

Física Experimental III

Primeiro semestre de 2020

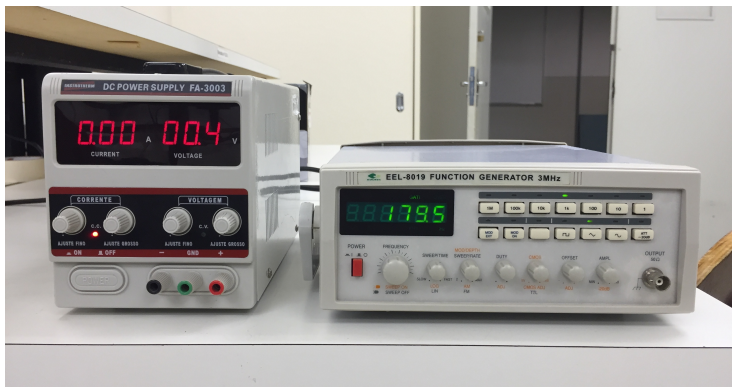
Aula 3 - Experimento 1

Página da disciplina:

<https://edisciplinas.usp.br/course/view.php?id=73158>

24 de março de 2020

Experimento 1 - Circuitos elétricos de corrente contínua e alternada



1 Experimento

- Experimento 1
- Corrente alternada: rede elétrica
- Atividades da semana 4

1 Experimento

- Experimento 1
- Corrente alternada: rede elétrica
- Atividades da semana 4

1 Experimento

- Experimento 1
- Corrente alternada: rede elétrica
- Atividades da semana 4

Objetivos do experimento

- Estudar alguns elementos simples de circuitos elétricos a partir de suas curvas características
 - ▶ Resistores
 - ▶ Células solares
 - ▶ Baterias
- Primeiro contacto com as medidas em AC, uso do osciloscópio

- 4 semanas

- ▶ Semana 1

- ★ Medida da curva característica de um resistor montado em um circuito em série e em paralelo alimentado por corrente contínua (DC)

- ▶ Semana 2

- ★ Medida da curva característica de uma pilha comum e de uma célula solar no regime de corrente contínua (DC)

- ▶ Semana 3

- ★ Medida da curva característica de um resistor em um circuito em série alimentado por corrente alternada (AC)

- 4 semanas

- ▶ Semana 1

- ★ Medida da curva característica de um resistor montado em um circuito em série e em paralelo alimentado por corrente contínua (DC)

- ▶ Semana 2

- ★ Medida da curva característica de uma pilha comum e de uma célula solar no regime de corrente contínua (DC)

- ▶ Semana 3

- ★ Medida da curva característica de um resistor em um circuito em série alimentado por corrente alternada (AC)

- ▶ **Semana 4**

- ★ **Medida das propriedades (amplitude, frequência, fase, etc) da tensão da rede (AC)**

- Síntese da semana (até 1 ponto)
 - ▶ Arquivo em PDF com os gráficos das curvas obtidas, ajustes realizados e eventuais comentários
 - ▶ A data máxima para upload é 19h00 da segunda-feira (diurno) e 8h00 da terça-feira (noturno)
 - ★ Upload no site de reservas como “síntese”

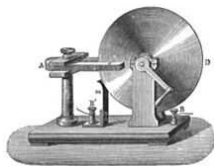
- 1 Experimento
 - Experimento 1
 - Corrente alternada: rede elétrica
 - Atividades da semana 4

Corrente alternada: rede elétrica



Geradores de potência elétrica

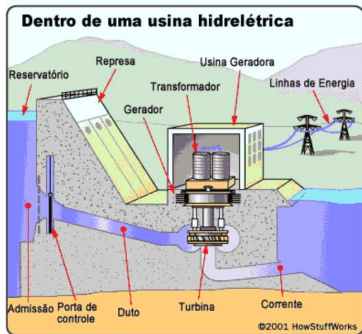
- O primeiro gerador DC foi construído por Faraday (1820) girando manualmente um disco de cobre entre os polos de um ímã
- A partir dessa ideia foram criados os geradores que existem hoje:
 - ▶ O magneto é um eletroímã rotativo, chamado rotor
 - ▶ O condutor de cobre é uma bobina de fio de cobre estacionária, capaz de suportar altas correntes
 - ▶ O campo magnético girante gerado pelo rotor atravessa a bobina e produz uma corrente elétrica
 - ▶ A energia para fazer rodar o rotor vem de uma turbina rotatória, ou de um motor de combustão interna



