

# Respostas Temporais e Associação de Indutores e Capacitores

**Bibiana Maitê Petry Ferraz**  
**Carlos Eduardo Pereira**  
**Walter Fetter Lages**

Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Escola de Engenharia  
Departamento de Sistemas Elétricos de Automação e Energia  
ENG10001 - Circuitos Elétricos I-C

## Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

## 1 Análise de Circuitos Resistivos

## 2 Análise de Circuitos no Domínio do Tempo

- indutor e capacitor
- Respostas Temporais e associação série/paralelo de indutores/capacitores
- Funções de singularidade: degrau, impulso e rampa
- Circuitos de 1ª ordem
- Resposta natural de circuitos RL e RC
- Constante de tempo
- Resposta ao degrau de circuitos RL e RC
- Resposta completa de circuitos RL e RC
- Circuitos de 2ª ordem
- Condições iniciais e finais para fontes constantes
- Resposta natural: superamortecida, subamortecida criticamente amortecida (RLC)
- Resposta completa de circuitos RLC paralelo
- Resposta completa de circuitos RLC série
- Dualidade
- Chaveamento Sequencial
- Resposta Indefinidamente crescente
- Resposta Impulsiva
- Circuitos de ordem superior

Cronograma

**Objetivos da Aula**

Introdução

Resposta no tempo

Indutor  
Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância  
Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

- 1 Aprofundar o estudo sobre respostas temporais de indutores e capacitores
- 2 Analisar associações de indutância e capacitância em série e em paralelo

Cronograma

Objetivos da  
Aula

**Introdução**

Resposta no  
tempo

Indutor  
Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância  
Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

- Análise de **circuitos puramente resistivos** operando em corrente contínua

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor  
Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância  
Capacitância

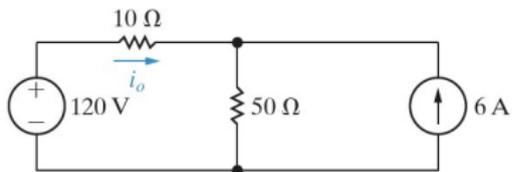
Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

- Análise de **circuitos puramente resistivos** operando em corrente contínua
- Resulta em um **conjunto de equações algébricas**



Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

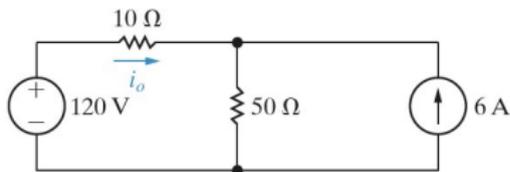
Material Complementar

Próxima Aula

Referências

- Análise de **circuitos puramente resistivos** operando em corrente contínua
- Resulta em um **conjunto de equações algébricas**

- Análise de circuitos elétricos com **resistores, indutores e capacitores** operando em corrente contínua



Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

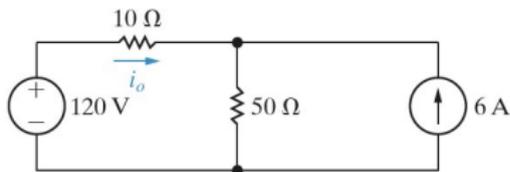
Atividade proposta

Material Complementar

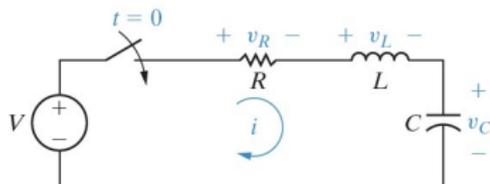
Próxima Aula

Referências

- Análise de **circuitos puramente resistivos** operando em corrente contínua
- Resulta em um **conjunto de equações algébricas**



- Análise de circuitos elétricos com **resistores, indutores e capacitores** operando em corrente contínua
- Resulta em um **conjunto de equações diferenciais**



Indutância é um parâmetro de circuito utilizado para descrever um indutor

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

Indutância é um parâmetro de circuito utilizado para descrever um indutor

A relação tensão-corrente é dada por:

$$v = L \frac{di}{dt}$$

onde:

$v$  é medida em volts

$L$  em henrys

$i$  em ampères

$t$  em segundos

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

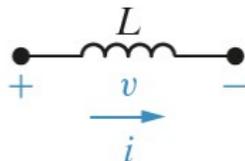
Próxima Aula

Referências

Indutância é um parâmetro de circuito utilizado para descrever um indutor

A relação tensão-corrente é dada por:

$$v = L \frac{di}{dt}$$



onde:

$v$  é medida em volts

$L$  em henrys

$i$  em ampères

$t$  em segundos

- Sinal: **convenção passiva**

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

Indutância é um parâmetro de circuito utilizado para descrever um indutor

A relação tensão-corrente é dada por:

$$v = L \frac{di}{dt}$$

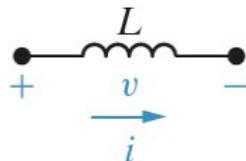
onde:

$v$  é medida em volts

$L$  em henrys

$i$  em ampères

$t$  em segundos



- Sinal: **convenção passiva**
- A referência de corrente está na direção da queda de tensão no indutor

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

Indutância é um parâmetro de circuito utilizado para descrever um indutor

A relação tensão-corrente é dada por:

$$v = L \frac{di}{dt}$$

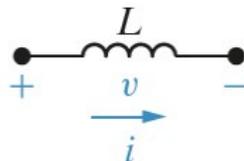
onde:

$v$  é medida em volts

$L$  em henrys

$i$  em ampères

$t$  em segundos



- Sinal: **convenção passiva**
- A referência de corrente está na direção da queda de tensão no indutor
- Se a referência de corrente estiver na direção da elevação de tensão, a equação é escrita com um sinal de menos

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

$$v = L \frac{di}{dt}$$

- A tensão nos terminais de um indutor é **proporcional à variação temporal da corrente** no indutor

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

$$v = L \frac{di}{dt}$$

- A tensão nos terminais de um indutor é **proporcional à variação temporal da corrente** no indutor
- Deste modo:
  - 1 Se  $i$  é constante,  $v = 0$ : indutor se comporta como um curto circuito

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

$$v = L \frac{di}{dt}$$

- A tensão nos terminais de um indutor é **proporcional à variação temporal da corrente** no indutor
- Deste modo:
  - 1 Se  $i$  é constante,  $v = 0$ : indutor se comporta como um curto circuito
  - 2 Se  $i$  variar instantaneamente no indutor,  $v = \infty$ : não é possível fisicamente

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

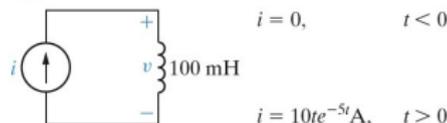
Referências

## Exemplo 1: Determinação da tensão, dada a corrente, nos terminais de um indutor

A fonte independente de corrente no circuito mostrado na Figura 6.2 gera corrente nula para  $t < 0$  e um pulso  $10te^{-5t}$  A para  $t > 0$ .

- Faça um gráfico da forma de onda da corrente.
- Em qual instante de tempo a corrente é máxima?
- Determine a expressão da tensão nos terminais do indutor de 100 mH em função do tempo.
- Faça um gráfico da forma de onda da tensão.
- A tensão e a corrente são máximas ao mesmo tempo?
- Em qual instante de tempo a tensão muda de polaridade?
- Há, alguma vez, uma variação instantânea de tensão no indutor? Se houver, em que instante ela ocorre?

Figura 6.2 Circuito para o Exemplo 6.1.



