

Transformadores

Princípios de funcionamento, tipos e transformador ideal



PEA3201 – Eletrotécnica Geral II

Departamento de Engenharia Mecatrônica
da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Josemir Coelho Santos e Gleison Elias da Silva

Índice

- Por que os transformadores são importantes à vida moderna?
- Tipos e construção de transformadores
- O transformador ideal
- Teoria de operação de transformadores monofásicos reais
- O circuito equivalente de um transformador
- O sistema de medições por unidade
- Regulação de tensão e eficiência de um transformador
- Derivações de um transformador e regulação de tensão
- O autotransformador
- Transformadores trifásicos
- Transformação trifásica usando dois transformadores
- Especificações nominais de um transformador e problemas relacionados.

Objetivos de aprendizagem

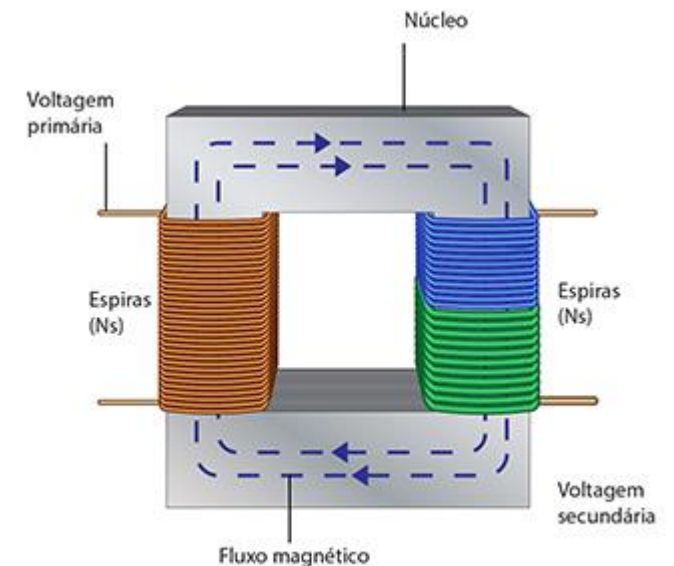
- Compreender a finalidade de um transformador em um sistema de potência.
- Conhecer as relações de tensão, corrente e impedância nos enrolamentos de um transformador ideal.
- Compreender como os transformadores reais aproximam-se do funcionamento de um transformador ideal.
- Ser capaz de explicar como as perdas no cobre, o fluxo de dispersão, a histerese e as correntes parasitas são modeladas nos circuitos equivalentes de transformador.
- Usar um circuito equivalente de transformador para encontrar as transformações de tensão e corrente em um transformador.
- Ser capaz de calcular as perdas e a eficiência de um transformador.
- Ser capaz de deduzir o circuito equivalente de um transformador a partir de medidas.
- Compreender o sistema por unidade de medidas.
- Ser capaz de calcular a regulação de tensão de um transformador.

Objetivos de aprendizagem

- Compreender o autotransformador.
- Compreender os transformadores trifásicos, incluindo casos especiais em que apenas dois transformadores são usados.
- Compreender as especificações nominais de um transformador.
- Compreender os transformadores de instrumentação – transformadores de potencial e transformadores de corrente.

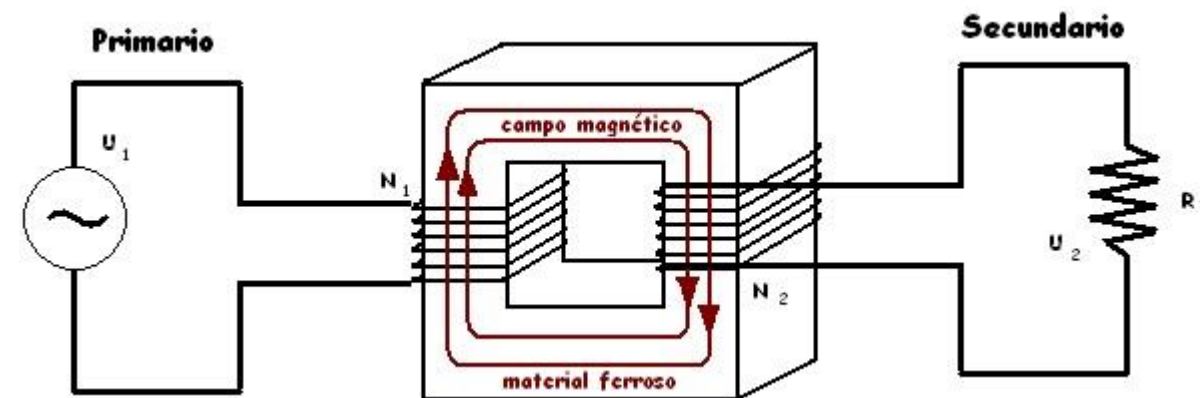
Transformadores

- Um **transformador** é um dispositivo que **converte, por meio da ação de um campo magnético**, a energia elétrica CA de uma dada frequência e **nível de tensão** em energia elétrica CA de mesma frequência, mas **outro nível de tensão**.
- Ele consiste em duas ou mais bobinas de fio enroladas em torno de um núcleo ferromagnético comum.
- Essas bobinas (usualmente) não estão conectadas diretamente entre si.
- A única conexão entre as bobinas é o fluxo magnético comum presente dentro do núcleo.



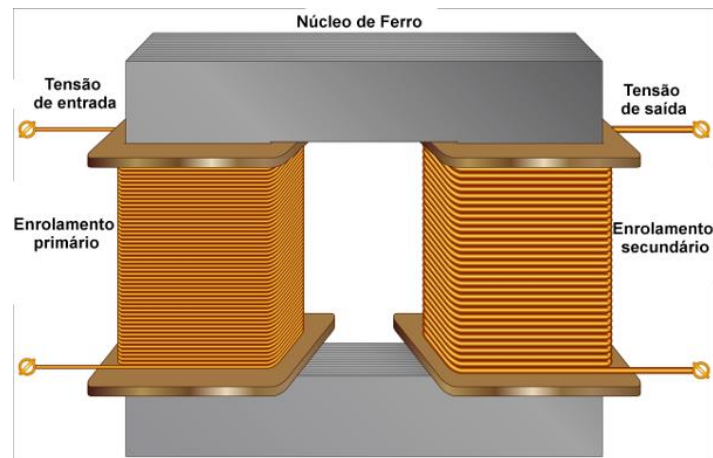
Transformadores

- Um dos enrolamentos do transformador é ligado a uma fonte de energia elétrica CA e o segundo enrolamento do transformador fornece energia às cargas.
- O enrolamento do **transformador** ligado à **fonte de energia** é denominado **enrolamento primário** ou enrolamento de entrada e o enrolamento conectado às **cargas** é denominado **enrolamento secundário** ou enrolamento de saída.



Transformadores

- O funcionamento dos **transformadores** é baseado em um fenômeno físico conhecido como **indução eletromagnética**, descoberto por **Michael Faraday** e descrito por meio da **lei de Faraday-Neumann-Lenz**.



Desenho ilustrativo de um transformador



Transformador de distribuição trifásico de 23kV/240V

A importância dos Transformadores

- O primeiro sistema de distribuição de energia elétrica dos Estados Unidos foi um **sistema CC** de 120 V inventado por **Thomas A. Edison** para fornecer energia a lâmpadas incandescentes.
- A primeira estação geradora de energia elétrica de Edison entrou em operação em Nova York em setembro de 1882.
- A transmissão de energia elétrica com tensões CC tão baixas requeriam correntes muito elevadas para fornecer quantidades significativas de energia.
- As perdas nos cabos eram muito grandes, o que limitava a distância de distribuição.



**Vulcan Street Plant no rio Fox em
Appleton, Wisconsin/USA**

Para mais detalhes, consultar o Anexo A.1 – Vídeos e livro de interesse



Youtube Filmes: A Batalha das Correntes

<https://www.youtube.com/watch?v=pt6CVMW6HqU>

A importância dos Transformadores

- A invenção do transformador e o desenvolvimento simultâneo de estações geradoras de energia CA eliminaram para sempre essas restrições de alcance e de capacidade dos sistemas de energia elétrica.
- Se um transformador elevar o nível de tensão de um circuito, ele deverá diminuir a corrente para manter a potência que chega ao dispositivo igual à potência que o deixa.
- Para a mesma potência.
- Para a mesma potência.