- Para geração de potência há a opção de gerar AC (turbinas) ou DC (solar, química)
- Geradores AC: que tipo de energia usar para girar as turbinas do gerador?
 - ▶ Água: Hidroelétrica
 - ▶ Vapor: Térmica (queimando Gás, Carvão, Óleo)
 - ▶ Vapor: Nuclear
 - ▶ Vapor: Fornalha solar (usina heliotérmicas)
 - ▶ Diesel: Térmica
 - ▶ Eólica

Gerador

- No caso hidroelétrico, por exemplo, a força da água caindo gira as turbinas:
 - ▶ A energia potencial da água se transforma em energia cinética das turbinas que o gerador transforma em energia elétrica



<http://ciencia.hsw.uol.com.br/usinas-hidreletricas1.htm>

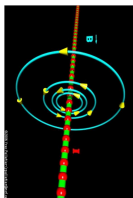
Itaipu: 13 mil MW de potência

- Grande parte da energia que chega a São Paulo é gerada na usina hidroelétrica de Itaipu
- Ela gera 13000 Mega Watt. Metade vai para o Paraguai e metade para o Brasil
 - ▶ O que vem para o Brasil tem frequência é 60 Hz
 - ▶ A parte do Paraguai tem frequência de 50 Hz. 85% dela o Brasil compra de volta
 - ▶ Tudo vai direto para São Paulo e Paraná para distribuição

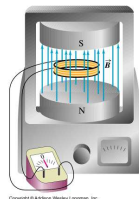


Lei de Faraday

- Para explicar o funcionamento de um gerador vamos precisar estudar a Lei de Faraday



i (const. no tempo) $\Rightarrow B$



B (const. no tempo) $\nRightarrow i$

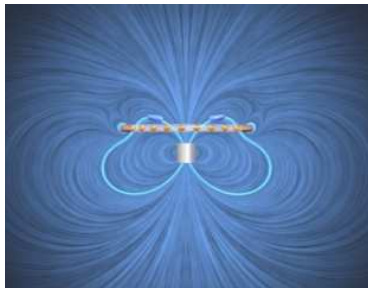
Faraday: Variação de $B \Rightarrow i$

Lei da indução de Faraday: evidências experimentais

- A **Lei de Faraday** da indução eletromagnética (= uma força eletromotriz \mathcal{E} é induzida em um circuito fechado imerso em um campo magnético variável) surgiu da seguinte observação experimental: é gerada uma **f.e.m.** \mathcal{E} todas as vezes que:
 - ▶ houver variação na intensidade das linhas de campo B que atravessam o circuito
 - ▶ houver variação entre a direção das linhas de campo B que atravessam o circuito e o versor normal à área compreendida pelo circuito
 - ▶ houver variação na área compreendida pelo circuito
 - ▶ caso o circuito seja composto de muitas espiras enroladas (bobina), houver variação no número total de espiras, que é também variação na área compreendida pelo circuito

Lei de Faraday

- O que precisa variar para que uma força eletromotriz seja induzida num circuito?



- O que está mudando é a “quantidade” de linhas de campo que passam por dentro da espira, ou seja o que muda é o fluxo de B através da espira
- O fluxo é definido como o produto escalar do campo pelo vetor área da espira

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot \hat{n} dA$$

Unidade de fluxo magnético no SI é o Weber: $1 \text{ weber} = 1 \text{ Wb} = 1 \text{ T m}^2$

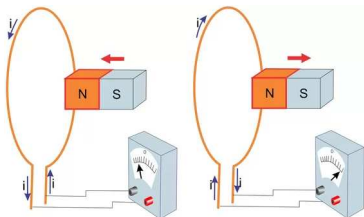
- Agora é possível escrever a **Lei de Faraday** de uma forma matemática:

$$\varepsilon = - \left(\frac{d}{dt} N\Phi_B \right)$$

- N é o número de espiras e Φ_B é o fluxo
- A fórmula acima descreve todas as variações possíveis:
 - ▶ Variação da intensidade B
 - ▶ Variação do ângulo entre B e normal
 - ▶ Variação da área do circuito