## a) *Forma de onda da corrente*

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

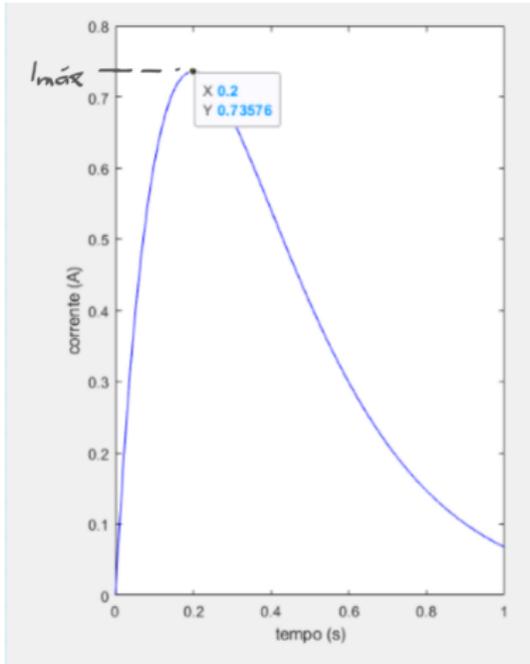
Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

## a) Forma de onda da corrente



Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

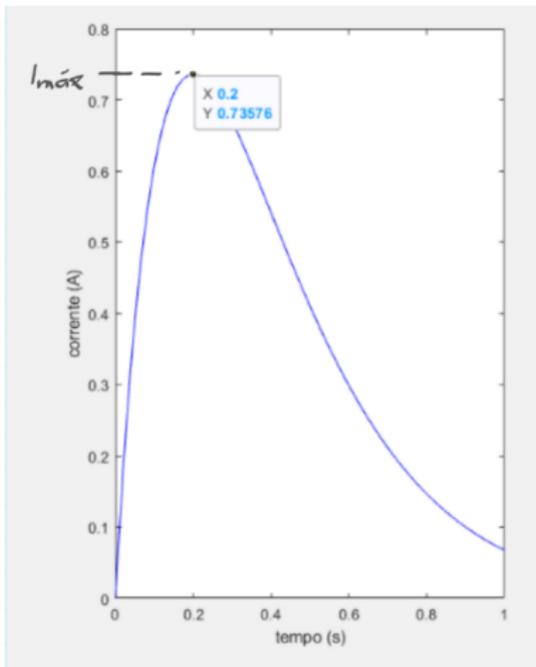
Material Complementar

Próxima Aula

Referências

a) *Forma de onda da corrente*

b) *Instante da corrente máxima*



Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

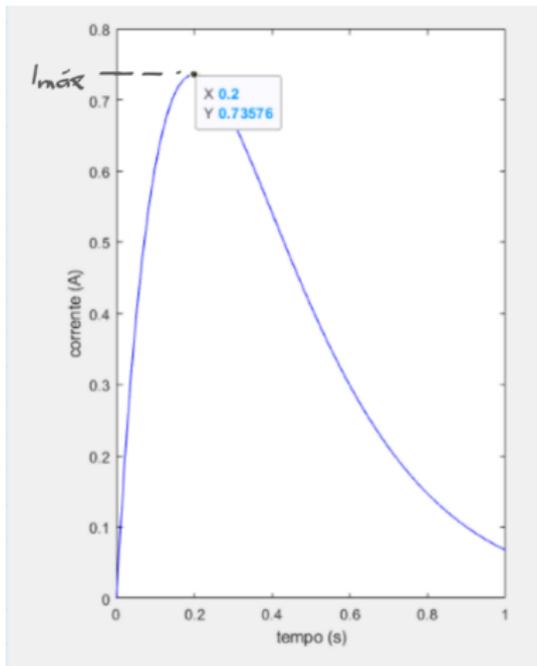
Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