$$P = V \cdot I \quad (1)$$

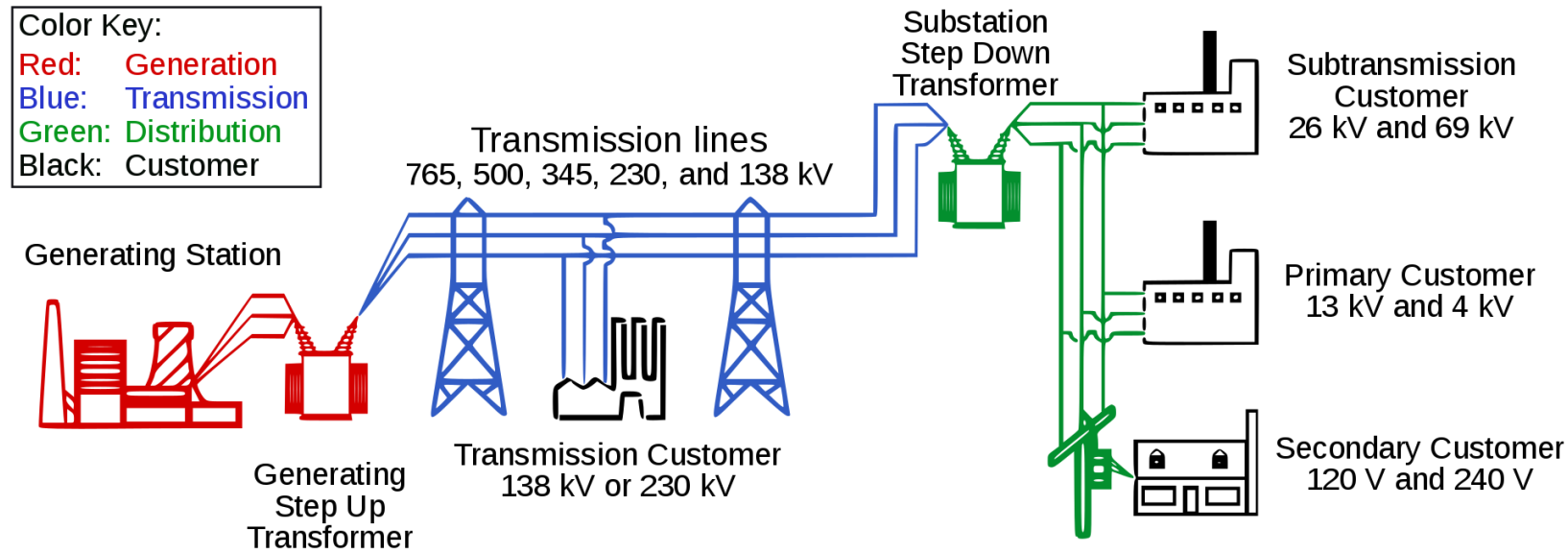
$$P = 10 \cdot V \cdot \frac{I}{10}$$

$$P = R \cdot I^2 \quad (2)$$

$$P = R \cdot \left(\frac{I}{10}\right)^2 = R \cdot \frac{I^2}{100}$$

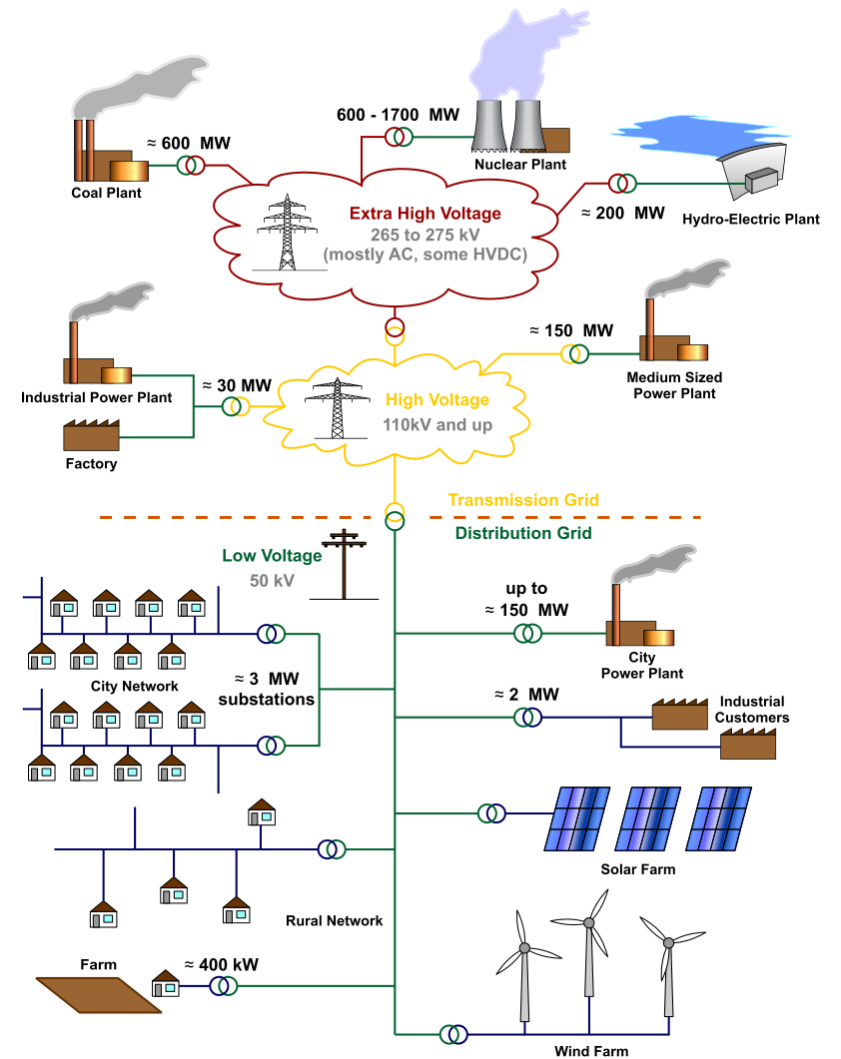
A importância dos Transformadores

- Em um sistema moderno de energia elétrica, a energia é gerada com tensões de 12 a 25 kV.
- Os transformadores elevam a tensão a um nível entre 110 kV e 1.000 kV para realizar a transmissão a longa distância com perdas muito baixas.



A importância dos Transformadores

- Então, os transformadores abaixam a tensão para a faixa de 12 a 34,5 kV para fazer a distribuição local e finalmente permitir que a energia elétrica seja usada de forma segura em lares, escritórios e fábricas com tensões tão baixas quanto 120 V.



Tipos e construções

- Os transformadores podem ser classificados de acordo com a finalidade, o tipo, o material do núcleo e o número de fases:

Quanto à finalidade

- Transformadores de potência
- Transformadores de corrente
- Transformadores de potencial
- Transformadores de G e D

Quanto ao tipo

- Dois ou mais enrolamentos
- Autotransformador

Quanto ao material do núcleo

- Ferromagnético
- Núcleo de ar

Quanto ao número de fases

- Monofásico
- Trifásico
- Polifásico

Tipos e construções – Finalidade

Transformadores de potência (força)

- São usados para geração e distribuição de energia por concessionárias e usinas, e subestações de distribuição de energia elétrica, e subestações de grandes indústrias, incluindo aplicações especiais como fornos de indução e a arco, e retificadores.

Imagem: Bucka



Transformador de potência (força)

Tipos e construções – Finalidade

Transformadores de corrente (TC)

- Tem por finalidade detectar ou medir a corrente elétrica que circula em um cabo ou barra de alimentação, e transforma-la em outra corrente de valor menor (normalmente 5 A), para ser transmitida a um instrumento de medição ou circuito eletrônico.



Imagem: Mundo da elétrica

Imagem: Wikipédia



Transformadores de corrente (TC)

Tipos e construções – Finalidade

Transformadores de potencial (TP)

- Utilizado principalmente para sistemas de medição de tensão elétrica, sendo capaz de reduzir a tensão do circuito para níveis de compatíveis com a máxima suportável pelos instrumentos de medição (normalmente 115 a 220 V).



Imagem: Rehtom



Imagem: Seunipro

Transformadores de potencial (TP)

Tipos e construções – Finalidade

Transformadores de geração, subestação e de distribuição

- Os transformadores de geração são, geralmente, **elevadores** de tensão enquanto que os de subestação são **rebaixadores** de tensão.

Imagem: EEP



Transformador de geração (elevador)

Imagem: GlobeCore



Transformador de subestação (rebaixador)

Tipos e construções – Finalidade

Transformadores de geração, subestação e de distribuição

- Os transformadores de **distribuição** são utilizados para **distribuir a energia** gerada até os **consumidores**, com valores diferentes do que o gerado, adequado a cada tipo de consumidor.

Imagem: SaberEletrica



Transformador de distribuição

Tipos e construções – Finalidade

Transformadores de geração, subestação e de distribuição

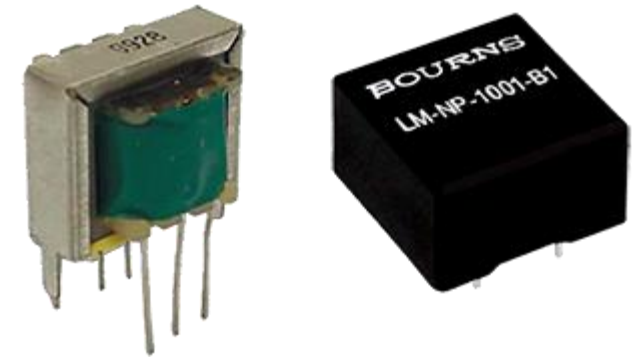
- **Transformador da unidade de geração (elevadores):** Eleva a tensão de saída do gerador até o nível de transmissão (acima de 36 kV).
- **Transformador de subestação (abaixadores):** Abaixa a tensão do nível de transmissão para o nível de distribuição (1 a 35 kV).
- **Transformador de distribuição:** Abaixa a tensão do nível de distribuição para o nível final (110, 127, 220 V, etc).
- **Autotransformadores:** Elevar ou reduzir a tensão e a corrente de forma selecionável.

Tipos e construções – Finalidade

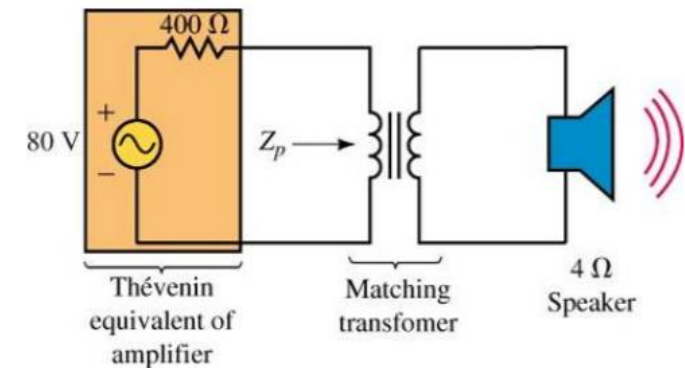
Transformadores de Impedância (TI)

- São usados na modificação de impedâncias em circuitos elétricos, por exemplo, no acoplamento entre a saída do amplificador de áudio e o autofalante e na adaptação de impedâncias em amplificadores sintonizados de frequência intermédia e radiofrequência em receptores de telecomunicações.

Imagem: ElectronicaEmbajadores



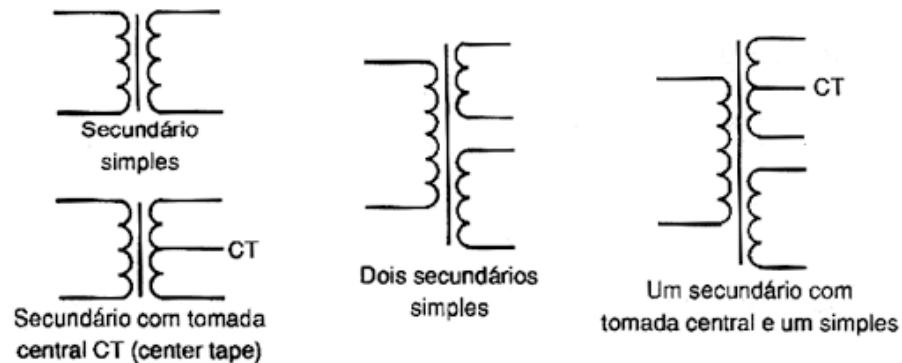
Transformadores de impedância



Tipos e construções – Enrolamentos

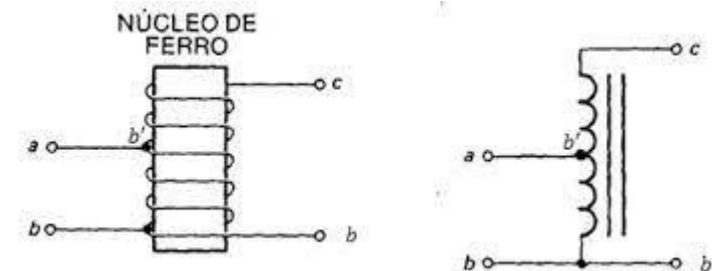
Dois ou mais enrolamentos

- O transformador transfere a energia entre dois ou mais circuitos através de um campo magnético, sem haver necessariamente um condutor elétrico entre esses circuitos.



Autotransformador

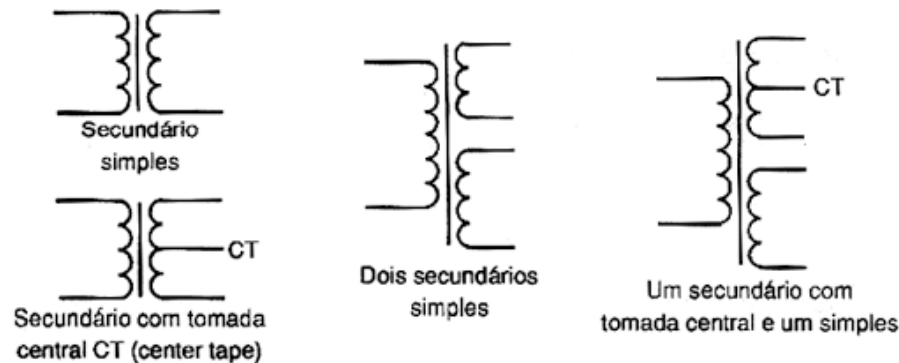
- O autotransformador tem o funcionamento bastante semelhante ao transformador, com a diferença de que os dois circuitos estão ligados na mesma bobina.



Tipos e construções – Enrolamentos

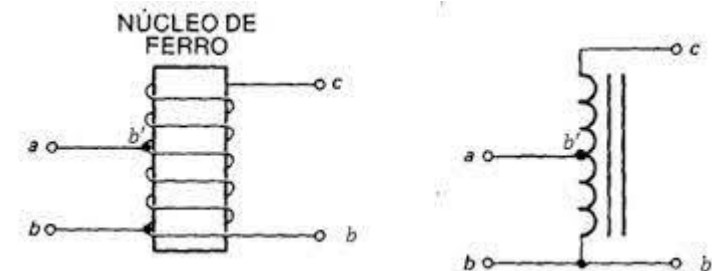
Dois ou mais enrolamentos

- Há necessidade de isolação;
- Diferença de tensão $> 3:1$;
- Necessidade de filtragem de harmônicas.



Autotransformador

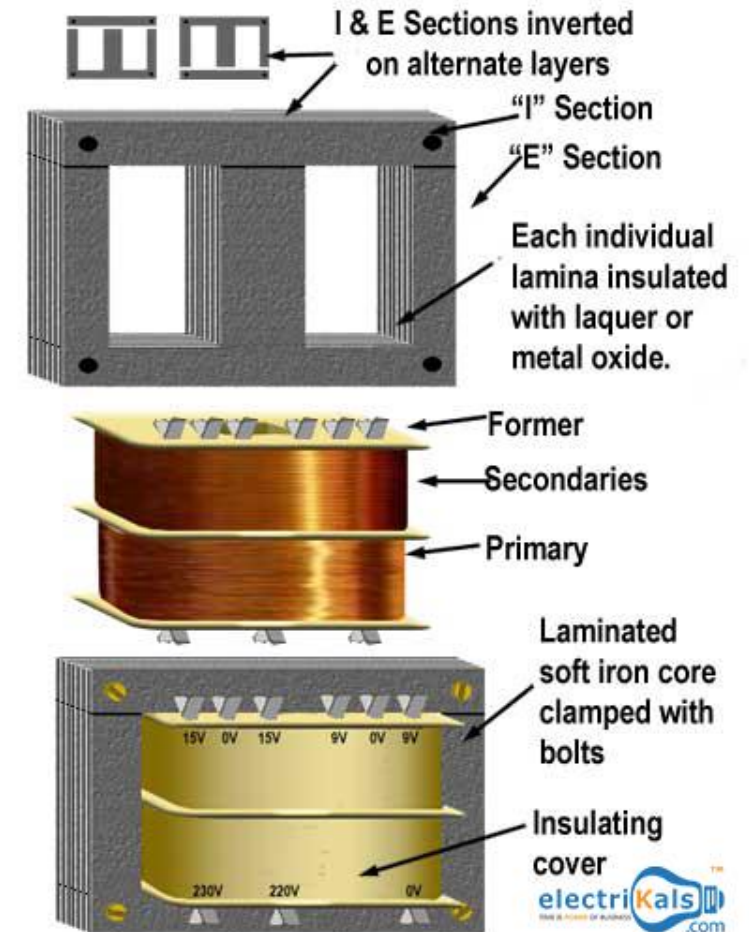
- Não há necessidade de isolação;
- Diferença de tensão $< 3:1$;
- Não há a necessidade de filtragem de harmônicas.



