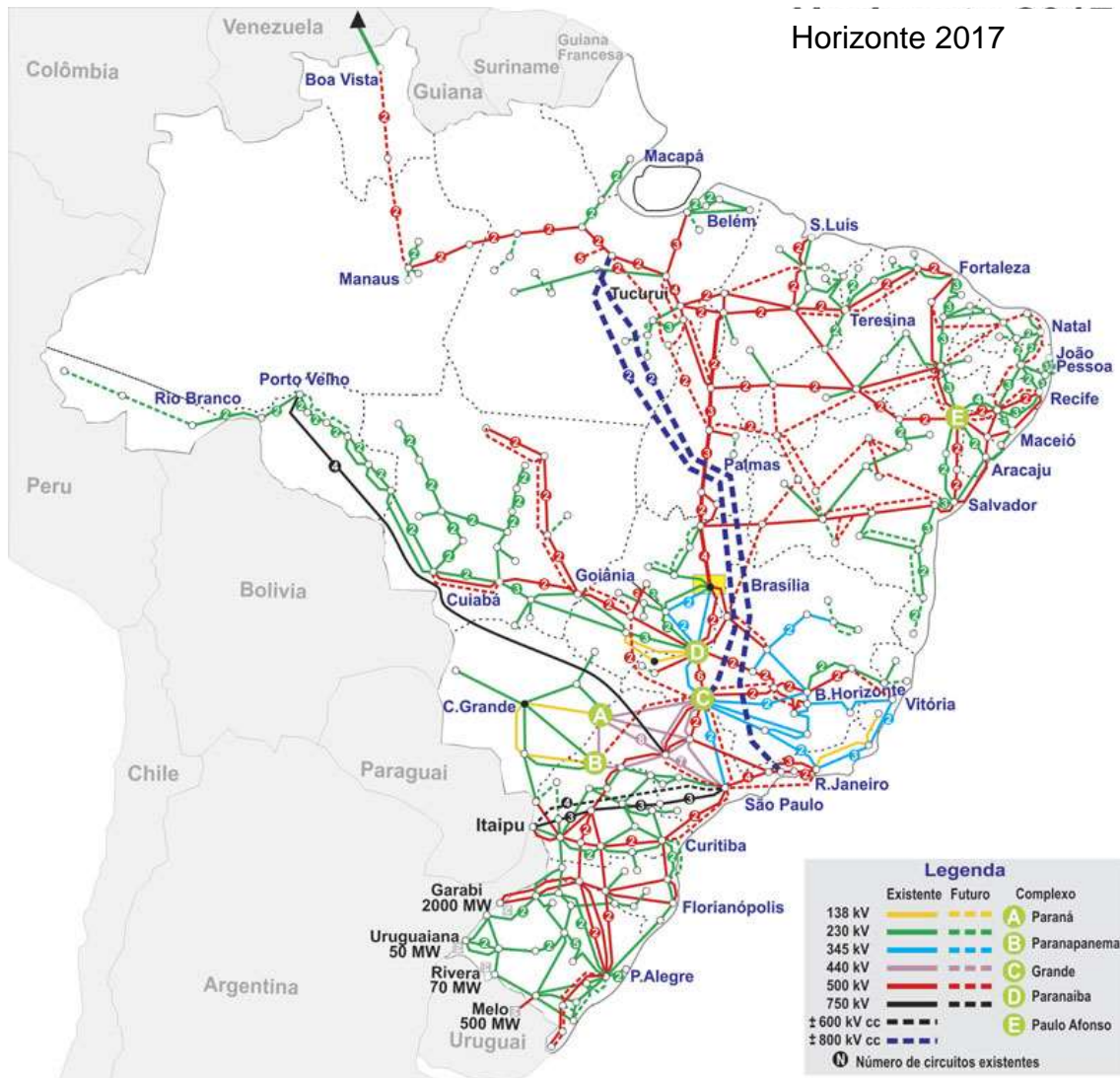


Figura 6. O sistema de potência brasileiro.

10 Harmônicos e Resposta em Frequência

Sinais periódicos, ou seja, aqueles que se repetem a um mesmo período de tempo (T), podem ser expressos como a soma de uma série infinita de sinais senoidais. Devemos este conhecimento ao matemático francês Joseph Fourier (*1768; †1830).

Matematicamente escreve-se:

Se $g(t) = g(t+T)$ e o valor médio de $g(t)$ é zero, então

$$g(t) = \sum_{n=1}^{n=\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)], \quad (10)$$

com $\omega = 2\pi/T$ e

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} g(t) \cos(n\omega t) d(\omega t), \quad (11)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} g(t) \text{sen}(n\omega t) d(\omega t). \quad (12)$$

A frequência angular ω é conhecida como fundamental ou primeira harmônica. Segue $\omega_2 = 4\pi/T$, segunda harmônica; $\omega_3 = 6\pi/T$, terceira harmônica, e assim por diante. A decomposição dada pela Equação (10) é conhecida como Série de Fourier.

Sinais não periódicos podem ser interpretados como sinais de período infinito. Neste caso, o espectro de frequências será contínuo e não apenas restrito aos valores discretos $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots$ dados pela Série de Fourier. A esta nova transformação dá-se o nome de Transformada de Fourier.

Tanto na Série quanto na Transformada de Fourier, a variável livre é a frequência, não mais o tempo. Os Engenheiros Eletricistas trabalham muito no domínio da frequência. Sem dúvida, o domínio do tempo é mais intuitivo, no entanto, muitos estudos ficam simplificados se conduzidos no domínio da frequência. Na verdade, o conhecimento do comportamento estacionário de um sistema linear, para uma vasta gama de frequências, permite deduzir a dinâmica transitória deste sistema no tempo. Tudo se passa como se uma pessoa conhecesse profundamente outra por terem partilhado longos períodos de alegria, tristeza, raiva, relaxamento, cansaço, dor, prazer (ou seja, em diferentes frequências de batimento cardíaco) que não teria dificuldade em prever qual seria a reação perante uma notícia inesperada. Esta analogia carece de precisão, pelo fato dos seres humanos serem sistemas não lineares.

As chamadas curvas de resposta em frequência guardam assim muita informação importante para a interpretação dos enge-

nheiros. Alguns sistemas, quando excitados em determinadas frequências, possuem amplitudes de saída elevadas comparativamente à entrada, como ilustrado na Figura 6 para a frequência angular ω_r , chamada de frequência de ressonância. Este fenômeno ocorre, por exemplo, com estruturas de pontes e viadutos. Sabedores disso, os comandantes não permitem que tropas atravessassem pontes marchando. A batida ritmada poderia excitar a estrutura da ponte e produzir oscilações de amplitude danosa.