## a) Forma de onda da corrente



## b) Instante da corrente máxima

$$i = 10te^{-5t}$$

$$\frac{di}{dt} = 0 \implies 10e^{-5t} + 10t(-5e^{-5t}) = 0$$

$$10e^{-5t} = 50te^{-5t}$$

$$5t = 1 \implies t = \frac{1}{5} = 0.2 \text{ s}$$

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

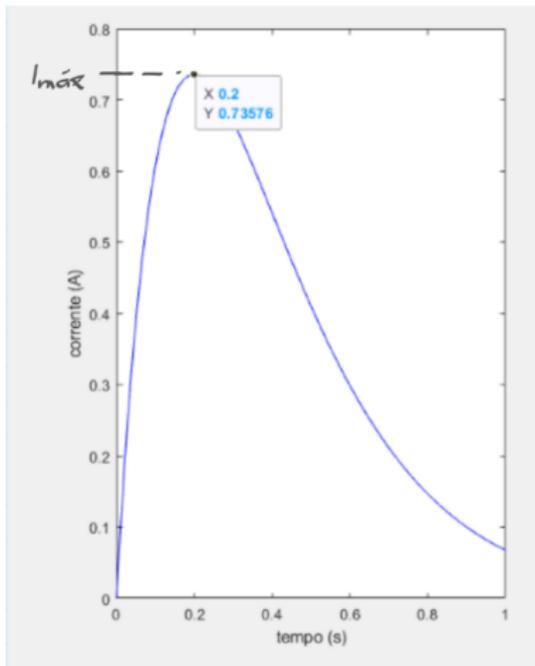
Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

## a) Forma de onda da corrente



## b) Instante da corrente máxima

$$i = 10te^{-5t}$$

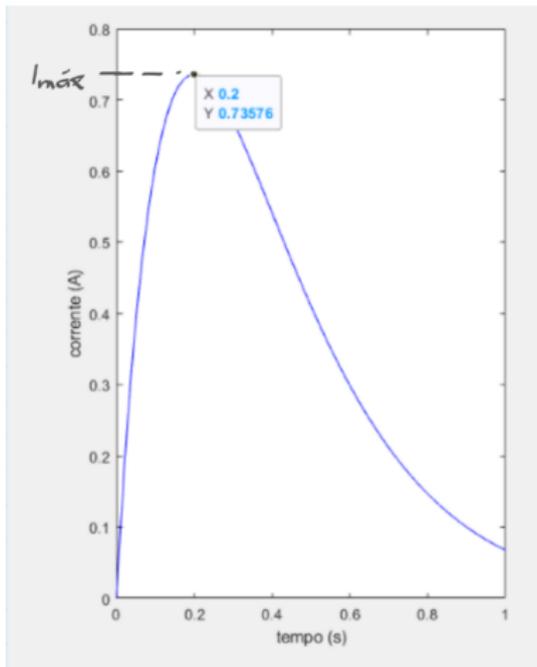
$$\frac{di}{dt} = 0 \implies 10e^{-5t} + 10t(-5e^{-5t}) = 0$$

$$10e^{-5t} = 50te^{-5t}$$

$$5t = 1 \implies t = \frac{1}{5} = 0.2 \text{ s}$$

## c) Tensão no indutor

## a) Forma de onda da corrente



## b) Instante da corrente máxima

$$i = 10te^{-5t}$$

$$\frac{di}{dt} = 0 \implies 10e^{-5t} + 10t(-5e^{-5t}) = 0$$

$$10e^{-5t} = 50te^{-5t}$$

$$5t = 1 \implies t = \frac{1}{5} = 0.2 \text{ s}$$

## c) Tensão no indutor

$$v = L \frac{di}{dt} = 0.1 (10e^{-5t} - 50te^{-5t})$$

$$v = e^{-5t}(1 - 5t)$$

$$v = \begin{cases} e^{-5t}(1 - 5t) & t > 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

## d) *Forma de onda da tensão*

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

**Indutor**

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

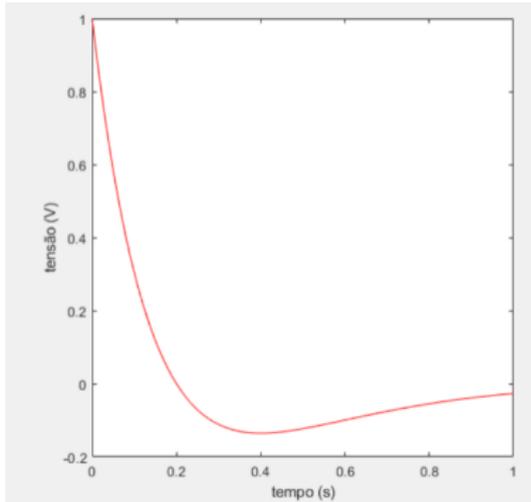
Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