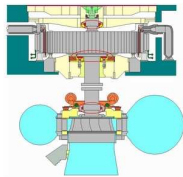
$$\varepsilon = - \left(\frac{d}{dt} N\Phi_B \right)$$

- O sinal negativo na Lei de Faraday está relacionado à polaridade da força eletromotriz induzida em relação à variação do fluxo. Isso é estabelecido pela lei de Lenz:
 - ▶ A força eletromotriz induzida (f.e.m.) produz uma corrente que age sempre de maneira a se opor à variação que a originou
 - ▶ A lei de Lenz resulta da lei de conservação de energia

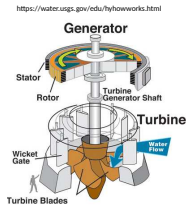


Gerador: Itaipu

- 103 milhões de MWh em um ano (recorde mundial, estabelecido no 2016)



<http://jia.itaipu.gov.br/node/31501>

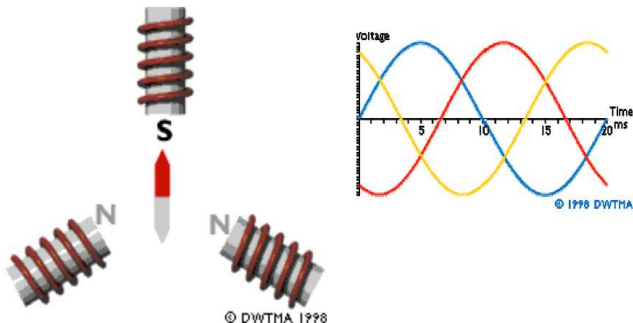


<https://water.usgs.gov/edu/ty/howworks.html>

- Em um grande gerador o campo magnético do rotor é obtido enrolando bobinas em torno de lâminas de aço ferromagnético, chamados de polos e montados no perímetro do rotor
- O rotor está preso ao eixo das turbinas e vai girar com elas
- Quando isso acontece os polos eletromagnéticos do rotor vão se mover ao longo dos condutores (as 3 bobinas do estator) induzindo nelas uma f.e.m.: tensão nos terminais de saída do gerador

Gerador trifásico

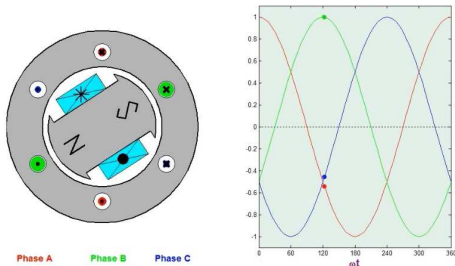
- Princípio de funcionamento: Lei de Faraday



- A variação do fluxo do campo do imã gera corrente nas bobinas
- Youtube sobre geradores:
www.youtube.com/watch?v=tiKH48EMgKE

Gerador trifásico

- Princípio de funcionamento: Lei de Faraday



- O rotor está preso ao eixo das turbinas e vai girar com elas
- Quando isso acontece os polos eletromagnéticos do rotor vão se mover ao longo dos condutores (as 3 bobinas do estator, verde, vermelha e azul no desenho) induzindo nelas uma f.e.m.: tensão nos terminais de saída do gerador
- Youtube sobre geradores: www.youtube.com/watch?v=VyUJEpZrrl4

- A transmissão em corrente contínua (DC) em ultra altas tensões pode ser mais eficiente, mas tem custo fixos maiores:
 - ▶ Diminui as perdas de energia no transporte, pode ser transportada em voltagens mais altas que em AC
 - ▶ Custo elevado para a conversão de AC para DC e vice versa
- A grande maioria de usinas geradoras gera AC:
 - ▶ Elimina o gasto da estação de conversão de AC para DC (e as perdas no processo de conversão)
 - ▶ Perde energia porque o campo elétrico oscilante faz com que pequenas estruturas bipolares girem para se alinhar ao campo oscilante gerando calor. São as perdas dielétricas.
 - ▶ O diâmetro dos fios é limitado devido ao efeito “skin” que não permite que a corrente penetre no fio. O que limita o diâmetro do fio que pode ser usado, limitando a corrente.
 - ▶ Em DC o fio pode ser tão grosso quanto necessário porque a corrente se distribui em toda a área da seção reta.