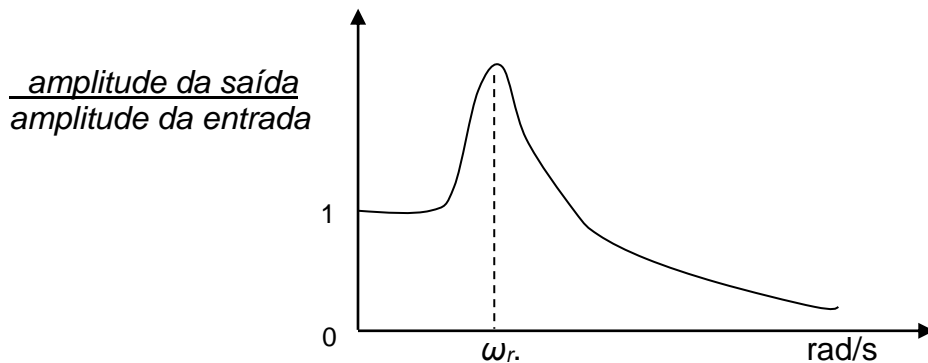
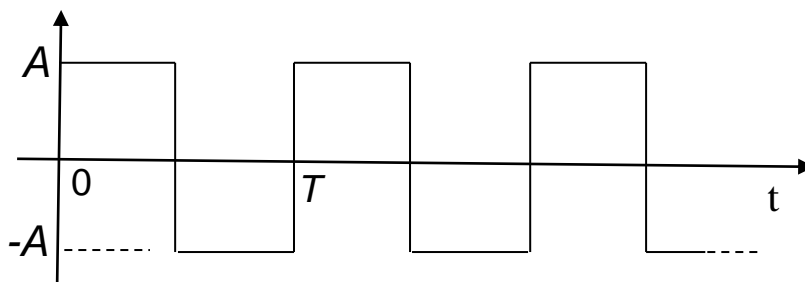


Figura 7. Resposta em frequência de um sistema com ressonância

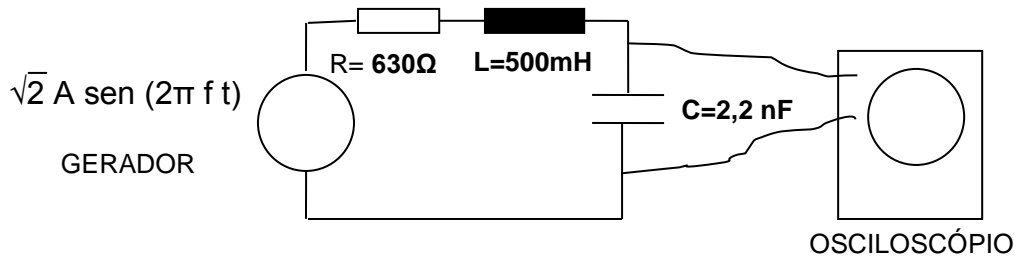
EXERCÍCIO 8: Procure se informar sobre o problema de ressonância que existia na ponte Rio-Niterói. Como este problema foi resolvido? Quem propôs a solução?

EXERCÍCIO 9: Onde e para que são usados os amortecedores conhecidos como “stockbridge”? Por que recebem esse nome?

EXERCÍCIO 10: Calcule os coeficientes (eqs. 11 e 12) da Série de Fourier de uma onda quadrada de amplitude A e valor médio zero. Mostre que os termos em cosseno são nulos, e os termos em seno só existem para os harmônicos ímpares e valem $b_n = (4A)/(n\pi)$.



EXPERIÊNCIA 1: Monte o circuito RLC abaixo e varie a frequência (f) do gerador de 1Hz até 10kHz. Determine experimentalmente a frequência de ressonância e compare com o valor $(2\pi\sqrt{LC})^{-1}$.



11 Sistemas de Controle

O controle de um processo só se dá definitivamente após as etapas de modelagem e análise. Esta sequência está esquematizada na Figura 7 e apresenta o procedimento regular adotado em projetos de engenharia. Quando a análise não fornece resultados compatíveis com a realidade, o modelo precisa ser aprimorado através de métodos de identificação. Quando o controle implementado não funciona, deve-se suspeitar de uma análise superficial ou de um modelo inadequado. Estas reavaliações estão sugeridas na figura através das linhas de retorno.

Os sistemas de comando ou controle à malha aberta exigem um conhecimento muito preciso do processo em estudo.

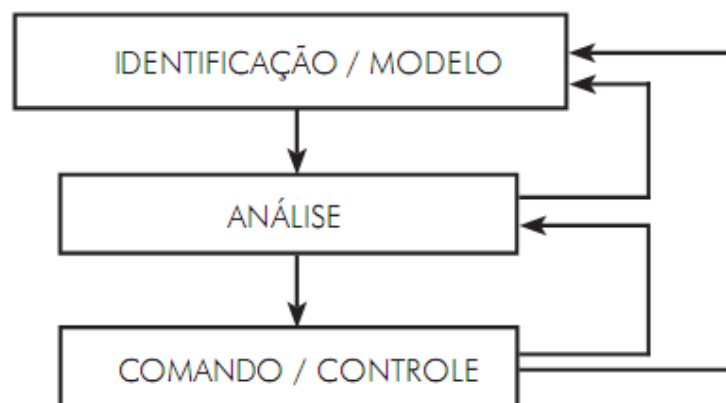


Figura 8. Procedimento de projetos em engenharia

Já os sistemas de controle à malha fechada (Figura 8), graças à realimentação, apresentam como vantagens:

- Rejeição de perturbações externas.
- Compensação de variações dos parâmetros do processo.
- Imposição de uma dinâmica diferente da original.

Como ponto negativo, os sistemas à malha fechada são mais complexos uma vez que, para sua implementação, são necessárias:

- Sensores (transdutores).
- Controladores.
- Atuadores, que convertem os sinais de baixa potência dos controladores em entradas do processo.

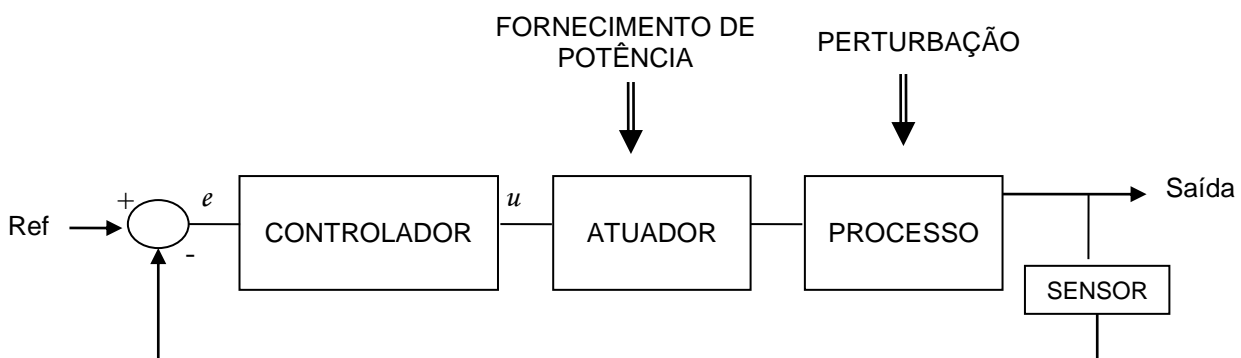


Figura 9. Sistema de controle à malha fechada

O projeto do controlador também exige técnicas especiais. Intuitivamente, percebe-se que o sinal de erro obtido pela diferença entre um sinal de referência desejado e a atual saída do processo, indicado por "e" na Figura 8, permitirá que se tomem as ações adequadas para determinar os sinais de entrada do processo. No entanto, o processamento do sinal de erro, se não for corretamente escolhido, pode ser catastrófico para o desempenho do sistema realimentado. Vários exemplos da vida cotidiana servem para ilustrar estes inter-relacionamentos. Por exemplo, basta pensar nas

ações tomadas por um pai quando percebe que o comportamento de determinado filho está se distanciando de uma referência desejada. A forma como este desvio é processado e as ações daí resultantes podem fazer com que o filho se recupere ou se perca totalmente. Este exemplo figurativo mostra também que o conhecimento do processo a ser controlado (no caso, o filho) facilita muito as ações do controlador (no caso, o pai).