## d) Forma de onda da tensão



Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

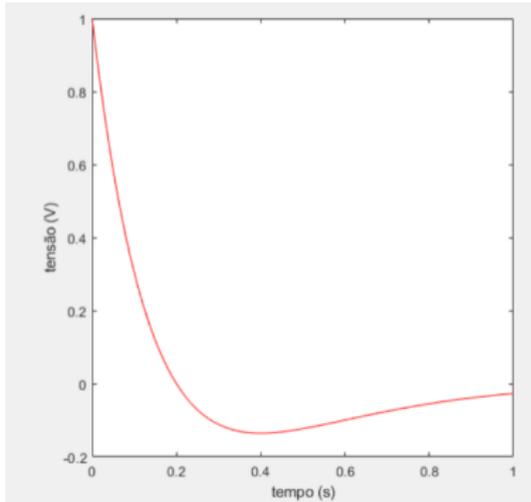
Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

d) *Forma de onda da tensão*



e) *Tensão e corrente são máximas ao mesmo tempo?*

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

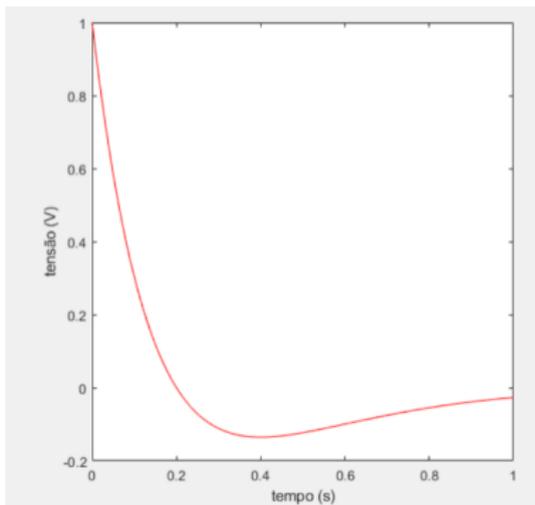
Atividade proposta

Material Complementar

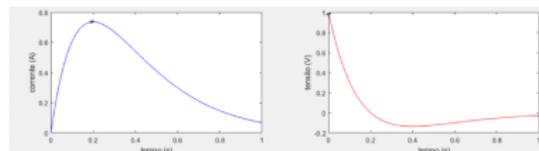
Próxima Aula

Referências

d) *Forma de onda da tensão*



e) *Tensão e corrente são máximas ao mesmo tempo?*



Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

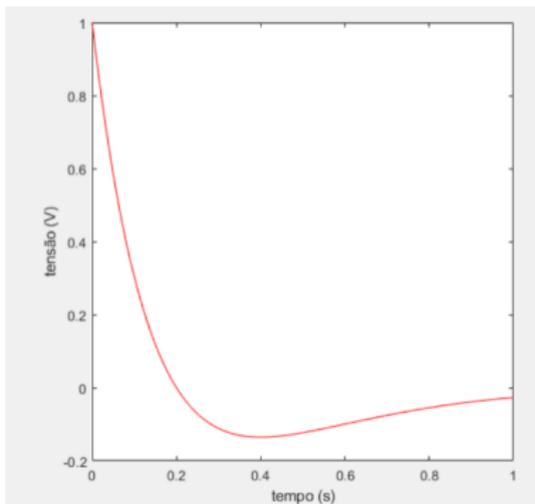
Atividade proposta

Material Complementar

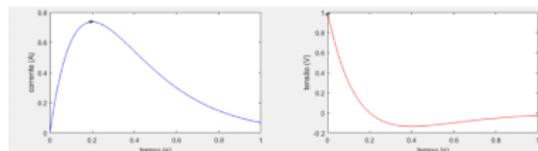
Próxima Aula

Referências

d) *Forma de onda da tensão*



e) *Tensão e corrente são máximas ao mesmo tempo?*



Não, pois a tensão é proporcional a  $\frac{di}{dt}$  e não a  $i$