AC x DC: custos

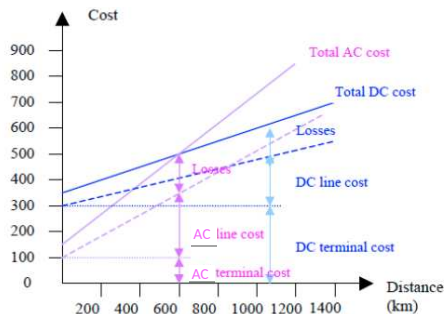
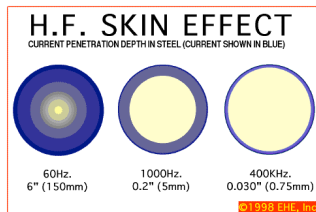


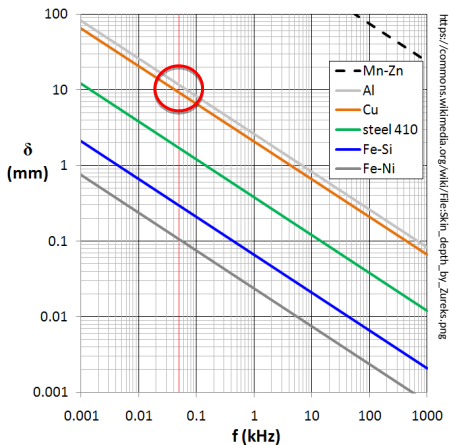
Figure 1: HVDC-HVAC Comparação de custos

- Para distâncias maiores que 700 km a linha DC é mais econômica, apesar do custo das estações de conversão ser muito maior para DC ↔ AC que para AC ↔ AC

- A corrente alternada tende a se deslocar preferencialmente na superfície do condutor, ou fio, à medida que a frequência aumenta

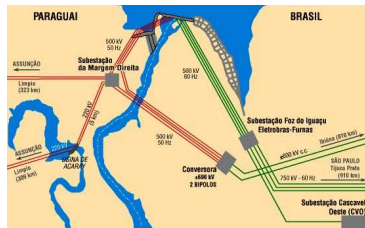


- Ela produz um campo B alternado dentro e fora do condutor: quando a intensidade de I muda a de B muda também e isso cria um campo E que se opõe à mudança da corrente. Esse campo é responsável pela força contra-eletromotriz, mais intensa no centro do condutor. Ela força os elétrons de condução (mais fracamente ligados aos átomos do metal) mais próximos do centro a se deslocarem para a periferia.
 - ▶ É como se houvesse uma resistência crescente à passagem da corrente à medida que se aproxima do centro do condutor, por isso o nome efeito "skin" (pele)



- A 50-60 Hz, no cobre, a profundidade de penetração (δ) é de acerca 10 mm

- Na subestação de Foz do Iguaçu, a energia excedente do Paraguai, em AC senoidal de 50 Hz, é retificada, sendo então transmitida em DC, de 600 kV, percorrendo centenas de quilômetros, até chegar na subestação de Ibiuna-SP, onde é reconvertida para AC trifásica. O sistema de reconversão é composto de 24 válvulas conversoras com 15 metros de altura e 384 tiristores de alta potência cada uma e mais um total de 600 km de fibras ópticas para conduzir os sinais de disparo dos tiristores. Após a reconversão, a energia é injetada no Sistema Sudoeste.
- O sistema de 60 Hz é transmitido em corrente alternada de 765 kV para as estações de Tijuco Preto e Cascavel.
- Nas subestações, transformadores abaixam as tensões para 500 ou 345 kV



- Tiristor: dispositivos semicondutores multicamadas que operam num regime de chaveamento, permitem o controle do estado de bloqueio para o estado de condução (e vice versa no caso de alguns tiristores)
- Sua grande vantagem é o controle de quantidades de energia muito altas.
- São muito utilizados no controle eletrônico de potência e na conversão de energia.