Para os sistemas industriais, o processamento do sinal de erro através de ações proporcional (P), integral (I) e derivativa (D) costuma ser suficiente. Este controlador é conhecido como PID. Chamando K_p - Ganho, T_I Tempo integral e T_D Tempo derivativo, a expressão do controlador PID assume a forma matemática:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right]. \quad (13)$$

A parcela proporcional fornece uma resposta imediata para sinais de erro. A parcela derivativa reage em função da taxa de variação do erro e influencia principalmente os instantes transitórios. A parcela integral garante erro zero em condições de regime permanente com referências e perturbações constantes. Isto porque, a saída do integrador só fornece um sinal constante se sua entrada for nula. Naturalmente, estas conclusões partem do princípio que o sistema realimentado é estável.

Além da condição de estabilidade, que se impõe como pré-requisito, outras características permitem definir o comportamento dinâmico de um sistema linear. Usualmente, para uma entrada em degrau, quantifica-se a resposta dinâmica através do tempo de subida (t_r), do tempo de assentamento (t_s), do tempo de pico (t_p) e do sobrepasso (M_p), apresentados na Figura 9 para um sistema com erro de regime zero.

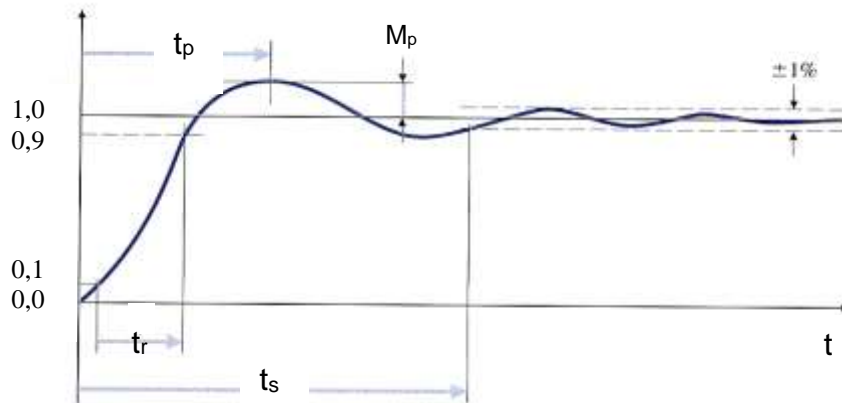


Figura 10. Características de desempenho para uma entrada em degrau unitário e sistema com erro de regime zero

A Engenharia Elétrica estuda técnicas de projeto que permitem determinar o controlador de tal forma que o sistema realimentado apresente um comportamento pré-estabelecido. Um dos trabalhos seminais nesta área, intitulado “On Governors”, data de 1868 e foi escrito por J.C. Maxwell, o mesmo autor da teoria eletromagnética apresentada no capítulo 3. Ele abordou o problema da estabilidade de sistemas dinâmicos de controle de velocidade, dentre os quais aquele proposto por J. Watt, em 1788, para máquinas a vapor (Bennett, 1986).

EXERCÍCIO 11: Considere o funcionamento da boia de uma caixa d’água. Explique a presença de uma malha controle de nível com ação integral¹.

12 Eletrônica de Potência

Os dispositivos semicondutores, que vieram a substituir as válvulas eletrônicas, permitiram a grande revolução da microeletrônica que presenciamos cotidianamente. O passo inicial foi dado pela in-

¹ **Dica:** Vazão é a razão entre volume e tempo. Relacione o nível d’água (h) com a integral da vazão. Relacione o erro entre o valor de “h” e a altura da caixa d’água cheia, com a abertura da válvula da boia e com a vazão. Em seguida, feche uma malha de controle como a da Figura 8.

venção do transistor por Walter Brattain, John Bardeen e William Shockley em 1947. Eles receberam o prêmio Nobel em 1956 por este trabalho. Vale aqui registrar que Bardeen (*1908; †1991) foi agraciado com um segundo prêmio Nobel em 1972, desta feita pela proposição da teoria BCS (Bardeen, Cooper, Schriffer) que explica, em termos quânticos, o fenômeno da supercondutividade, outro assunto que está ganhando importância para a Engenharia Elétrica e que será abordado no próximo capítulo.

A eletrônica de potência também trata do condicionamento de sinais, como a microeletrônica, mas trabalha com sinais de potência, que atingem até mesmo MW (10^6 W). Os dispositivos empregados também são semicondutores, porém suportam correntes e tensões milhares de vezes superiores aos outros.

O primeiro dispositivo semicondutor de potência foi o tiristor, que chegou ao mercado por volta de 1958. As décadas de 70 e 80 presenciaram o aparecimento de novos semicondutores de potência com controle de condução e bloqueio, abrindo perspectivas espetaculares para aplicações em Engenharia Elétrica. Pode-se tentar dividir esta evolução em três gerações:

1^a. geração (1958-1975): Tiristor (SCR)

2^a. geração (1975-1985): Transistor de potência (BJT)

MOSFET de potência

GTO (Gate Turn-Off Thyristor)

3^a. geração (1985..): IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

Cada dispositivo citado possui capacidade de potência e características de condução e bloqueio (uni-direcional, bi-direcional, controlável, não-controlável) bem como sinais de controle (contínuo, pulsante, na forma de tensão ou corrente) particulares.

Estes dispositivos são empregados como chaves (“on”- “off”) eletrônicas. É muito importante destacar que, quando se trata de condicionamento de sinais de potência, esta é a única forma eficiente de operação, pois as perdas com os semicondutores conduzindo ou bloqueados são praticamente nulas. As perdas concentram-se principalmente nos tempos de “turn-on” e “turn-off”. Nestes momentos, tensão (v) e corrente (i) estão simultaneamente presentes sobre o semicondutor e a potência de perda ($p=v.i$) não é mais desprezível (Figura. 10).