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

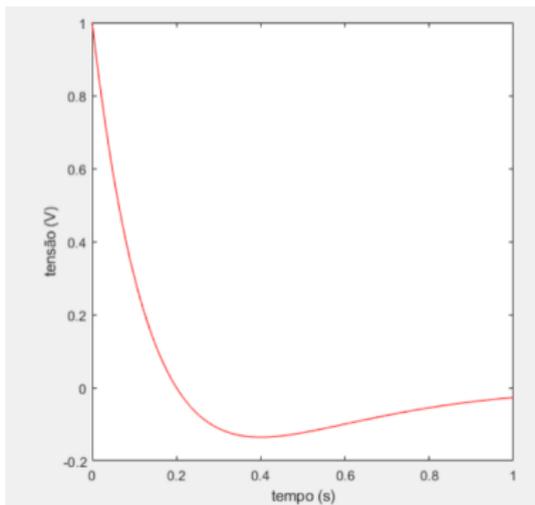
Atividade proposta

Material Complementar

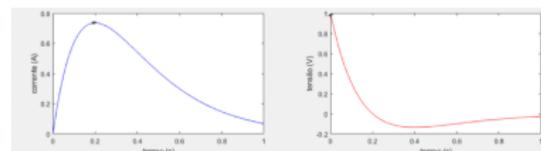
Próxima Aula

Referências

**d) Forma de onda da tensão**



**e) Tensão e corrente são máximas ao mesmo tempo?**



Não, pois a tensão é proporcional a  $\frac{di}{dt}$  e não a  $i$

**f) Instante em que a tensão muda de polaridade**

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

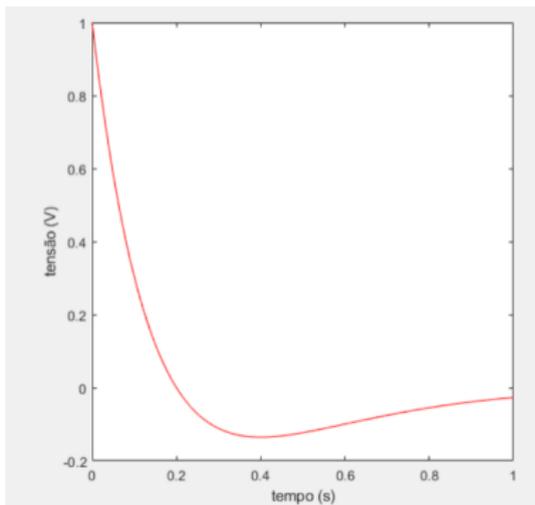
Atividade proposta

Material Complementar

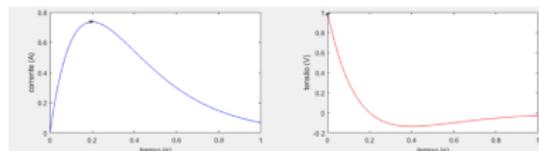
Próxima Aula

Referências

d) *Forma de onda da tensão*



e) *Tensão e corrente são máximas ao mesmo tempo?*



Não, pois a tensão é proporcional a  $\frac{di}{dt}$  e não a  $i$

f) *Instante em que a tensão muda de polaridade*

Quando  $\frac{di}{dt}$  muda de polaridade  
 $\implies$  quando  $\frac{di}{dt} = 0 \implies t = 0.2\text{ s}$