- A palavra tiristor vem do grego “thyr” que significa “porta”

A imagem a seguir mostra três modelos de SCR's: baixa, média e alta potência (da esquerda para a direita). Seus tamanhos não estão em escala.



Transmitindo a potência elétrica gerada

- Linhas de transmissão de energia são a maneira de trazer a energia elétrica gerada em usinas elétricas (de qualquer tipo) até os consumidores.
- Essas linhas são aéreas e operam em diferentes voltagens de acordo com determinadas condições:
 - ▶ tentando minimizar os riscos e as perdas de energia.



Em 1994, a American Society of Civil Engineers elegeu Itaipu uma das 7 maravilhas modernas do mundo. In Foto panorâmica : 1995, American magazine Popular Mechanics

- Linhas de ultra alta tensão (UHV): acima de 800 kV
- Linhas de extra alta tensão (EHV): acima de 230 kV e abaixo de 800 kV, para transporte de longa distância.
- Linhas de alta tensão (HV): menos de 100 kV ou transmissão de 115 kV a 138 kV para consumidores de potência muito alta.
- Linhas de média tensão (MV): entre 1 e 69 kV para distribuição de áreas urbanas e rurais
- Linhas de baixa tensão (LV): menos de 1 kV que conectam as linhas (MV) que chegam às residências e comércios e aos aparelhos elétricos.

- O transporte se dá através de torres aéreas que têm uma grande variedade de tamanho e forma dependendo das tensões que estão transportando:

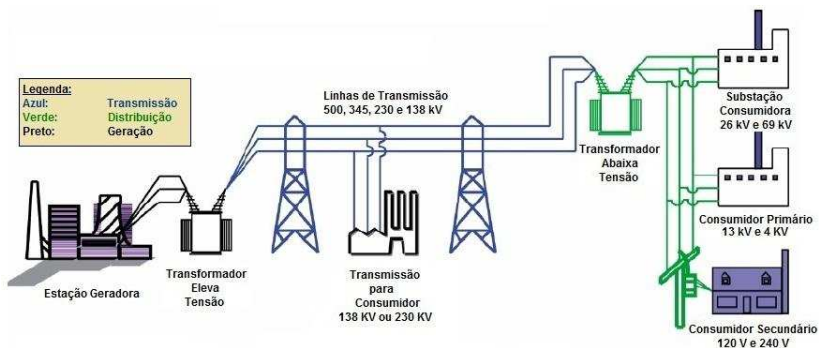


Transporte: os circuitos

- As torres podem levar linhas para um único circuito se for trifásico, são 3 fios isolados
- Para 2 circuitos, trifásico, a torre carrega 6 fios isolados
- Há torres de 4 circuitos: circuitos únicos em paralelo



O que chega nas casas

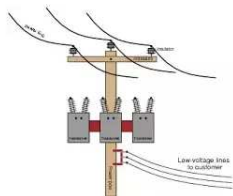


$$\text{Valor eficaz} = \frac{\text{Valor de pico}}{\sqrt{2}}$$

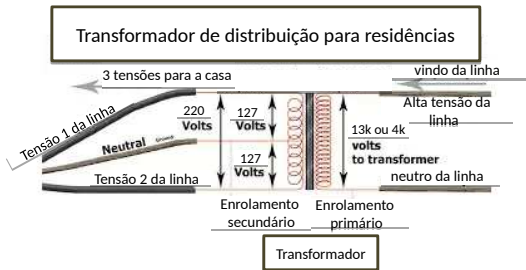
<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAFgqYAB/trabalho-transformadores>

O que chega nas casas

- Nas ruas os postes sustentam linhas de média e baixa tensão: média de 2,3 a 44 kV e baixa de 127 a 440 V (valores eficazes).