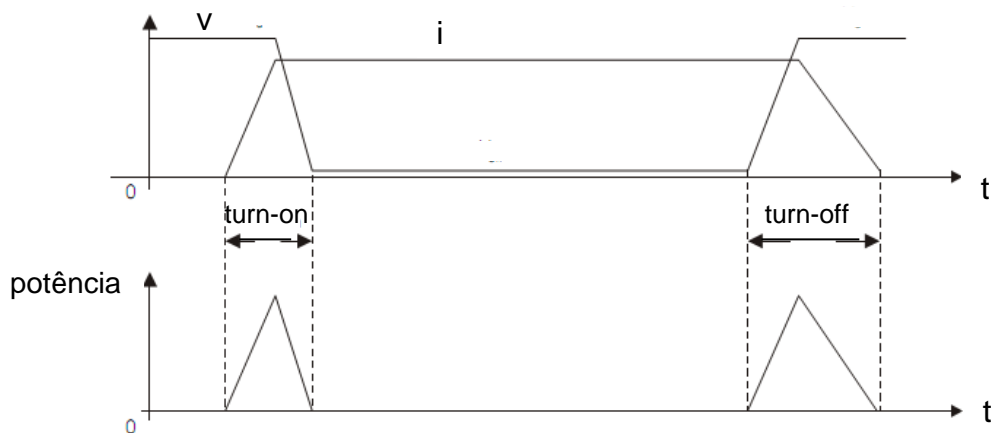
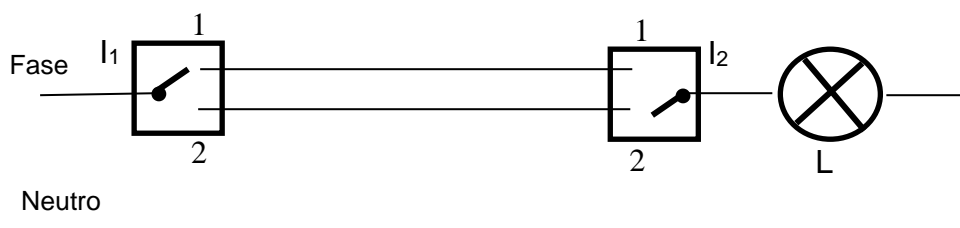


Figura 11. Perdas no chaveamento de dispositivos semi-condutores

Nos dias de hoje, a eletrônica de potência está presente nas indústrias, nos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica e até nas nossas residências, desempenhando um papel importante no aproveitamento das fontes alternativas de energia, como solar e eólica.

EXERCÍCIO 12: O circuito elétrico abaixo permite ligar ou desligar a lâmpada (L) de um corredor a partir de dois interruptores (I_1 e I_2) localizados em pontos extremos do ambiente.

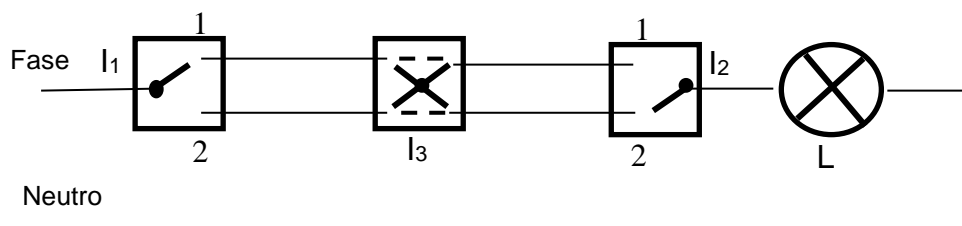


a) Os interruptores possuem duas posições (1-2). Considerando a posição 1 como verdadeiro (V) e a posição 2 como falso (F), qual função lógica (“ou”, “ou exclusivo”, “e”, “não e”, etc.) encontra-se realizada no esquema que permite ligar (V) ou desligar (F) a lâmpada?

b) Existe uma ligação desse tipo na sua residência? Em que cômodo?

c) Qual o nome comercial para designar esse interruptor?

O próximo circuito possui um novo interruptor (I_3), também com duas posições, mas um pouco diferente dos anteriores. Note que agora é possível ligar ou desligar a iluminação alterando a posição de qualquer um dos três interruptores.



d) Qual o nome comercial desse novo tipo de interruptor?

e) Proponha um circuito que permita ligar ou desligar a lâmpada de quatro locais utilizando os interruptores apresentados.

EXPERIÊNCIA 2: Agende uma visita ao laboratório para ver montagens com o circuito do exercício anterior e outras instalações elétricas, inclusive com conversores de eletrônica de potência.

13 Supercondutividade

O uso de novos materiais resulta sempre em grandes transformações tecnológicas e culturais. Assim, a pedra polida, o bronze, o ferro, o aço, os plásticos e, certamente, os semi-condutores impactaram o desenvolvimento da humanidade. Há pouco mais de 100

anos, o físico holandês H. Onnes descobriu a propriedade supercondutora do mercúrio quando refrigerado à temperatura de liquefação do hélio, próximo do zero absoluto (-273°C). Nestas condições, a resistividade elétrica do mercúrio é nula. Em 1933, W. Meissner e R. Ochsenfeld descobriram que os supercondutores também apresentam diamagnetismo perfeito, ou seja, excluem campos magnéticos. As contribuições ocorridas desde então no que diz respeito à supercondutividade permitem antever que os materiais supercondutores terão um significado histórico transformador neste século XXI. Esta evolução encontra-se irrefutavelmente documentada nos prêmios Nobel em Física relacionados na Tabela 1.

Os equipamentos de ressonância nuclear magnética, corriqueiros nos diagnósticos médicos dos dias de hoje, empregam supercondutores. Com fios e cabos supercondutores, os motores elétricos, transformadores e linhas de transmissão poderão ocupar menos espaço com peso cerca de 5 vezes menor do que os atuais.

14 Os Cursos de Engenharia

Como nos ensina o professor Silva Telles (1984) o *“conceito atual de engenheiro, isto é, uma pessoa diplomada e legalmente habilitada a exercer alguma das múltiplas atividades da engenharia, é relativamente recente, podendo-se dizer que data da segunda metade do Século XVIII.”*

No Brasil, a criação da Real Academia de Artilharia, Fortificação e Desenho, que constitui a base da engenharia nacional, data de 1792. A Escola Politécnica da UFRJ descende, em linha direta, dessa Real Academia ².

² Consulte, por exemplo, a página da Escola (http://www.poli.ufrj.br/politecnica_historia.php).

Tabela 1. Prêmios Nobel em Supercondutividade

H. Onnes	1913	Por pesquisas sobre as propriedades da matéria a baixas temperaturas e pela produção do hélio líquido.
L. Landau	1962	Por teorias pioneiras sobre a matéria condensada, especialmente o hélio líquido.
J. Bardeen L. Cooper J. Schriffer	1972	Pelo desenvolvimento da teoria da supercondutividade, conhecida como Teoria BCS.
B. Josephson	1973	Por previsões teóricas de super correntes em barreiras de tunelamento.
J. Bednorz K. Müller	1987	Por fundamentais avanços na descoberta de materiais cerâmicos supercondutores de elevadas temperaturas críticas (refrigeráveis com nitrogênio líquido).
A. Abrikosov V. Ginzburg	2003	Por contribuições à teoria dos supercondutores, efeito Pinning.