Tipos e construções – Núcleo

Ferromagnético

- Materiais ferromagnéticos, sofrem perda de histerese, perdas por correntes parasitas, além disso, enfrentam o problema de ficar saturados após certo nível de magnetização.

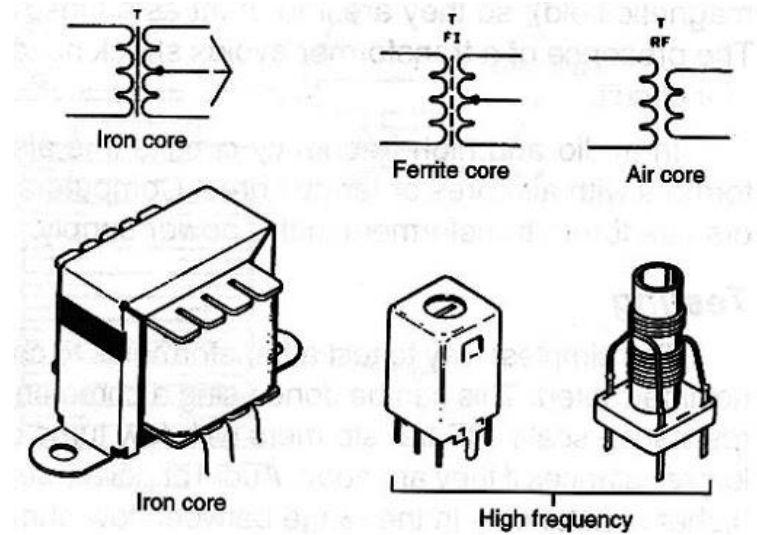


Transformador com núcleo ferromagnético

Tipos e construções – Núcleo

Núcleo de ar

- Não sofrem com os problemas apontados ao com os de núcleo ferromagnéticos, entretanto, a indução magnética é menor, necessitando de mais corrente ou mais bobinas para compensar.
- Geralmente utilizado em circuitos com frequências elevadas, como áudio e RF.



Transformador com núcleo de ar

Tipos e construções – N° de Fases

Monofásico

- O transformador monofásico serve para alimentar os circuitos de comando ou muito usado nas indústrias. Em casas, é comum encontrar o transformador monofásico devido a sua capacidade de transformar 127 V em 220V e vice-versa.

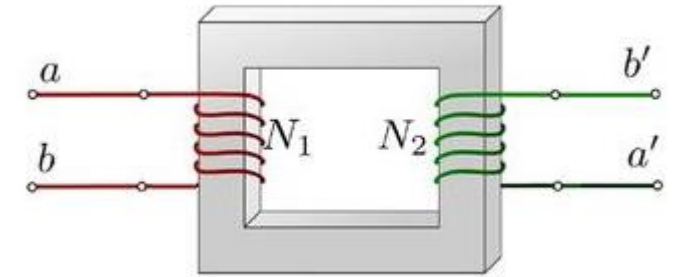


Imagem: Mistervolt

Transformador monofásico

Tipos e construções – N° de Fases

Trifásico

- Um transformador trifásico é constituído de pelo menos três enrolamentos no primário e três enrolamentos no secundário, os quais (como qualquer componente trifásico) podem ser conectados em Estrela (Y) ou Delta (Δ).



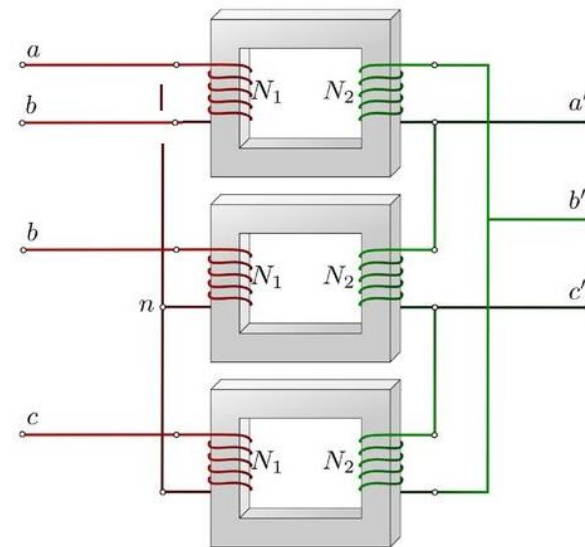
Imagem: Etna transformadores

Transformador trifásico

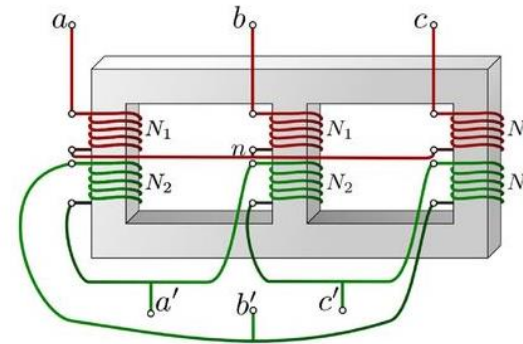
Tipos e construções – N° de Fases

Trifásico

- Os **transformadores trifásicos** podem ser construídos de duas maneiras:
 - (a) **banco trifásico** (composto por 3 transformadores monofásicos);
 - (b) **núcleo trifásico** (composto por um único núcleo – mononuclear).



(a) banco trifásico



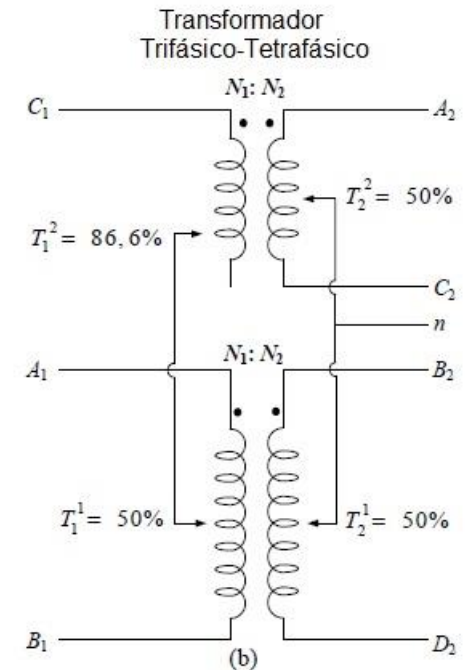
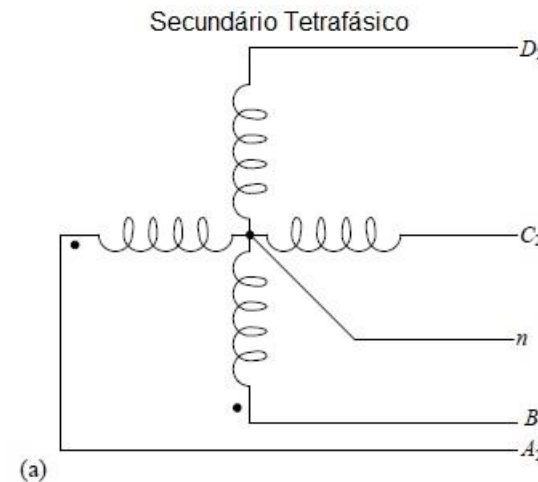
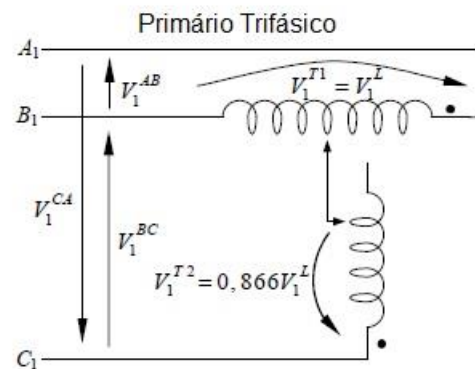
(b) núcleo trifásico

Transformado trifásico

Tipos e construções – N° de Fases

Polifásico

- O **transformador polifásico**, consiste em utilizar um transformador com alimentação trifásica no primário e obter no secundário uma elevação do **número de fases (ex: 4, 6, 12, etc)**.
- Utilizado em retificadores industriais, de modo a aumentar o desempenho da ponte retificadora.

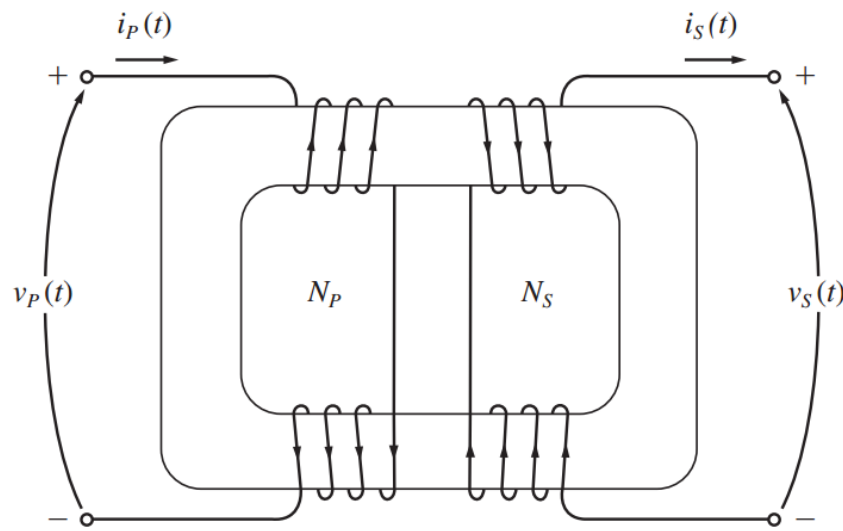


Transformador polifásico

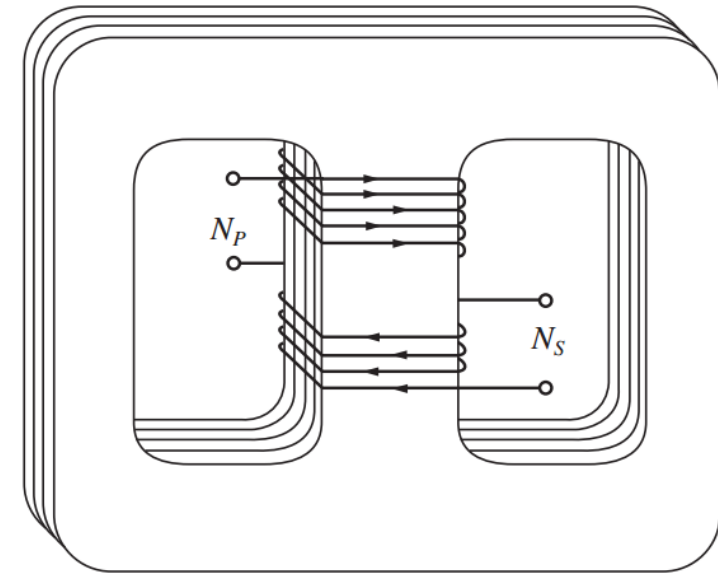
Transformadores de Potência – Aspectos Construtivos

- Os transformadores de potência são construídos com um núcleo que pode ser de dois tipos: núcleo envolvido ou núcleo envolvente.