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

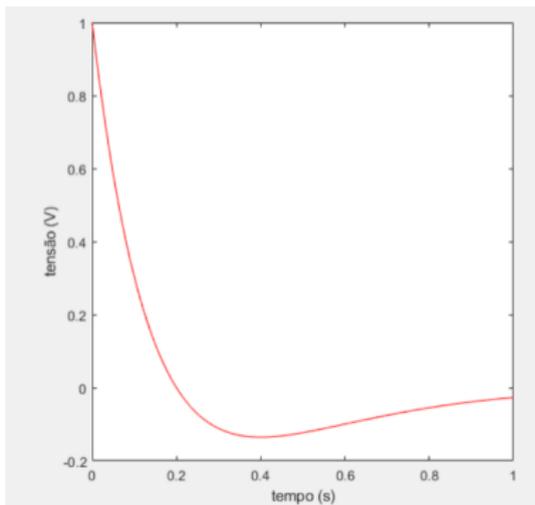
Atividade proposta

Material Complementar

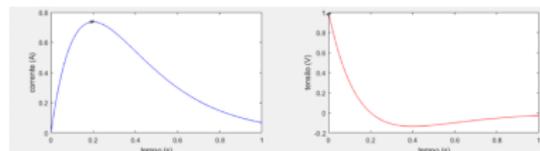
Próxima Aula

Referências

**d) Forma de onda da tensão**



**e) Tensão e corrente são máximas ao mesmo tempo?**



Não, pois a tensão é proporcional a  $\frac{di}{dt}$  e não a  $i$

**f) Instante em que a tensão muda de polaridade**

Quando  $\frac{di}{dt}$  muda de polaridade  
 $\implies$  quando  $\frac{di}{dt} = 0 \implies t = 0.2\text{ s}$

**g) Há variação instantânea da tensão no indutor?**

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

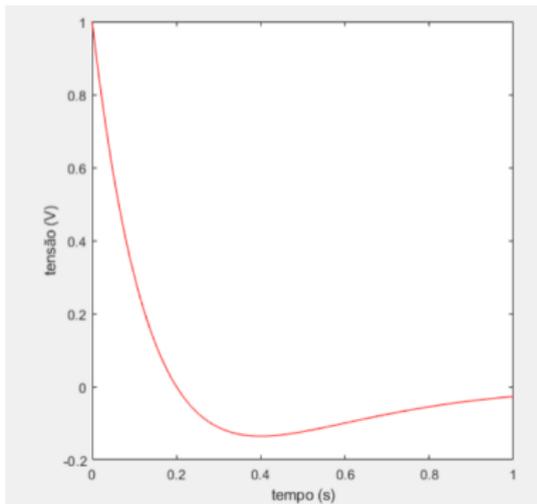
Atividade proposta

Material Complementar

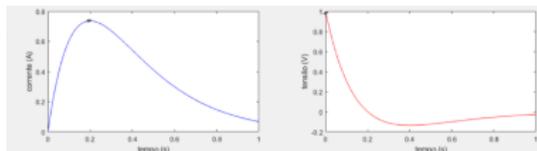
Próxima Aula

Referências

**d) Forma de onda da tensão**



**e) Tensão e corrente são máximas ao mesmo tempo?**



Não, pois a tensão é proporcional a  $\frac{di}{dt}$  e não a  $i$

**f) Instante em que a tensão muda de polaridade**

Quando  $\frac{di}{dt}$  muda de polaridade  $\Rightarrow$  quando  $\frac{di}{dt} = 0 \Rightarrow t = 0.2\text{ s}$

**g) Há variação instantânea da tensão no indutor?**

Sim, em  $t = 0$ .

É também desejável poder expressar a corrente em função da tensão

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

É também desejável poder expressar a corrente em função da tensão  
**Relação corrente-tensão em um indutor:**

$$v = L \frac{di}{dt}$$

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

É também desejável poder expressar a corrente em função da tensão  
**Relação corrente-tensão em um indutor:**

$$v = L \frac{di}{dt}$$

$$vdt = Ldi$$

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

É também desejável poder expressar a corrente em função da tensão  
**Relação corrente-tensão em um indutor:**

$$v = L \frac{di}{dt}$$

$$v dt = L di$$

$$L \int_{i(t_0)}^{i(t)} dx = \int_{t_0}^t v d\tau$$

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

# Comportamento de um indutor

É também desejável poder expressar a corrente em função da tensão

Relação corrente-tensão em um indutor:

$$v = L \frac{di}{dt}$$

$$v dt = L di$$

$$L \int_{i(t_0)}^{i(t)} dx = \int_{t_0}^t v d\tau$$

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_{t_0}^t v d\tau + i(t_0)$$

em que  $i(t)$  é a corrente correspondente a  $t$  e  $i(t_0)$  é o valor da corrente do indutor no início da integração, em  $t_0$ .