Originalmente, destacavam-se as atividades em construções, especialmente de natureza militar ou religiosa. Com o passar dos anos, novas especialidades receberam destaque. Atualmente, são muitas as denominações dos cursos de engenharia: Ambiental, Civil, Computação, Controle, Elétrica, Eletrônica, Mecânica, Metalurgia, Nanotecnologia, Naval, Nuclear, Petróleo, Produção, Química, Telecomunicações, entre outras. Em uma visão holística, os cursos de engenharia dividem-se em três grandes categorias:

- Cursos que tratam de materiais: Metalurgia e Química.
- Cursos clássicos (dorsais): Elétrica/Eletrônica, Mecânica e Civil.
- Cursos complementares: constituídos a partir da combinação dos acima mencionados, muita vez com a inclusão de outras formações, como ciências naturais, humanas e economia.

Independente da especialidade, o jovem estudante de engenharia deve procurar criar bases sólidas de conhecimento, como os pilares sobre os quais irá construir sua carreira profissional. Nesse sentido, o curso de Engenharia Elétrica representa uma grande oportunidade de formação.

15 O Trabalho do Engenheiro Eletricista

A atuação do engenheiro eletricista, como ilustrado na capa deste livreto, abrange as seguintes áreas:

- Geração de Energia Elétrica.
- Transmissão de Energia Elétrica.
- Distribuição de Energia Elétrica.
- Utilização de Energia Elétrica.

O princípio físico de conversão de energia mecânica em elétrica foi engenhosamente aproveitado para a construção de eficientes máquinas elétricas conhecidas como geradores. Com a contribuição, principalmente da engenharia civil e da engenharia mecânica, a geração de energia elétrica pode ser obtida a partir das mais diferentes fontes primárias, como quedas d'água, vento, energia nuclear, gás, carvão, óleo, etc...

Cabe ao engenheiro eletricista condicionar adequadamente, em termos de tensões, correntes, frequência e fluxo de potência, a energia oriunda dos geradores elétricos. O engenheiro eletricista encontra também espaço de trabalho no planejamento e controle do uso das diferentes fontes de energia.

Uma vez gerada, essa energia precisa ser transmitida para os locais de consumo. O projeto e a operação de linhas de transmissão, frequentemente vistas cruzando rodovias, campos e montanhas, cabem ao eletricista.

Chegando próximo aos centros de consumo, a energia elétrica necessita ganhar capilaridade e ser distribuída para múltiplos consumidores industriais, públicos, comerciais e residenciais. O projeto de subestações, linhas de distribuição, tanto aéreas quanto subterâneas, sistemas de proteção, adequação de carga, são tarefas do engenheiro eletricista.

Finalmente, nos locais de consumo, o engenheiro eletricitista encontra vastíssimo campo de atuação no projeto, instalação e manutenção de prédios industriais, públicos, comerciais e residenciais. Atualmente, eficiência energética, automação, sustentabilidade e confiabilidade direcionam seu trabalho.

Modernamente, nas chamadas redes inteligentes (“smart grids”), novos desafios são lançados para o engenheiro eletricitista no que tange os aspectos de geração, transmissão, distribuição e utilização da energia elétrica. A energia fotovoltaica, por exemplo, ocupa um espaço cada vez maior, com contribuição de inúmeros pequenos agentes fornecedores, que antigamente só participariam como consumidores, agora integrados ao sistema elétrico.

A base matemática e o conhecimento dos processos industriais, adquiridos no curso de engenharia elétrica, fazem com que muitos encontrem colocação em atividades relacionadas com o setor econômico, administrativo ou gerencial, bem como em centros de pesquisa pura e aplicada.

Efetivamente, a eletricidade oferece um excelente meio de transporte de energia. Além disso, os métodos de transformação de eletricidade em calor, força, luz, movimento, informação, imagem, som, entre inúmeras aplicações, são extremamente eficientes. Em analogia, a eletricidade desempenha para a engenharia um papel semelhante ao da moeda para a economia.

$$\frac{\text{Eletricidade}}{\text{Engenharia}} = \frac{\text{Moeda}}{\text{Economia}}$$

Para reforçar ainda mais essa analogia, assim como o dinheiro, o armazenamento de eletricidade também requer cuidados especiais.

Nesse contexto se insere o trabalho do engenheiro eletricitista.

EXERCÍCIO 13: Apresente dois métodos de armazenamento de energia diretamente na forma elétrica. Destaque se são CC ou CA. Enuncie dois métodos indiretos corriqueiramente empregados para armazenamento de energia e posterior conversão em energia elétrica. Compare com a problemática da poupança monetária.

EXERCÍCIO 14: Consulte os domínios da EPE, ONS, ANEEL e CCEE. Resuma o papel desses órgãos no setor elétrico Brasileiro.

EXERCÍCIO 15: Obtenha o fluxograma com as disciplinas do curso de Engenharia Elétrica. Destaque, com uma caneta colorida, aquelas que você associa com o material apresentado na disciplina Introdução à Engenharia Elétrica, tanto na forma de texto quanto na forma de exercícios, palestras, visitas ou trabalhos. Quanto vale a razão DD/TD, em que DD é o número de Disciplinas Destacadas e TD o Total de Disciplinas do fluxograma.

16 Conclusão

Três sentenças de Lord Broers, extraídas de suas conferências apresentadas para as Reith Lectures da rádio BBC 4, em 2005, sob o título “The Triumph of Technology”, se emprestam muito bem como mensagem final destas notas de aula:

“It is time to appreciate the intellectual challenge behind product development.... This can be more challenging than fundamental science and requires the very best minds....”

“There are few more satisfying activities than the creation of new technologies for the benefit of humankind. Creative engineers may

not receive the recognition they deserve but it rarely troubles them - the satisfaction they derive from their jobs is unsurpassed.”

“Technology by necessity must be practicable and economically sensible. With science, discovery is sufficient.”

EXERCÍCIO 16: Traduza as frases de Lord Broers.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agostinho, M. (2015); *Introdução à Engenharia*, Lexiton, RJ.

Bazzo, W.A.; Pereira, L.T. (2006); *Introdução à Engenharia: conceitos, ferramentas e comportamentos*, Ed. UFSC, Florianópolis.

Bennett, S. (1986); *A History of Control Engineering, 1800-1930*, Peter Peregrinus - IEE, London.

Benett, S. (1993); *A History of Control Engineering, 1930-1955*, Peter Peregrinus - IEE, London.

Blundell, S. (2009); *Superconductivity: a very short introduction*, Oxford Press, New York.

Bodanis, D. (2008); *Universo Elétrico*, Ed. Record, Rio de Janeiro.

Broers, A. (2005); *The Triumph of Technology*, BBC Radio 4, <http://www.bbc.co.uk/radio4/reith2005/>, acessado 11/01/ 2016.

Elgerd, O.I. (1978); *Teoria de Sistemas de Energia Elétrica*, Mc. Graw Hill, São Paulo.