Núcleo envolvido, também chamados de **Nucleares**



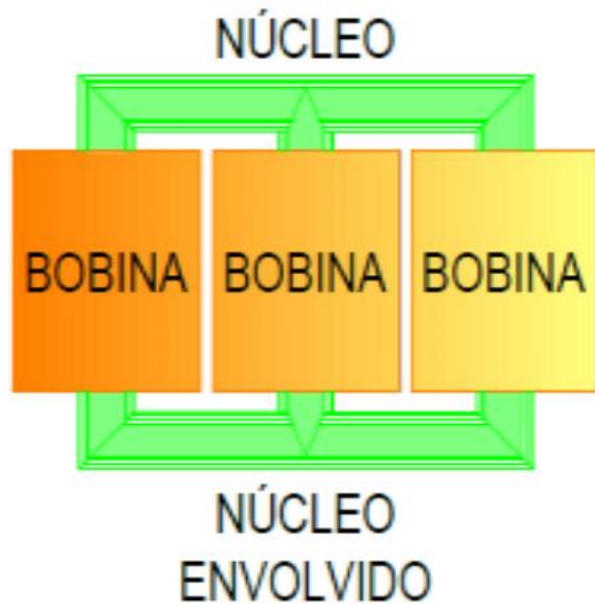
Núcleo envolvente, também chamados de **Encouraçados**



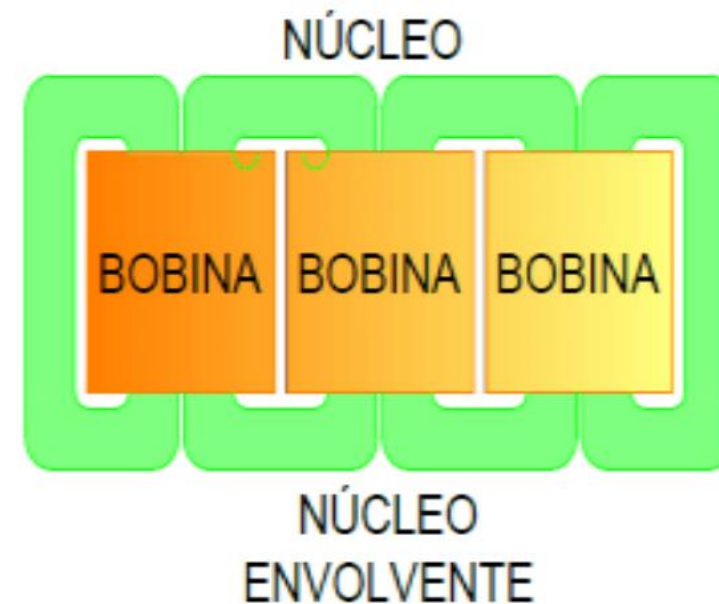
Transformadores de Potência – Aspectos Construtivos

- Em ambos os casos, o núcleo é construído com lâminas (chapas) delgadas, eletricamente isoladas entre si para minimizar as correntes parasitas.

Núcleo envolvido

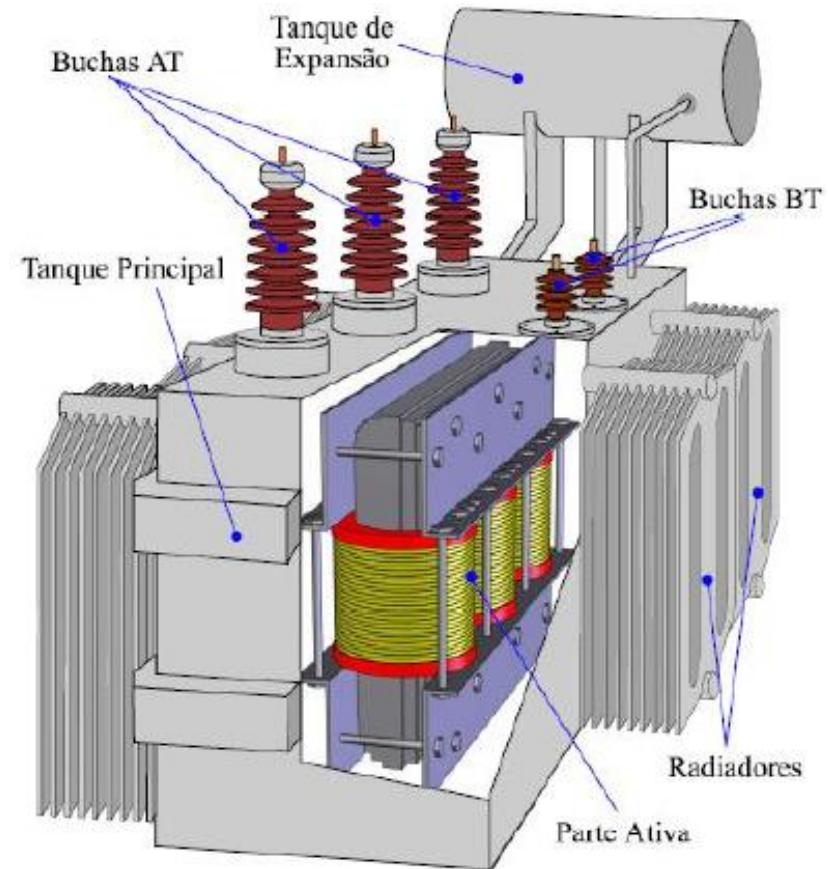


Núcleo envolvente



Transformadores de Potência – Aspectos Construtivos

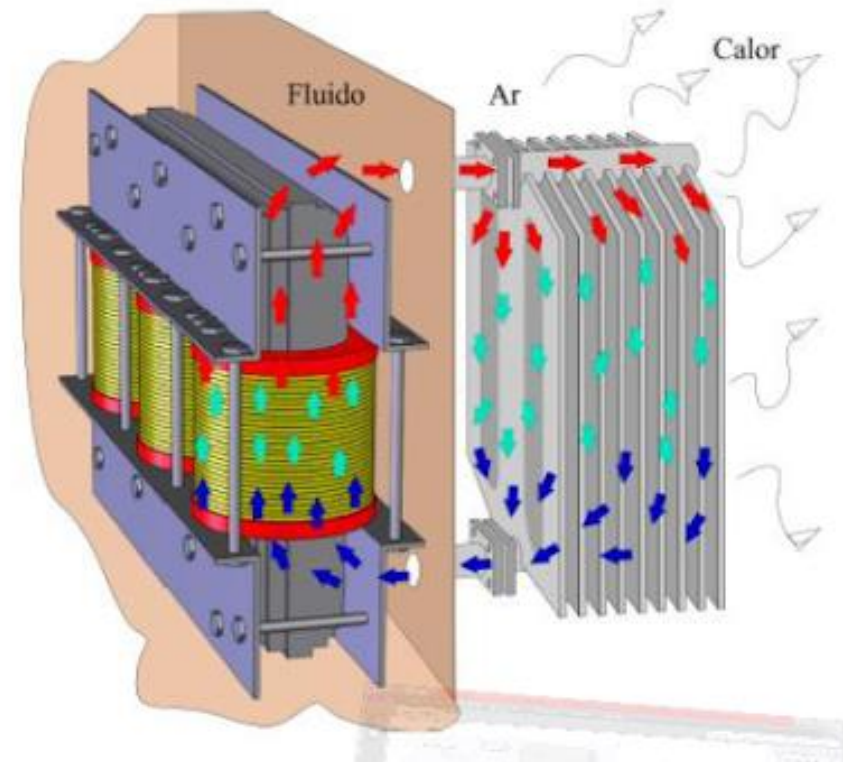
- O transformador de potência é um transformador trifásico, e o modelo apresentado ao lado é frequentemente utilizado em subestações para elevação ou abaixamento.
- Nota-se a presença das buchas de Alta Tensão (AT) e as de Baixa Tensão (BT), onde se conectam os cabos para transmissão ou distribuição.



Aspectos Construtivos dos Transformadores de Potência

Transformadores de Potência – Aspectos Construtivos

- O tanque é um compartimento onde se encontra a parte ativa (enrolamentos) e é preenchido com um fluido dielétrico, geralmente, óleo mineral.
- Como os enrolamentos da parte ativa se aquecem muito, é necessário que haja um sistema de refrigeração, por esse motivo a parte ativa é envolvida em óleo que além de contribuir para a isolamento, permite a troca de calor com o ambiente.



Aspectos Construtivos dos Transformadores de Potência

Transformadores de Potência – Aspectos Construtivos

- Esta troca ocorre quando o óleo que circula nos radiadores, pois ao se aquecer, o óleo ocupa a parte superior do tanque entrando na tubulação que leva ao radiador.
- Visando aumentar a eficiência do sistema de refrigeração, acrescenta-se ventilação forçada aos radiadores e o óleo também pode ser forçado a circular.



Aspectos Construtivos dos Transformadores de Potência

Transformadores de Potência – Aspectos Construtivos

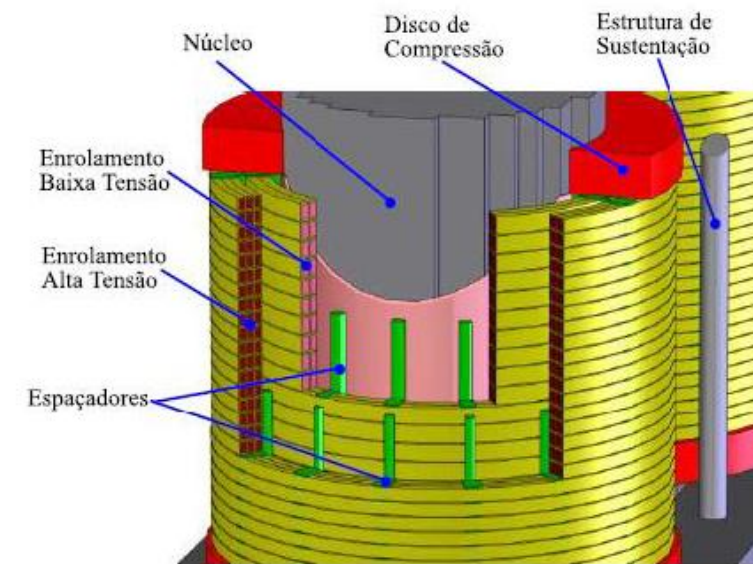
- Como o fluido dielétrico deve preencher totalmente o tanque do transformador, é necessário compensar a variação do volume do fluido nas variações da temperatura do equipamento.
- Esta é a função do tanque de expansão ou compensação do transformador.



Aspectos Construtivos dos Transformadores de Potência

Transformadores de Potência – Aspectos Construtivos

- Em um transformador real, os enrolamentos primário e secundário envolvem um ao outro, sendo o enrolamento de baixa tensão o mais interno.
- Essa disposição atende a dois propósitos:
 - 1. Simplifica o problema de isolar o enrolamento de alta tensão do núcleo.
 - 2. Resulta muito menos fluxo de dispersão do que seria o caso se os dois enrolamentos estivessem separados de uma distância no núcleo.



Enrolamentos do Transformador de Potência

Transformadores de Potência – Aspectos Construtivos

- Na parte ativa, os enrolamentos de baixa tensão ficam enrolados por baixo dos de alta tensão.
- Os condutores são geralmente de cobre, e muito raramente de alumínio e possuem seção reta retangular para facilitar a sua disposição no núcleo.
- A isolação dos condutores é feita com material isolante à base de celulose, um papel isolante, que tem suas características isolantes melhoradas quando as fibras de celulose são impregnadas com o óleo isolante.



Enrolamentos do Transformador de Potência

Transformadores de Potência – Aspectos Construtivos

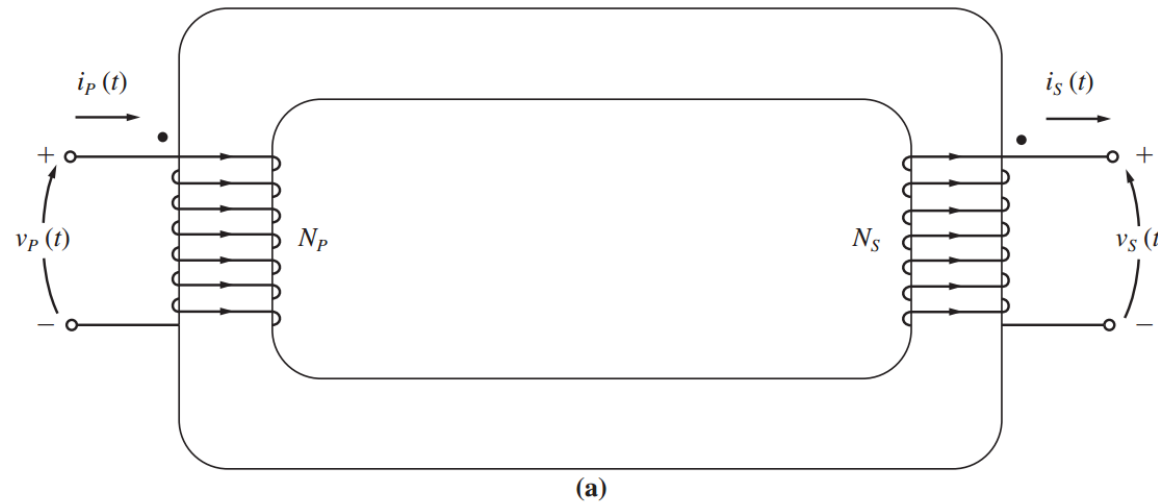
- A parte ativa também é comprimida pelo disco de compressão a fim de evitar uma possível movimentação vertical.
- Os espaçamentos entre as camadas de condutores permitem a circulação do fluido para que este possa retirar o calor gerado pelo enrolamento.
- A função dos espaçadores, então, é manter este caminho de circulação e assegurar a rigidez mecânica do conjunto do enrolamento.
- Os espaçadores são feitos de cartão prensado ou de madeira seca.