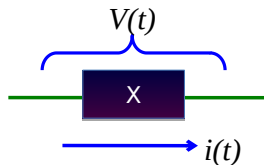


$$\text{Valor eficaz} = \frac{\text{valor de pico}}{\sqrt{2}}$$



<http://www.abradee.com.br/setor-de-distribuicao/a-distribuicao-de-energia>

Tensões harmônicas simples

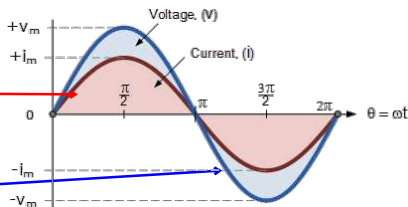


$$\omega t \rightarrow \omega \Delta T = 2\pi \frac{\Delta T}{T}$$

a tensão e corrente:

$$i(t) = i_p \sin(\omega t)$$

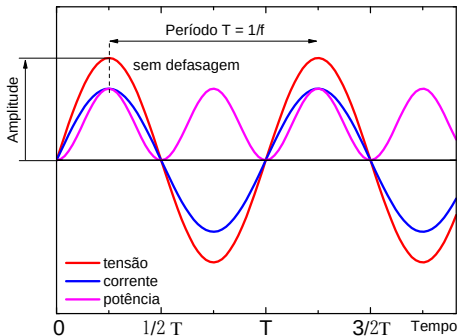
$$V(t) = V_p \sin(\omega t)$$



Potência: resistor ôhmico

- Potência instantânea:

$$P(t) = V(t) \cdot i(t) = V_P \cdot i_P \cdot \sin^2(\omega t) \geq 0$$



- A fase entre tensão e corrente é nula
- A potência varia no tempo, é sempre não negativa, o que significa que o resistor sempre consome potência

- A potência média é a integral da potência instantânea no período dividida pelo período:

$$P_m = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T V_P \cdot i_P \cdot \sin^2(\omega t) dt$$

$$P_m = \frac{1}{2} V_P \cdot i_P = \frac{V_P}{\sqrt{2}} \cdot \frac{i_P}{\sqrt{2}} = V_{ef} \cdot i_{ef}$$

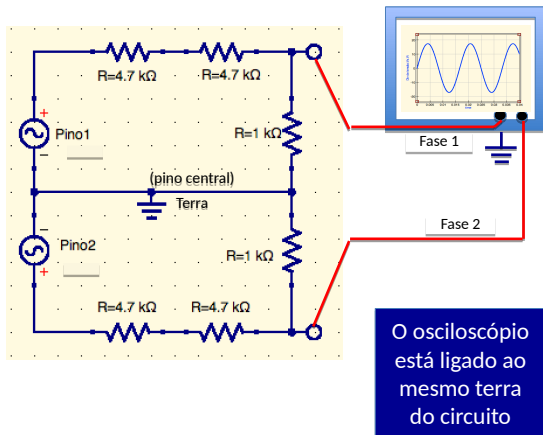
- Chama-se o valor eficaz de i ou V o valor de pico da tensão ou corrente dividido pela raiz de 2
- Em AC o voltímetro mede valor eficaz de tensão e corrente

- O neutro é o caminho de volta da corrente que alimentou qualquer dispositivo que tenha ligado a uma tomada:
 - ▶ A corrente que veio de um dos fios “vivo” do transformador fez seu aparelho funcionar e volta pelo neutro
- O pino terra só deve carregar corrente em caso de falhas no circuito. O terra deve estar ligado ao chassis do aparelho e a um fio preso a uma chapa de cobre e enterrada no chão da residência.
 - ▶ Se um fio “vivo” descascado encostar no chassis de qualquer aparelho a corrente vai correr pelo chassis e escoar pelo fio terra
 - ▶ A alta corrente vai ativar o disjuntor e nada mais acontece
 - ▶ Sem o fio terra o chassis fica energizado e a corrente vai escoar por quem tocar no chassis
 - ▶ Desde 1997 todos os quadros elétricos novos (seja nova instalação ou reforma) precisam proteger com um disjuntor diferencial todos os circuitos que vão para “ambientes úmidos ou molhados” (banheiro, cozinha, áreas externas), interrompendo a alimentação se a diferença entre “ida” (fase) e “volta” (neutro, ou outra fase no caso de 220 V) da corrente superar 30 mA.