Francisco, Papa (2015); *Louvado Sejas: sobre o cuidado da casa comum*, Paulus Editora, São Paulo.

Franklin, G.; Powell, J; Naeini, A. (2002); *Feedback Control of Dynamic Systems*, Prentice Hall, New Jersey.

Freire, P. (2007); *Pedagogia da Autonomia*, Paz e Terra, São Paulo.

Kitchen, J.W. (1968); *Calculus of One Variable*, Addison-Wesley, California.

Hayt, W.; Buck, J. (2003); *Eletromagnetismo*, LTC, Rio de Janeiro.

Mc Master, J.H.; Komerath, N. (2005); “Boeing-University Relations: a review and prospect for the future”, *American Society for Engineering Education Annual Conference and Exposition*, Portland.

Mohan, N.; Undeland, T.; Robins, W. (2000); *Power Electronics*, John Wiley & Sons, New York.

Oliveira, A.; Salomão, L.A. (2017); *Setor Elétrico Brasileiro: Estado e Mercado*. Synergia Editora, Rio de Janeiro.

Pinto Jr., H.Q. (Ed.) (2007); *Economia da Energia*, Elsevier, RJ.

Raymond, B.L. (2013); *Studying Engineering: a road map to a rewarding career*, Discovery Press, California.

White, M. (2003); *Rivalidades Produtivas*, Ed. Record, RJ.

Silva Telles, P.C. (1984); *História da Engenharia no Brasil*, LTC, RJ.

Silva Telles, P.C. (2015); *A Engenharia e os Engenheiros na Sociedade Brasileira*, LTC, Rio de Janeiro.

Stephan, R.M. (2013); *Acionamento, Comando e Controle de Máquinas Elétricas*, Ciência Moderna, Rio de Janeiro.

Stephan, R.M. (2000); “Vocação para Engenharia”, *VI Encontro Educação em Engenharia Elétrica*, Petrópolis.

OBS: Os três textos apresentados a seguir foram originalmente publicados nesta última referência.

ESPECIALIDADES DA ENGENHARIA

Tive muita dúvida na minha escolha por engenharia elétrica ao terminar o segundo ano do curso básico. Hoje em dia, com mais opções profissionais e com a escolha da especialidade já no vestibular, como ocorre na UFRJ, a dificuldade de alguns jovens deve ser ainda maior.

Acredito que o estudante de engenharia deve basicamente ter habilidades para o método científico. Se a opção for engenharia mecânica, elétrica, civil ou qualquer outra, a diferença é mínima. O que deve influenciar é a qualidade do curso, as facilidades oferecidas pela faculdade, o mercado de trabalho. O engenheiro precisa, sim, ter uma boa base em matemática, física, química, inglês, que lhe permita manter-se sempre atualizado, e abertura para dialogar com colegas de outras especialidades, incluindo aí físicos, sociólogos, políticos, arquitetos, economistas, etc.

Podemos visualizar o conhecimento técnico como um plano suportado por pilares, que são os fundamentos básicos. Sobre este plano colocamos uma esfera, que deve se manter centrada. Quando um dos pilares sobe mais, os demais necessariamente precisam acompanhar o crescimento para manter a esfera equilibrada. Nos últimos anos, isto aconteceu com a evolução da eletrônica que impulsionou a computação e esta onda afetou todos os ramos da engenharia, economia, comunicações, etc...

Claro que as coisas não são exatamente deste modo simplista que estou colocando, mas também não são um bicho de sete cabeças como alguns tentam apresentar. Por exemplo, dizendo que é mais crítico escolher uma profissão do que um esposo ou esposa, pois esses últimos podemos trocar com mais facilidade. Acho que está se complicando muito na escolha da profissão e simplificando na escolha do parceiro!!!

O QUE A ENGENHARIA TEM DE ESSENCIAL?

“Pois o visível é passageiro, mas o invisível eterno.” (2 Cor 4,18)

Um profundo conhecedor da química do cérebro e do comportamento do homem e da sociedade alertou-me *“que engenharia é técnica e que amor e técnica estão em eixos ontológicos distintos, em linhas diferentes de tendências humanas: ética e estética, respectivamente”*. Mas, para estabelecer coordenadas em um plano, valemo-nos usualmente de eixos ortogonais. O texto seguinte traça um perfil da vida tendo como referência os eixos ortogonais: amor e técnica.

O que a engenharia tem de essencial? Para mim, uma difícil pergunta. Vou tentar contornar esta dificuldade falando das obras da engenharia. Acredito que por aí será possível chegar a uma concepção do que a engenharia tem de essencial.

Definição tentativa: obras da engenharia são o conjunto das coisas visíveis menos o conjunto das coisas da natureza.

Usando notação de Teoria dos Conjuntos:

$\{\text{OBRAS DA ENGENHARIA}\} = \{\text{COISAS VISÍVEIS}\} - \{\text{COISAS DA NATUREZA}\}$

Mas, como nos ensina Saint Exupery: *“O essencial é invisível aos olhos”*. Assim, concluímos que a Engenharia não é essencial. Essencial, fundamental, afinal, é o amor, e a engenharia se torna uma atividade árida, fria, desconexa de tudo que é importante nesta vida.

O problema é que o amor, por sua vez, também é algo difícil de definir. Os gregos tinham três palavras para amor: eros, filis e ágape. Nós em português, inglês, alemão, espanhol, francês e, acredito, em quase todos os idiomas de uso contemporâneo, tratamos por uma só, que pobreza!!!

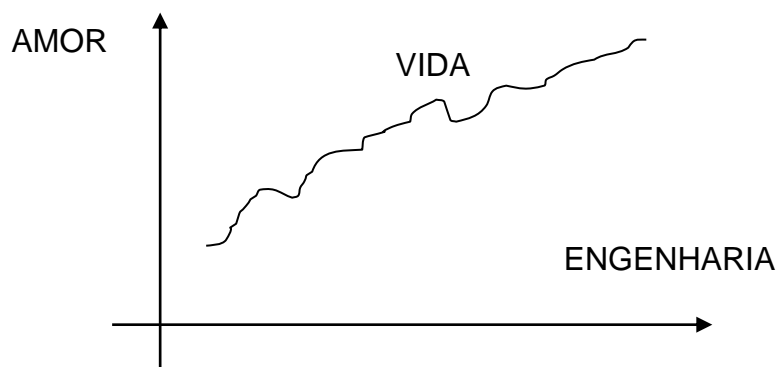
Na verdade, o amor tem que ser externado por ações visíveis para ser compreendido:

- O sensual encantamento por uma mulher ou por um homem são exemplos de amor eros, a forma mais simples e que normalmente se atribui à nossa palavra amor.
- A dedicação de uma mãe, a abnegação de um pai e o companheirismo entre colegas são exemplos de amor filios.
- O amor ágape é o que retrata o amor sublime de um religioso ou dos seres humanos em situações extremas.