Transformadores de Potência – Aspectos Construtivos

- O núcleo, é constituído de aço-silício que é um material que combina grande permeabilidade magnética e resistência mecânica.
- O mesmo núcleo encontra-se preso pela estrutura de sustentação, a fim de evitar qualquer movimentação devido a esforços eletromecânicos provocados pela interações dos campos magnéticos internos no núcleo.

Transformador Ideal

- Um transformador ideal é um dispositivo sem perdas com um enrolamento de entrada e um enrolamento de saída, como mostrado na Figura (a).
- As resistências elétricas dos fios dos enrolamentos do primário e do secundário são nulas;
- Material magnético do núcleo é ideal.



Transformador Ideal

- O transformador mostrado na Figura (a) tem N_P espiras de fio no lado do enrolamento primário e N_S espiras de fio no lado do secundário.
- Como vimos, pela **lei de Faraday** podemos dizer que as tensões induzidas nas bobinas de n espiras do primário e do secundário do transformador devido a variação temporal do fluxo será:

NOTA: Como a resistência dos enrolamentos é nula, podemos considerar que a força eletromotriz, e , é igual a diferença de potencial, v , nos terminais do transformador.

$$e_P = v_P = N_P \frac{d\phi}{dt} \quad (3)$$

$$e_S = v_S = N_S \frac{d\phi}{dt} \quad (4)$$

Transformador Ideal

- Portanto, se a variação temporal do fluxo é a mesma em ambos locais (primário e secundário), podemos relacionar entre a tensão de entrada e a tensão de saída e entre a corrente de entrada e a corrente de saída são dadas por duas equações simples.
- A relação entre a tensão $v_P(t)$ aplicada no lado do enrolamento primário do transformador e a tensão $v_S(t)$ produzida no lado do secundário é:

$$\frac{v_P(t)}{v_S(t)} = \frac{N_P}{N_S} = a \quad (5)$$

a : é definido como a **relação de espiras** ou **relação de transformação do transformador**.

Transformador Ideal

- Portanto, a **relação de transformação** do transformador:

$$a = \frac{N_P}{N_S} \quad (6)$$

- Para determinarmos a relação entre as correntes devemos nos basear na **lei de Ampère**, que estabelece que a somatória das **forças magnetomotrizes** em uma bobina de n espiras é nula:

$$\sum_{i=1}^n N_i \cdot i_i = 0 \quad (7)$$

Transformador Ideal

- Portanto, a relação entre as corrente $i_P(t)$ que entra no primário e a corrente $i_S(t)$ que sai do secundário:

$$N_P \cdot i_P(t) + N_S \cdot i_S(t) = 0 \quad (8)$$

- Assim:

$$N_P \cdot i_P(t) = -N_S \cdot i_S(t) \quad (9)$$

- Rearranjando os termos, temos:

$$\frac{i_P(t)}{i_S(t)} = -\frac{N_S}{N_P} = -\frac{1}{a} \quad (10)$$

Transformador Ideal

- Portanto, vamos refletir sobre as Equações (5) e (10):
 - De (5): se a tensão v_P é positiva, necessariamente, v_S também será positiva.
 - De (10): se a tensão i_P é positiva, necessariamente, i_S será negativa. Assim, se i_P entra no primário, necessariamente, i_S deverá sair do secundário.

$$\frac{v_P(t)}{v_S(t)} = \frac{N_P}{N_S} = a \quad (5)$$

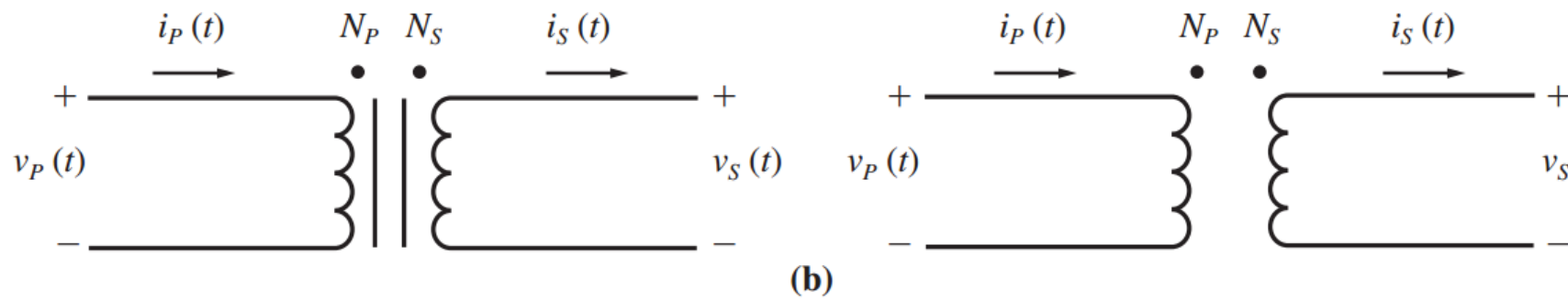
$$\frac{i_P(t)}{i_S(t)} = -\frac{N_S}{N_P} = -\frac{1}{a} \quad (10)$$

Transformador Ideal

- O sinal negativo da Equação (10) refere-se aos sentidos das correntes nos enrolamentos primário e secundários, os quais devem ser contrários.
- Porém, geralmente, não usa o sinal negativo desta expressão, uma vez que faz sentido haver relação de bobinas negativa.
- A relação de espiras do transformador ideal afeta as magnitudes das tensões e correntes, mas não os seus ângulos.

Transformador Ideal

- Os transformadores utilizam a **convenção do ponto** ou da **marca** (são pequenas marcas circulares) que aparecem em uma das terminações de cada enrolamento e que indicam a polaridade da tensão e da corrente no lado do enrolamento secundário do transformador.



Transformador Ideal

- A relação é a que segue:
 - 1. Se a tensão primária for positiva no terminal com ponto (marca) do enrolamento, em relação ao terminal sem ponto, então a tensão secundária também será positiva no terminal com ponto.
 - 2. Se a corrente primária do transformador fluir para dentro do terminal com ponto no enrolamento primário, então a corrente secundária fluirá para fora do terminal com ponto no enrolamento secundário.

Transformador Ideal

- Portanto, em termos de grandezas fasoriais, as equações serão:

$$\frac{\vec{V}_P}{\vec{V}_S} = a \quad (11)$$

- e:

$$\frac{\vec{I}_P}{\vec{I}_S} = -\frac{1}{a} \quad (12)$$

- O ângulo de fase de \vec{V}_P é o mesmo que o ângulo de \vec{V}_S e o ângulo de fase de \vec{I}_P é o mesmo que o ângulo de fase de \vec{I}_S .

Transformador Ideal – Potência

Potência em um transformador ideal

- A **potência ativa de entrada** P_P fornecida ao transformador pelo circuito primário é dada pela equação:

$$P_P = V_P \cdot I_P \cdot \cos \theta_P \quad (13)$$

θ_P : é o ângulo entre a tensão primária e a corrente primária.

- A **potência ativa de saída** P_S fornecida à carga pelo circuito secundário é dada pela equação:

$$P_S = V_S \cdot I_S \cdot \cos \theta_S \quad (14)$$

θ_S : é o ângulo entre a tensão secundária e a corrente secundária.

Transformador Ideal – Potência

- Como em um transformador ideal os ângulos entre tensão e corrente não são afetados, então temos: $\theta_P = \theta_S = \theta$.
- Como visto, a **potência ativa de saída** é dada por:

$$P_S = V_S \cdot I_S \cdot \cos \theta_S \quad (14)$$

- Substituindo as relações das Equações (11) e (12) na Equação (14), bem como a igualdade $\theta_P = \theta_S = \theta$, temos:

$$P_S = \underbrace{\frac{V_P}{\cancel{\alpha}}}_{(V_S)} \cdot \underbrace{(-\cancel{\alpha} \cdot I_P)}_{(I_S)} \cdot \cos \theta \quad (15)$$

Transformador Ideal – Potência

- Portanto, a **potência de saída** (fornecida) de um transformador ideal é igual à sua **potência de entrada** (recebida):

$$P_S = -V_P \cdot I_P \cdot \cos \theta = -P_P \quad (16)$$

$$P_P = -V_S \cdot I_S \cdot \cos \theta = -P_S \quad (17)$$

- Da mesma forma, a relação aplica-se à potência reativa Q :

$$Q_P = V_P \cdot I_P \cdot \sen \theta = -V_S \cdot I_S \cdot \sen \theta = -Q_S \quad (18)$$

- E à potência aparente S :

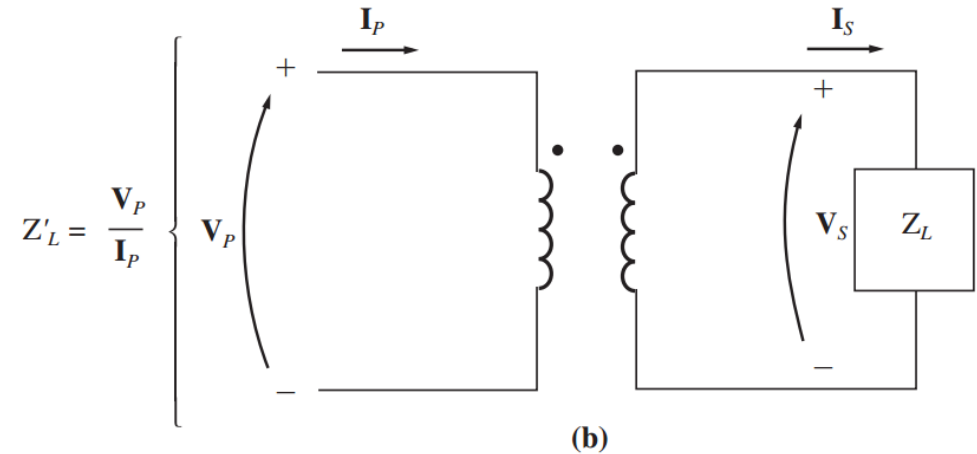
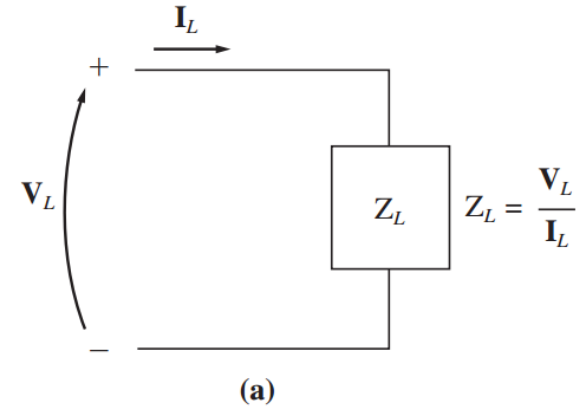
$$S_P = V_P \cdot I_P = -V_S \cdot I_S = -S_S \quad (19)$$

Transformador Ideal – Impedância

Transformação de impedância em um transformador

- A **impedância** de um dispositivo (carga, *Load*) ou de um elemento de circuito é definida como a **razão entre a tensão fasorial** no dispositivo e a **corrente fasorial** que está através dele:

$$\vec{Z}_L = \frac{\vec{V}_L}{\vec{I}_L} \quad (20)$$



Transformador Ideal – Impedância

- Se a corrente secundária de um transformador for denominada \vec{I}_S e a tensão secundária, \vec{V}_S , então a impedância da carga é dada por:

$$\vec{Z}_L = \frac{\vec{V}_S}{\vec{I}_S} \quad (21)$$

- A impedância aparente do circuito primário do transformador será, portanto:

$$\vec{Z}_L' = \frac{\vec{V}_P}{\vec{I}_P} \quad (22)$$

NOTA: A impedância \vec{Z}_L' é a impedância da carga \vec{Z}_L refletida no primário do transformador.