- 1 Experimento
 - Experimento 1
 - Corrente alternada: rede elétrica
 - Atividades da semana 4

Objetivos da semana

- Estudar a tensão da rede
- Por questão de segurança vamos abaixar o valor de pico das tensões da rede usando a caixinha que contém 2 divisores de tensão independentes

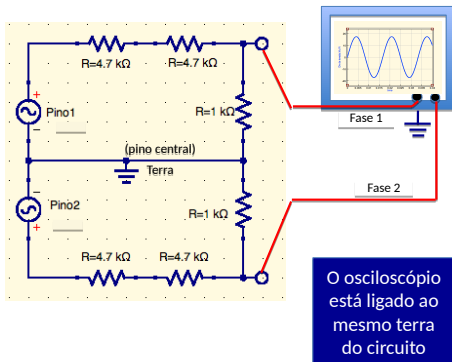


- Desenhe as tensões neutro e fase fornecidas por uma tomada de 127 V. Dê os valores de pico e eficaz, há diferença de fase?
- Desenhe as tensões neutro, fase 1 e fase 2 fornecidas por uma tomada de 220 V. Dê os valores de pico e eficaz e as diferenças de fase.
- Decidir como medir (com o osciloscópio) a diferença de fase entre as duas fases.
- Mais detalhes no roteiro do experimento no site
- **OS GRUPOS somente poderão usar o laboratório após apresentar esta atividade resolvida**

- Como o osciloscópio está com a carcaça aterrada (pino central das régua (127 V e 220 V), as 2 pontas de prova já estarão medindo as tensões em relação ao terra, assim, não há necessidade de ligar o fio terra das pontas de prova
- Qual é o valor de pico e o valor eficaz da tensão esperada no resistor de 1 k? quando ligado à rede com a régua de 127 V (canal 1 do osciloscópio na figura).
 - ▶ E no canal 2?
- Meça a tensão com um voltímetro e depois com um osciloscópio, canal 1. Com o osciloscópio meça também a frequência.
- Comente as diferenças se houver.

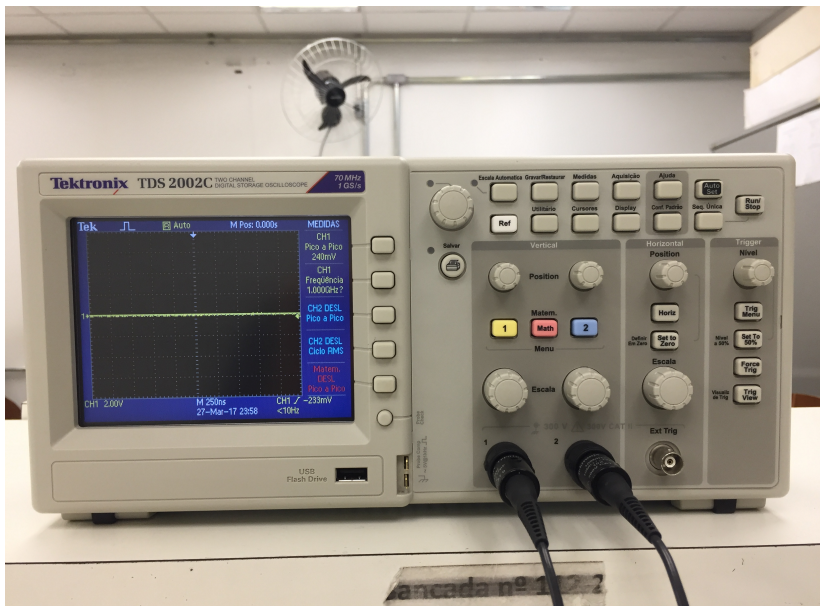
Atividades da semana

- Ligue o seu circuito na régua de 220 V (preta).
- Coloque uma fase em cada canal do osciloscópio.
- Meça as tensões de pico e a defasagem entre essas 2 tensões
- Estão de acordo com os valores esperados?



- Gere matematicamente com o osciloscópio a diferença ΔV entre as fases 1 e 2.
- A forma de onda obtida corresponde ao que se espera da tensão 220 V?
- Tente desenvolver a equação que descreve a diferença de tensão entre fase 1 e fase 2
- A amplitude deduzida está de acordo com o observado? A fase deduzida está de acordo com o observado?
- Mais detalhes no roteiro do experimento no site

Osciloscópio



Caixinha