Em qualquer caso, é necessário um ato que externe este sentimento. Justamente, neste ponto, é que reencontramos a engenharia como a forma mais efetiva dos homens mostrarem que amam. Afinal, a escravidão só pode terminar graças aos recursos tecnológicos que mostraram que o trabalho escravo poderia ser dispensado. As epidemias, fome, frio e outros flagelos podem ser superados com recursos da engenharia. A distância entre as pessoas e muitos outros exemplos podem ser colocados.

Alguém, com razão, pode lembrar que a engenharia também provoca poluição, morte e esgotamento dos recursos naturais. Muito bem, mas isto apenas indica que o engenheiro do novo milênio precisa, mais do que antes, considerar estes fatores nos seus projetos.

Bela essa profissão que me permite concretizar o sentimento mais nobre da humanidade: o amor!!!



A TECNOLOGIA DE SAMBA

Entendo tecnologia como um processo cultural.

Os métodos usados por grupos europeus, asiáticos ou americanos, antes do mundo globalizado, eram bem distintos, consequência das condições naturais de cada comunidade. Estabeleceu-se uma cultura em cada região, fruto do viver, pensar e transformar a realidade que cercava os diferentes povos. Existem exemplos que mostram isto claramente. A expansão de Portugal através de navegações pelo Atlântico certamente está relacionada ao fato de o oceano ser a única saída para eles.

Hoje, a troca de informações e experiências ocorre de modo muito rápido. Independentemente desse fato, acredito que a nossa grande chance como engenheiros está em reconhecer os problemas próximos e procurar implementar soluções inovadoras para eles. Aí está o nosso nicho. No Brasil, existem exemplos bem sucedidos de empresas que se dedicaram a resolver problemas tipicamente brasileiros, como os relacionados com a produção de petróleo, álcool, alimentos e energia elétrica.

Este tipo de tecnologia eu chamo de tecnologia de samba, uma vez que o samba faz parte da necessidade do brasileiro. Com os desfiles das escolas de samba, organizamos um teatro ao ar livre que atrai pessoas do mundo inteiro e até exportamos.

Considero, portanto, uma condição necessária para o sucesso de um empreendimento tecnológico que ele toque fortemente a vida das pessoas próximas.

Precisamos, porém, estar atentos que estas condições não são suficientes para o sucesso da tecnologia. Pelas condições suficientes, temos que lutar através de ações políticas.

{Desenvolvimento Humano} \longleftrightarrow {Tecnologia + Política}

EXERCÍCIOS (Portal de Periódicos da CAPES)

O Portal de Periódicos da CAPES (<http://www.capes.gov.br>) merece ser conhecido por todos os estudantes. Os exercícios seguintes incentivam o seu uso e também objetivam despertar o interesse pela leitura em inglês.

EXERCÍCIO 17: Operações que exigem grande complexidade de processamento podem ser substituídas pela execução, em paralelo, de operações mais simples. Este assunto foi abordado em artigo da revista IEEE Spectrum³, julho de 2010. Procure este artigo no Portal de Periódicos da CAPES e avalie as duas formas de processamento para o número π apresentadas no quadro da página 31 do referido artigo.

- a) Como se explica a expressão para o processamento sequencial do número π ?
- b) Como se explica o processamento paralelo do número π ?

EXERCÍCIO 18: Schaeffer e outros⁴, após estudos iniciados em 1989 e contando com o auxílio de cerca de 50 computadores, conseguiram mapear as cerca de 5×10^{20} possibilidades do Jogo de Damas e provaram que o resultado da partida corretamente disputada é o empate. Como o computador não comete enganos, a vitória contra qualquer ser humano fatalmente ocorrerá após algumas partidas. Procure este artigo científico no Portal de Periódicos da CAPES e responda às seguintes perguntas:

³ David Patterson. The Trouble with Multi Core. *IEEE Spectrum*, Vol. 47, n.7, pp. 28-31,52-53, July 2010

⁴ Jonathan Schaeffer, Neil Burch, Yngvi Bjoernsson, Akihiro Kishimoto, Martin Mueller, Robert Lake, Paul Lu, Steve Sutphen. Checkers is Solved. *Science*, Vol. 317, pp. 1518-1522, September 2007.

- a) Qual o número estimado de possibilidades para o jogo de Xadrez?
- b) Como dar significado a este número? Seria da mesma ordem de grandeza do número de fios de cabelo de todos os seres humanos sobre a face da Terra? Ou do número de segundos transcorridos desde o Big Bang? Ou do imposto anual recolhido pelos brasileiros expresso em centavos? Ou do número de folhas nas árvores da floresta Amazônica? Qual sua visualização para esta quantidade?
- c) O trabalho de Schaeffer e sua equipe não pode ser aplicado atualmente para resolver o jogo de Xadrez. Por que? Como então são feitos os programas de computador que jogam Xadrez?

EXERCÍCIO 19: No Portal de Periódicos da CAPES, consulte o artigo de James C. Rautio, publicado na revista IEEE Spectrum de Dezembro de 2014, páginas 36 e seguintes.

- a) Qual o tema do trabalho?
- b) Destaque uma parte que lhe chamou especial atenção. Copie e traduza esse pedaço do artigo. Comente o que despertou seu interesse.

EXERCÍCIO 20: Os números imaginários atendem à necessidade de representação da raiz quadrada de números negativos. No colégio, aprendemos que $i = \sqrt{-1}$. Em Engenharia Elétrica, em lugar de “ i ” usa-se “ j ”, uma vez que usualmente já se indica a corrente elétrica com a letra “ i ”.

Os números reais e os números imaginários não se misturam, mas se combinam para formar os números complexos, apresentados como “ $a + jb$ ”, em que “ a ” e “ b ” são números reais.

Leonhard Euler (*1707; †1783) deu significado à exponencial de números imaginários estabelecendo a equivalência:

$$e^{j\theta} = \cos\theta + j\sin\theta.$$

A partir dessa relação, a representação geométrica dos números complexos em dois eixos perpendiculares, um para a parte real e o eixo ortogonal para a parcela imaginária, fica natural. Essa relação desempenha um papel significativo no estudo dos sistemas elétricos e deve ser bem entendida pelos estudantes de Engenharia Elétrica.

Procure no Portal de Periódicos da CAPES o artigo de Karakok, Soto-Johnson e Dyben, publicado no Journal of Mathematics Teacher Education (2015), pp 327-351.