Transformador Ideal – Impedância

- Como a tensão primária pode ser expressa como:

$$\vec{V}_P = a \cdot \vec{V}_S \quad (11)$$

- e a corrente primária pode ser expressa como:

$$\vec{I}_P = -\frac{\vec{I}_S}{a} \quad (12)$$

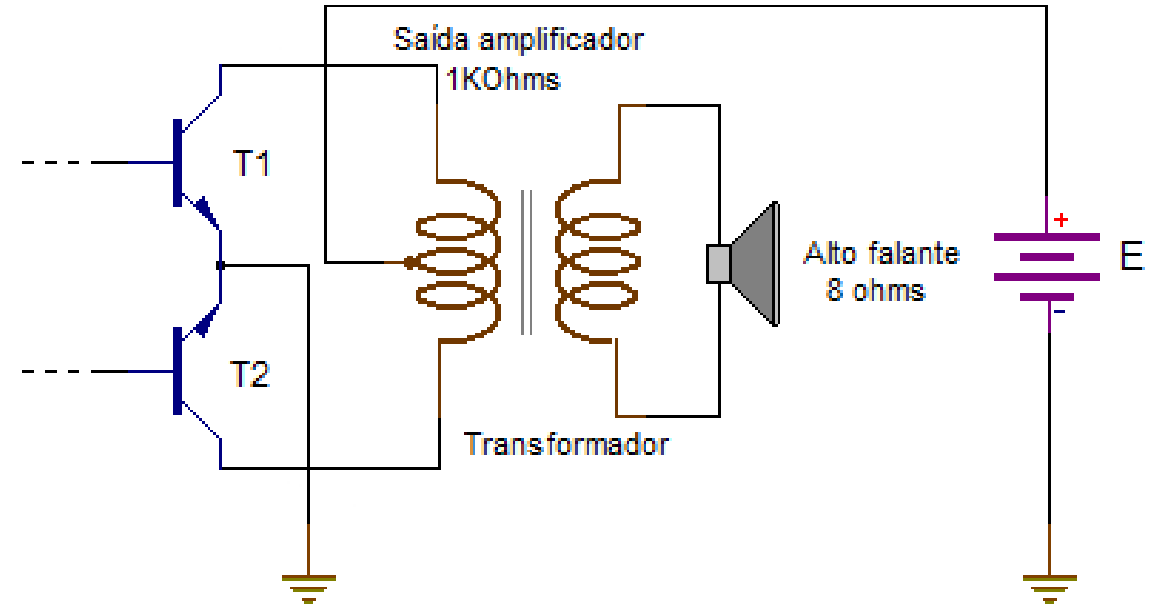
- então, a impedância aparente do primário é:

$$\vec{Z}_L' = \frac{\vec{V}_P}{\vec{I}_P} = \frac{a \cdot \vec{V}_S}{-\frac{\vec{I}_S}{a}} = -a^2 \frac{\vec{V}_S}{\vec{I}_S} \quad (23)$$

$$\vec{Z}_L' = -a^2 \cdot \vec{Z}_L \quad (24)$$

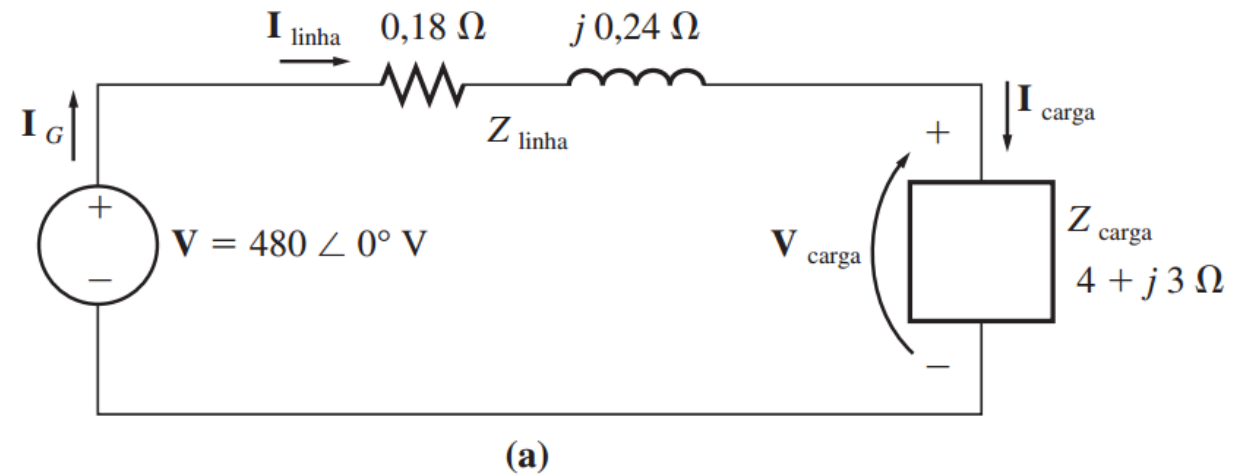
Transformador Ideal – Impedância

- Por meio de um transformador, é possível **casar a impedância da carga com a impedância da fonte** simplesmente usando a relação de espiras adequada.



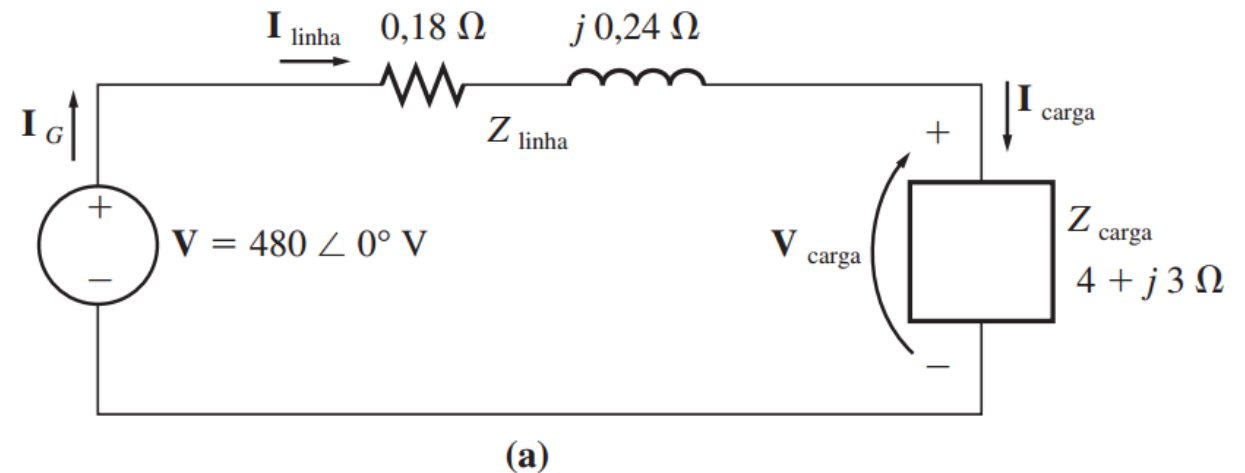
Transformador Ideal – Exemplo 01.A

- Um sistema de potência monofásico consiste em um gerador de tensão alternada de 480 V e 60 Hz alimentando uma carga $Z_{\text{carga}} = 4 + j3\ \Omega$ por meio de uma linha de transmissão de impedância $Z_{\text{linha}} = 0,18 + j0,24\ \Omega$.



Transformador Ideal – Exemplo 01.A

- Responda às seguintes perguntas sobre esse sistema:
 - (a.1) Se o sistema de potência for exatamente como o anteriormente descrito e mostrado na Figura (a), qual será a tensão sobre a carga?
 - (a.2) Quais serão as perdas na linha de transmissão?

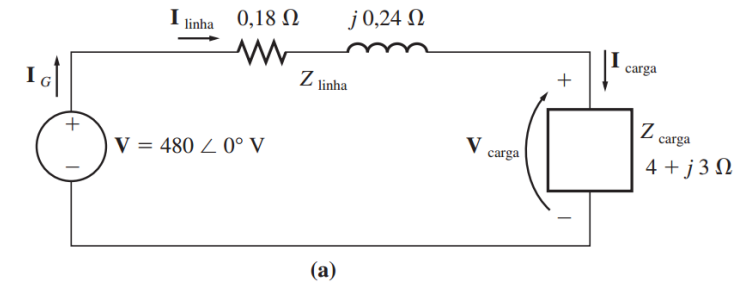


Transformador Ideal – Solução 01.A

- (a.1) A Figura (a) mostra o sistema de potência sem transformadores.
- Aqui, temos $\vec{I}_G = \vec{I}_{linha} = \vec{I}_{carga}$.
- A corrente de linha desse sistema é dada por:

$$\vec{I}_{linha} = \frac{\vec{V}}{\vec{Z}_{linha} + \vec{Z}_{carga}}$$

$$\vec{I}_{linha} = \frac{480 \angle 0^\circ \text{ V}}{(0,18 + j0,24 \ \Omega) + (4 + j3 \ \Omega)}$$

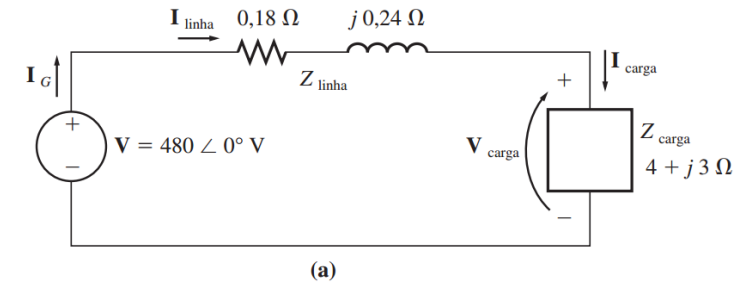


Transformador Ideal – Solução 01.A

- Nas somas e nas subtrações utilize a forma retangular e nas multiplicações e divisões utilize a forma polar.

$$\vec{I}_{linha} = \frac{480 \angle 0^\circ \text{ V}}{(4,18 + j3,24 \ \Omega)} = \frac{480 \angle 0^\circ \text{ V}}{(5,29 \angle 37,78^\circ \ \Omega)}$$

$$\vec{I}_{linha} = 90,74 \angle -37,78^\circ \text{ A}$$



Transformador Ideal – Solução 01.A

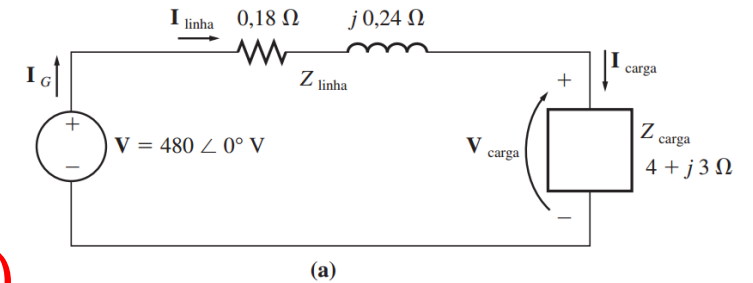
- Portanto, a tensão na carga é:

$$\overrightarrow{V_{linha}} = \overrightarrow{I_{linha}} \cdot \overrightarrow{Z_{carga}}$$

$$\overrightarrow{V_{linha}} = (90,74 \angle -37,78^\circ \text{ A}) \cdot (4 + j3 \Omega)$$

$$\overrightarrow{V_{linha}} = (90,74 \angle -37,78^\circ \text{ A}) \cdot (5 \angle 36,89^\circ \Omega)$$

$$\overrightarrow{V_{linha}} = 453,68 \angle -0,91^\circ \text{ V}$$



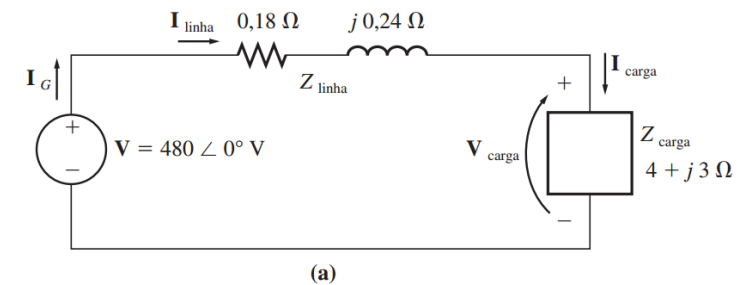
Transformador Ideal – Solução 01.A

- (a.2) As perdas na linha são:

$$P_{perdas} = (I_{linha})^2 \cdot R_{linha}$$

$$P_{perdas} = (90,74 \text{ A})^2 \cdot (0,18 \Omega)$$

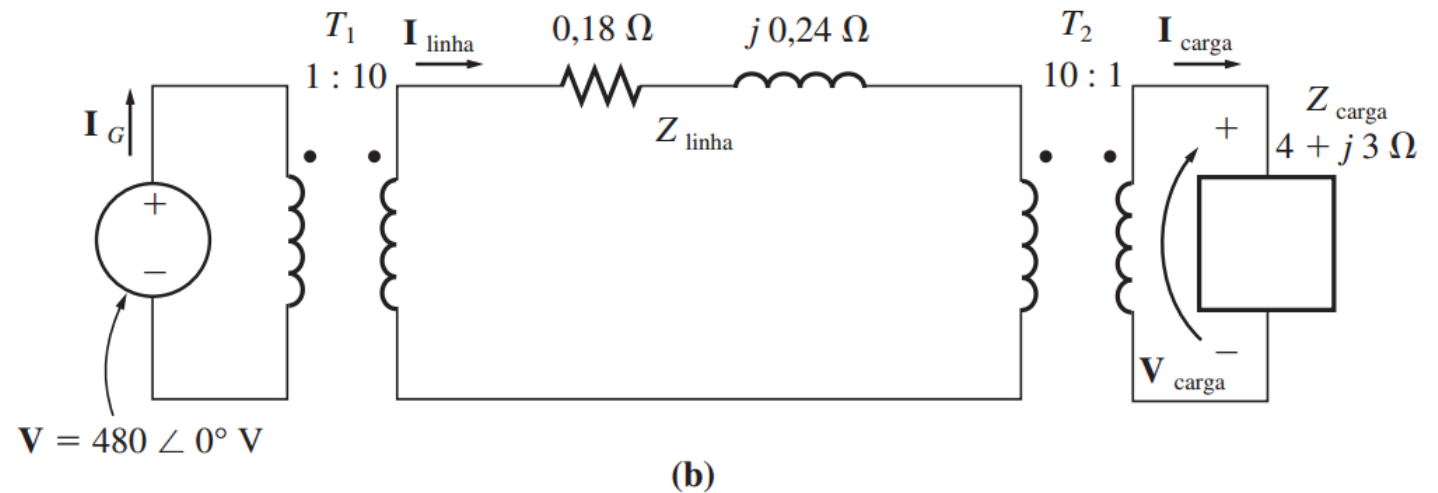
$$P_{perdas} = 1.482 \text{ W}$$



Transformador Ideal – Exemplo 01.B

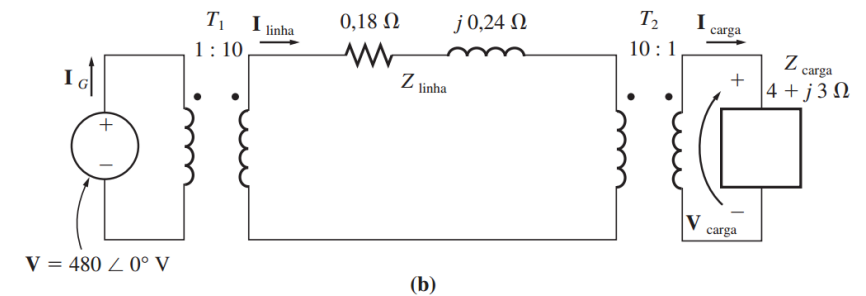
- (b.1) Suponha que um transformador elevador de tensão 1:10 seja colocado na extremidade da linha de transmissão que está junto ao gerador. Um outro transformador abaixador 10:1 é colocado na extremidade da linha de transmissão que está junto à carga, como mostrado na Figura (b). Agora, qual será a tensão sobre a carga?
- (b.2) Quais serão as perdas na linha de transmissão?

NOTA: Vamos inserir dois transformadores nas extremidades do Sistema Elétrico de Potência. O T1 subirá a tensão para que se realize a transmissão pela linha e o T2 rebaixará a tensão para o nível original.



Transformador Ideal – Solução 01.B

- A Figura (b) mostra o sistema de potência com os dois transformadores.
- Para analisar esse sistema, é necessário convertê-lo em um nível de tensão comum. Isso pode ser feito em dois passos:
 - 1. Eliminar o transformador T_2 referindo a carga ao nível de tensão da linha de transmissão.
 - 2. Eliminar o transformador T_1 referindo os elementos da linha de transmissão e a carga equivalente, no nível de tensão de transmissão, ao lado da fonte.



Transformador Ideal – Solução 01.B

- O valor da impedância de carga quando refletida ao nível da tensão do sistema de transmissão é:

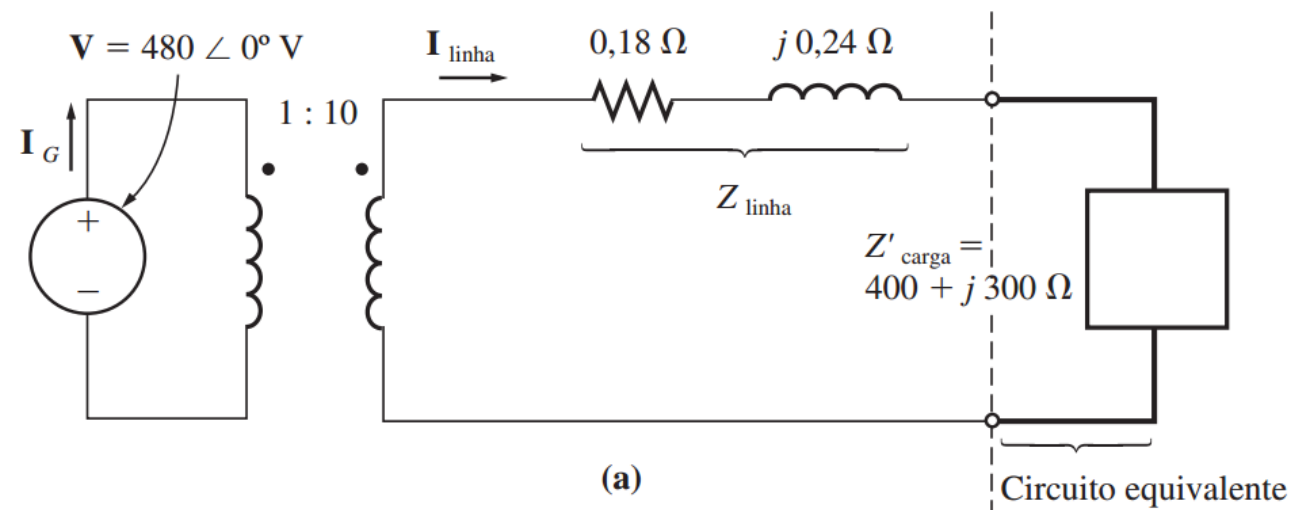
$$\overrightarrow{Z_{carga}'} = a^2 \cdot \overrightarrow{Z_{carga}}$$

$$\overrightarrow{Z_{carga}'} = \left(\frac{10}{1}\right)^2 \cdot (4 + j3 \Omega)$$

$$\overrightarrow{Z_{carga}'} = 400 + j300 \Omega$$

Transformador Ideal – Solução 01.B

- O circuito equivalente é mostrado na Figura (a), abaixo.
- Agora, a impedância total no nível da linha de transmissão $(\overrightarrow{Z_{linha}} + \overrightarrow{Z_{carga}'})$ está refletida através de T_1 ao nível da tensão da fonte.



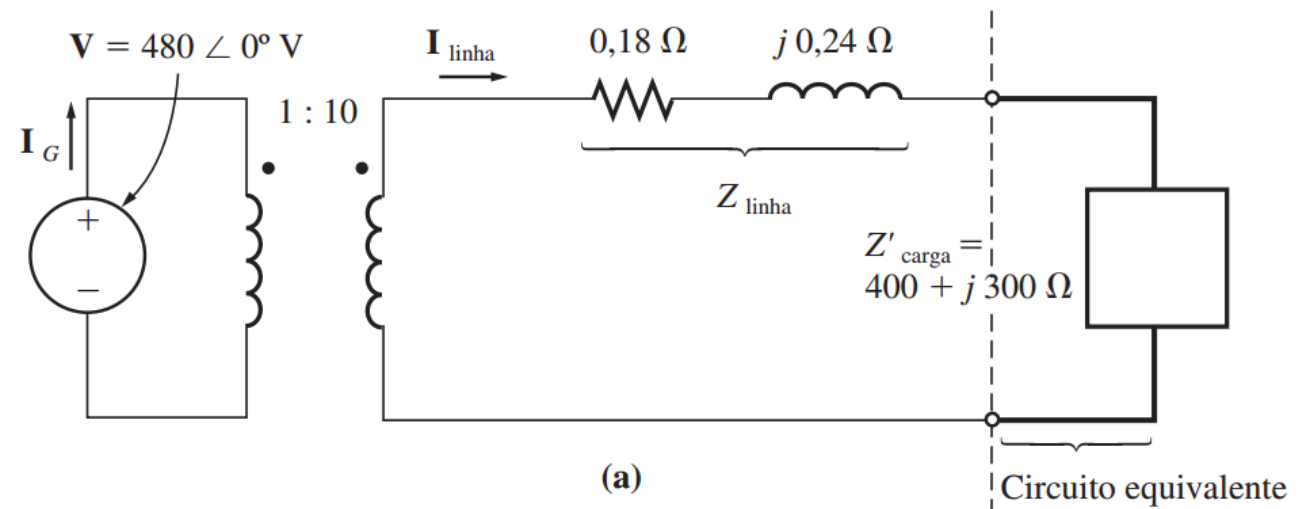
Transformador Ideal – Solução 01.B

- Podemos determinar a impedância equivalente no nível da linha de transmissão :

$$\vec{Z}_{eq} = \vec{Z}_{linha} + \vec{Z}'_{carga} = (0,18 + j0,24 \Omega) + (400 + j300 \Omega)$$

$$\vec{Z}_{eq} = 400,18 + j300,24 \Omega = 500,29 \angle 36,88^\circ \Omega$$

- Porém vamos manter a impedância equivalente no nível da linha de transmissão separadas.



Transformador Ideal – Solução 01.B

- A impedância total refletida ao nível da tensão da fonte agora é:

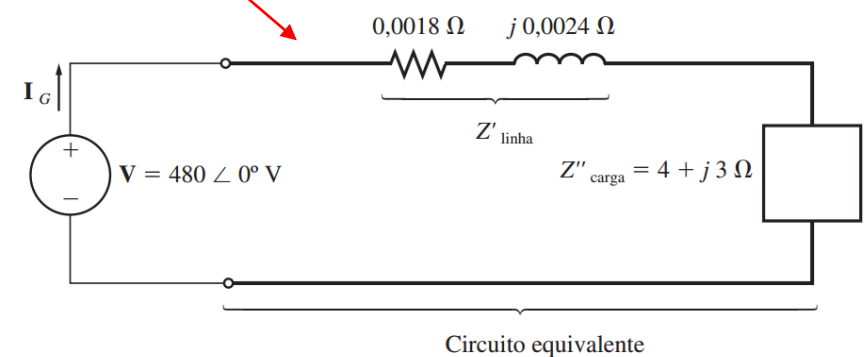
$$\overrightarrow{Z_{eq}'} = a^2 \cdot \overrightarrow{Z_{eq}} = a^2 \cdot (\overrightarrow{Z_{linha}} + \overrightarrow{Z_{carga}'})$$

$$\overrightarrow{Z_{eq}'} = a^2 \cdot \overrightarrow{Z_{eq}} = \left(\frac{1}{10}\right)^2 \cdot ((0,18 + j0,24 \Omega) + (400 + j300 \Omega))$$

$$\overrightarrow{Z_{eq}'} = ((0,0018 + j0,0024 \Omega) + (4 + j3 \Omega))$$

$$\overrightarrow{Z_{eq}'} = 4,0018 + j3,0024 \Omega$$

$$\overrightarrow{Z_{eq}'} = 5,003 \angle 36,88^\circ \Omega$$



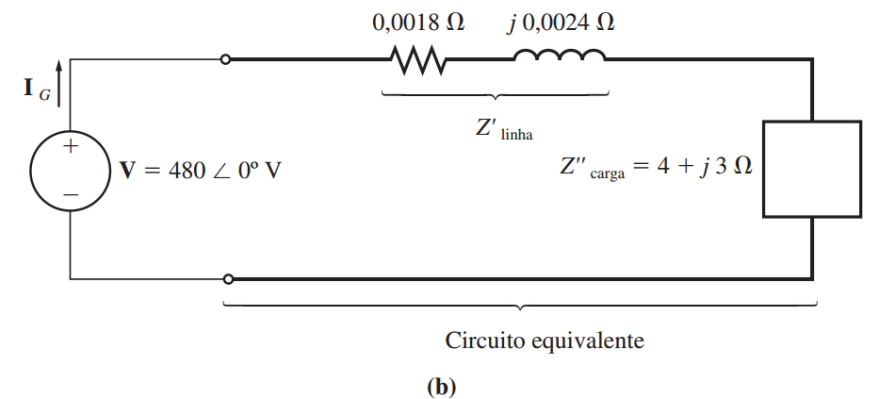
(b)