- a) De que trata o artigo?
- b) A tabela 1 desse artigo apresenta diferentes formas de representação de números complexos. Quais dessas representações você já conhecia?
- c) Resolva a questão de número 4, proposta no apêndice do artigo.
- d) Mostre que $e^{j\pi} = -1$. Essa equação, conhecida como Identidade de Euler, é considerada uma das mais belas da matemática por envolver os números irracionais e , π , o número imaginário j , um número real negativo, exponencial e igualdade.
- e) Quanto vale $10^{j\pi}$?
- f) Determine: $\lim_{n \rightarrow \infty} 2\sqrt[n]{-1}$

CANÇÃO DA PATENTE

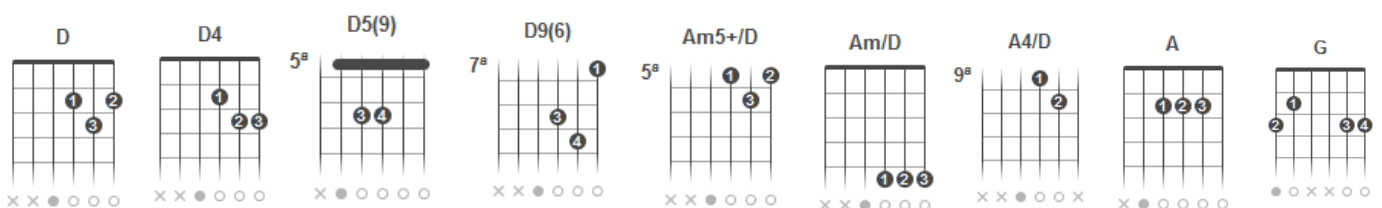
Letra: Richard Stephan / Música e arranjo: Raphael Marques da Silva

Afinação: E A D G B E

D	D4	D5(9)	D	D4	D5(9)
Cuidado minha gente			O dono patrocina		
Am/D	Am5+/D	Am/D	Am/D	Am5+/D	Am/D
Escute esta canção			Inventor é o artista		
D	D4	D5(9)	D	D4	D5(9)
Ideia n'ê patente			Está aí a grande sina		
Am/D	Am5+/D	Am/D	Am/D	Am5+/D	Am/D
Mas tá solto charlatão			Que define a conquista		

D	D4	D5(9)	D	D4	D5(9)
Ideia tem um monte			Velhaco circulando		
Am/D	Am5+/D	Am/D	Am/D	Am5+/D	Am/D
Saber nem um pouquinho			Pousa como inventor		
D	D4	D5(9)	D	D4	D5(9)
Ideia n'horizonte			PI depositando		
Am/D	Am5+/D	Am/D	Am/D	Am5+/D	Am/D
Patente é o caminho			Não passa de impostor		

A4/D	D9(6)		A4/D	D9(6)	
Ideia é um sonho			Ideia é um sonho		
A	G		A	G	
Patente realidade			Patente realidade		
A4/D	D9(6)		A4/D	D9(6)	
Veja o que proponho			Veja o que proponho		
A	G		A	G	
N'ê mera vaidade			N'ê mera vaidade		



SUGESTÃO DE TEMAS PARA SEMINÁRIOS DOS ALUNOS

Cada grupo deve escolher um tema e apresentá-lo na forma de exposição oral (15 minutos + 5 minutos para perguntas). Abaixo, algumas sugestões, com destaque para a última, que pode atender o interesse de alguns estudantes.

1. Ser engenheiro. Por que escolhi engenharia?
2. Grandes obras da engenharia nacional (Itaipu, Ponte Rio-Niterói, ...)
3. Paulo de Frontin (ou outro engenheiro): sua importância para o Brasil.
4. O potencial energético brasileiro (hidráulico, eólico, solar, petróleo, ...)
5. Fontes alternativas de energia.
6. A Usina Hidroelétrica de Belo Monte.
7. Patentes, Propriedade Intelectual, o INPI.
8. Incubadoras de empresas.
9. Normas técnicas, a ABNT, INMETRO, IEC, ...
10. A Jornadas de Iniciação Científica.
11. Bolsas de Iniciação Científica.
12. Empresas Junior de Engenharia.
13. Equipes de competição nas Escolas de Engenharia.
14. Órgãos de fomento à pesquisa (CNPq, CAPES, FAPERJ, ...)
15. Graduação Sandwich/Dupla titulação/Convênios.
16. Empresas de Engenharia Elétrica sediadas na minha cidade.
17. Os cursos de Engenharia Elétrica (nº. de formandos, classificação, ...)
18. Sociedades Brasileiras de Engenheiros Eletricistas (SOBRAEP, SBA, ...)
19. Sociedades Internacionais de Engenharia (IEEE, CIGRE, IEE, ...)
20. CREA, Clube de Engenharia, associações de engenheiros.
21. A lista de “*Desired Attributes of an Engineer*” da Boeing.
22. O portal de periódicos da CAPES (Biblioteca Virtual).
23. Revistas Técnicas de Engenharia Elétrica (Nacionais/Internacionais).
24. Física x Engenharia.
25. Técnico x Engenheiro.
26. Computação analógica x Computação digital.
27. Como o Xadrez pode auxiliar no aprendizado da Engenharia.
28. Fator H, Índice de Impacto, DOI: o que é e para o que serve?
29. Bit, Eletron, Joule: podemos dividir a Eletricidade assim?
30. A mulher engenheira eletricista no Brasil e no mundo.
31. Quem foi Edit Clark?
32. A estrada de ferro Madeira-Mamoré.
33. Sociedade de 2000 W (<http://www.2000watt.ch>)
34. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU.
35. **SUCATA** ou **ENGENHARIA REVERSA** - Para este tema, que se diferencia bastante dos anteriores, o grupo deve abrir um equipamento elétrico, preferencialmente danificado, explicar seus componentes, como estão conectados e qual a função do mesmo. O manual do equipamento, algum diagrama esquemático ou a experiência de membros do grupo com aparelhagem elétrica ou eletrônica podem ajudar muito.

DOMINIOS NA INTERNET (acessados em 10/03/2018)

- 1) Palestras “Triunfo da Tecnologia” da BBC
<http://www.bbc.co.uk/radio4/reith2005/>
- 2) Federação Nacional dos Engenheiros – Galeria de Vídeos:
“Mais Engenheiros para Construir o Brasil” - Especialidades da Engenharia
http://www.fne.org.br/galeria_videos.html
- 3) Orientação acadêmica
<http://www.universitysurvival.com/student-success-skills>
- 4) Para auxiliar na solução de problemas/exercícios
<http://thinkotheque.com.br>
- 5) Engenhos criados pelo homem
<http://www.uh.edu/engines>
- 6) Como funcionam as coisas?
<http://www.howstuffworks.com>
- 7) Grandes conquistas tecnológicas
<http://www.greatachievements.org>
<http://www.complex.com/tech/2010/08/the-50-greatest-technological-inventions-of-the-past-25-years>
- 8) Desafios para a engenharia nos próximos anos
<http://www.engineeringchallenges.org>
- 9) Para superar deficiências acadêmicas
<http://khanacademy.org>
- 10) Guia de como estudar
<http://www.studygs.net>
- 11) Grupos de competição
<http://www.studentcompetitions.com>
- 12) Para aprender a digitar sem olhar para o teclado
<http://www.keybr.com>
- 13) Usina Hidroelétrica de Itaipu
<http://youtu.be/48llepUvLw>
- 14) Usina Hidroelétrica de Belo Monte
http://youtu.be/gVC_Y9drhGo - Alunos da USP reagem a filme da Globo.
http://www.youtube.com/watch?v=feG2ipL_pTg - Alunos da UnB também reagem.
<http://www.youtube.com/watch?v=OjkjHMPxbNs> - Vídeo dos artistas da Globo.