Transformador Ideal – Solução 01.B

- A corrente do gerador I_G é:

$$\vec{I}_G = \frac{\vec{V}}{Z_{eq}} = \frac{480 \angle 0^\circ \text{ V}}{5,003 \angle 36,88^\circ \Omega}$$

$$\vec{I}_G = 95,94 \angle -36,88^\circ \text{ A}$$



Transformador Ideal – Solução 01.B

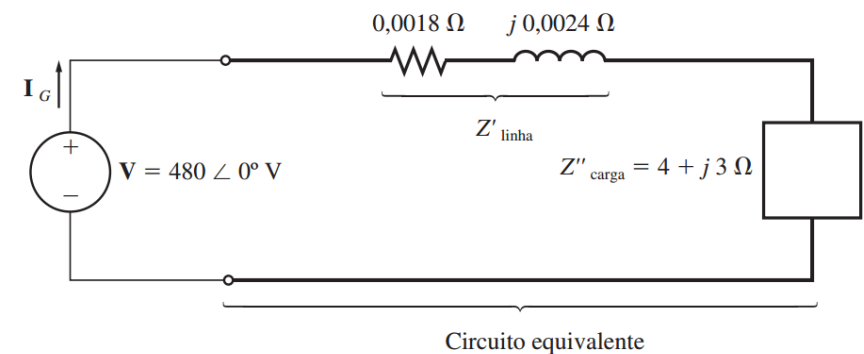
- Conhecendo a corrente \vec{I}_G , podemos retroceder e encontrar \vec{I}_{linha} e \vec{I}_{carga} .
- Trabalhando de volta através de T_1 , obtemos:

$$N_{P1} \cdot \vec{I}_G = N_{S1} \cdot \vec{I}_{linha}$$

$$\vec{I}_{linha} = \frac{N_{P1} \cdot \vec{I}_G}{N_{S1}} = \frac{N_{P1}}{N_{S1}} \cdot \vec{I}_G$$

$$\vec{I}_{linha} = \frac{1}{10} \cdot (95,94 \angle -36,88^\circ \text{ A})$$

$$\vec{I}_{linha} = 9,594 \angle -36,88^\circ \text{ A}$$



(b)

Transformador Ideal – Solução 01.B

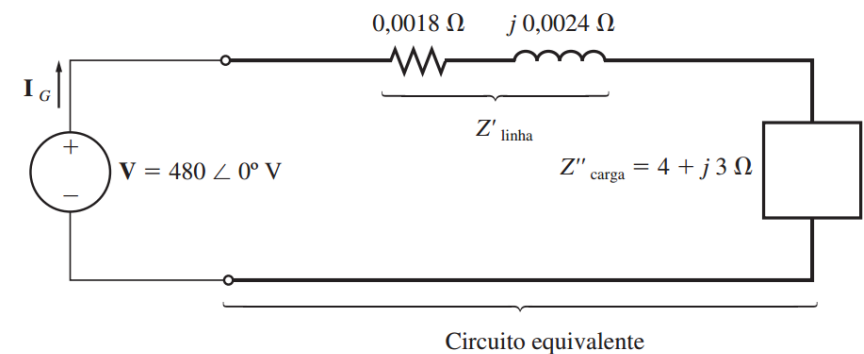
- Trabalhando de volta através de T_2 , obtemos:

$$N_{P2} \cdot \overrightarrow{I_{linha}} = N_{S2} \cdot \overrightarrow{I_{carga}}$$

$$\overrightarrow{I_{carga}} = \frac{N_{P2} \cdot \overrightarrow{I_{linha}}}{N_{S2}} = \frac{N_{P2}}{N_{S2}} \cdot \overrightarrow{I_{linha}}$$

$$\overrightarrow{I_{carga}} = \frac{10}{1} \cdot (9,594 \angle -36,88^\circ \text{ A})$$

$$\overrightarrow{I_{carga}} = 95,94 \angle -36,88^\circ \text{ A}$$



(b)

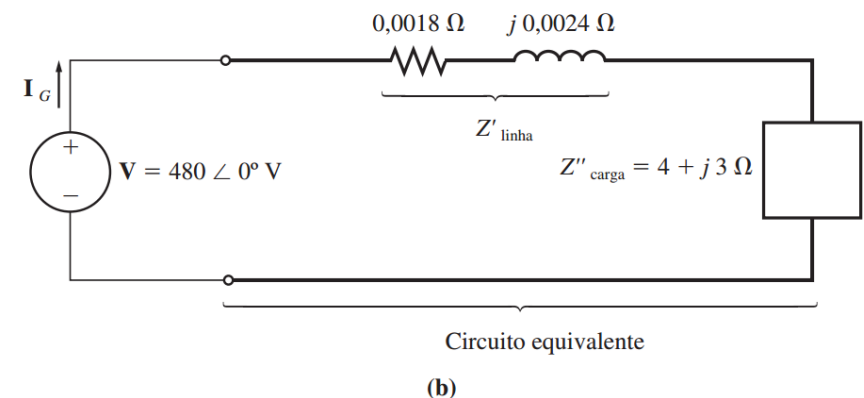
Transformador Ideal – Solução 01.B

- Agora, podemos responder às perguntas feitas originalmente.
- A tensão sobre a carga é dada por:

$$\overrightarrow{V}_{carga} = \overrightarrow{I}_{carga} \cdot \overrightarrow{Z}_{carga}$$

$$\overrightarrow{V}_{linha} = (95,94 \angle -36,88^\circ \text{ A}) \cdot (5,003 \angle 36,88^\circ \Omega)$$

$$\overrightarrow{V}_{linha} = 479,98 \angle -0,01^\circ \text{ V}$$



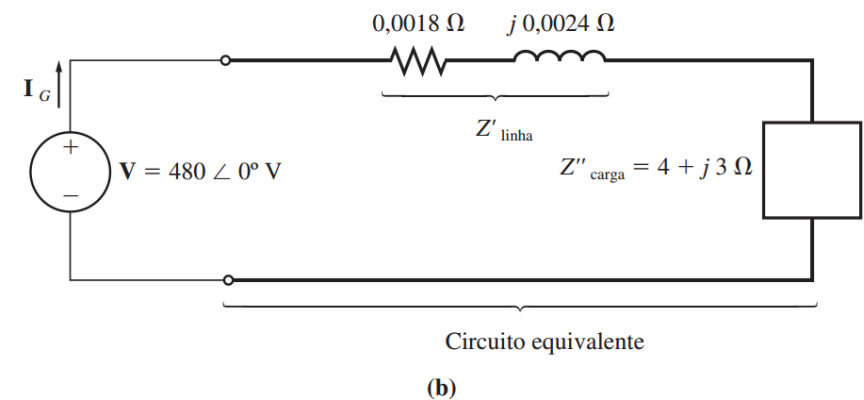
Transformador Ideal – Solução 01.B

- (b.2) As perdas na linha são:

$$P_{perdas} = (I_{linha})^2 \cdot R_{linha}$$

$$P_{perdas} = (9,594A)^2 \cdot (0,18 \Omega)$$

$$P_{perdas} = 16,7 W$$



Transformador Ideal – Solução 01.B

- Observe que a elevação da tensão de transmissão do sistema de potência reduziu as perdas de transmissão em aproximadamente 90 vezes!
- Além disso, a tensão na carga caiu muito menos no sistema com transformadores do que no sistema sem transformadores.
- Esse exemplo simples ilustra dramaticamente as vantagens do uso de linhas de transmissão que operam com tensão mais elevada, assim como a extrema importância dos transformadores nos sistemas modernos de potência.

Bibliografia básica

- [1] **CHAPMAN**, Stephen J., Fundamentos de máquinas elétricas; tradução: Anatólio Laschuk. – 5ª. ed., Porto Alegre: AMGH, 2013. 684 p. ISBN-13: 978-85-8055-207-2
- [2] **ALEXANDER**, Charles K. and **SADIKU**, Matthew N. O., Fundamentos de circuitos elétricos; tradução: José Lucimar do Nascimento; revisão técnica: Antônio Pertence Júnior. – 5. ed., Porto Alegre : AMGH, 2013.
- [3] **DEL TORO**, Vicent. Fundamentos de máquinas elétricas; tradução: Onofre de Andrade Martins. – 1ª. ed., Rio de Janeiro: LTC, 1999. 550p. ISBN-13: 978-85-2161-184-4
- [4] **MOHAN**, Ned., Máquinas Elétricas e Acionamentos - Curso Introdutório; tradução Walter Denis Cruz Sanches, Angelo José Junqueira Rezek. – 1ª. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2015. ISBN-13: 978-85-216-2834-7.

Estas transparências foram baseadas nos livros da bibliografia acima e em sítios (sites) da internet.

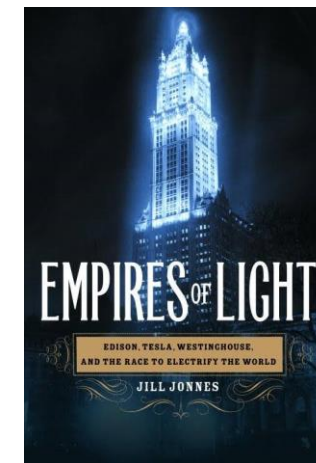
ATENÇÃO

O uso deste material destina-se apenas à consulta no processo de ensino e aprendizagem da disciplina supra citada e, portanto, fica proibido o processo de escaneamento, fotocópia, reprodução ou ainda, postagem em sites acessível ao público ou protegido por senha, no todo ou em parte.

Os autores das imagens e dos textos contidos nesta apresentação podem requerer direitos autorais, assim antes de reproduzi-las ou divulgá-las consulte o autor deste conteúdo, a fim de solicitar a fonte do material.

Anexo A.1 – Vídeos e livro de interesse

- **Documentário: Choque e espanto: A história da eletricidade (Shock and Awe: The Story of Electricity)**
(<https://www.bbc.co.uk/programmes/p00kjq6d/episodes/player>)
 - **Episodio 1/3 - Faísca (Spark) – Prof. Jim Al-Khalili:**
(<https://www.bbc.co.uk/programmes/p00kjq6h>) ou (<https://www.youtube.com/watch?v=rAqUvE97iCU>)
 - **Episodio 2/3 –A era da invenção (The Age of Invention) – Prof. Jim Al-Khalili:**
(<https://www.bbc.co.uk/programmes/p00kjq6h>) ou (<https://www.youtube.com/watch?v=t5m-9vjCe1g>)
 - **Episodio 3/3 - Revelações e Revoluções (Revelations and Revolutions) – Prof. Jim Al-Khalili:**
(<https://www.bbc.co.uk/programmes/p00kjqcv>) ou (<https://www.youtube.com/watch?v=BkkoaXCLYGI>)
- **Filme: A batalha das correntes (The Current War)**
(<https://www.youtube.com/watch?v=pt6CVMW6HqU>) ou
(<https://www.youtube.com/watch?v=RIo0tmnywnw&t=1177s>)
- **Documentário: Tesla - O Mestre dos Raios (Tesla, Master of Lightning)**
(<https://www.youtube.com/watch?v=3Ma2HLZjbIA&t=10s>) ou
(<https://www.youtube.com/watch?v=oj-bDe84C0A>)
- **Livro: JONNES, Jill., Empires of Light: Edison, Tesla, Westinghouse, and the Race to Electrify the World**



ISBN-13: 978-0375758843



Continua...