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

# Comportamento de um indutor

É também desejável poder expressar a corrente em função da tensão  
**Relação corrente-tensão em um indutor:**

$$v = L \frac{di}{dt}$$

$$v dt = L di$$

$$L \int_{i(t_0)}^{i(t)} dx = \int_{t_0}^t v d\tau$$

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_{t_0}^t v d\tau + i(t_0)$$

em que  $i(t)$  é a corrente correspondente a  $t$  e  $i(t_0)$  é o valor da corrente do indutor no início da integração, em  $t_0$ .

Em muitas aplicações práticas,  $t_0 = 0$ , logo:

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t v d\tau + i(0)$$

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

## Exemplo 2: Determinação da corrente, dada a tensão, nos terminais de um indutor

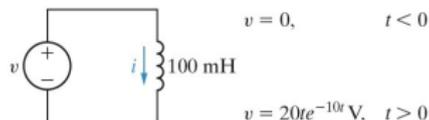
O pulso de tensão aplicado ao indutor de 100 mH mostrado na Figura 6.5 é 0 para  $t < 0$  e é dado pela expressão

$$v(t) = 20te^{-10t} \text{ V}$$

para  $t > 0$ . Admita também que  $i = 0$  para  $t \leq 0$ .

- Faça um gráfico da tensão em função do tempo.
- Determine a expressão da corrente no indutor em função do tempo.
- Faça um gráfico da corrente em função do tempo.

Figura 6.5 Circuito para o Exemplo 6.2.



## a) *Gráfico da tensão*

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

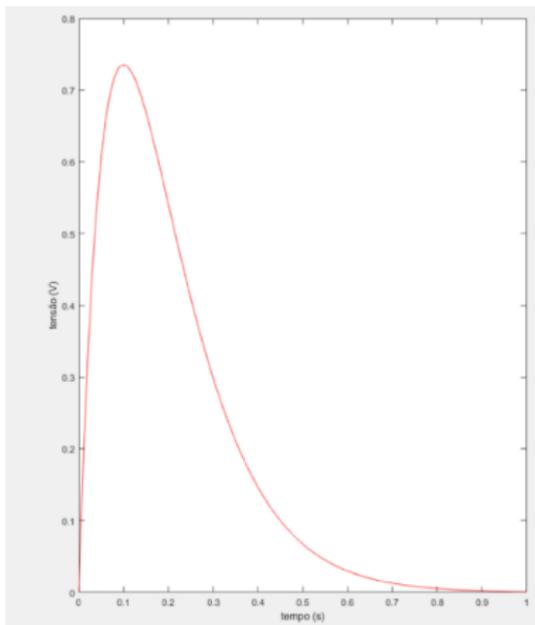
Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

## a) *Gráfico da tensão*



Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

**Indutor**

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade  
proposta

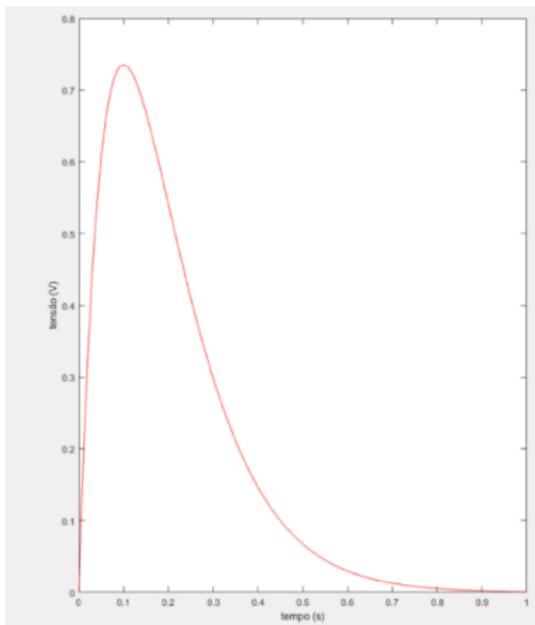
Material  
Complementar

Próxima Aula

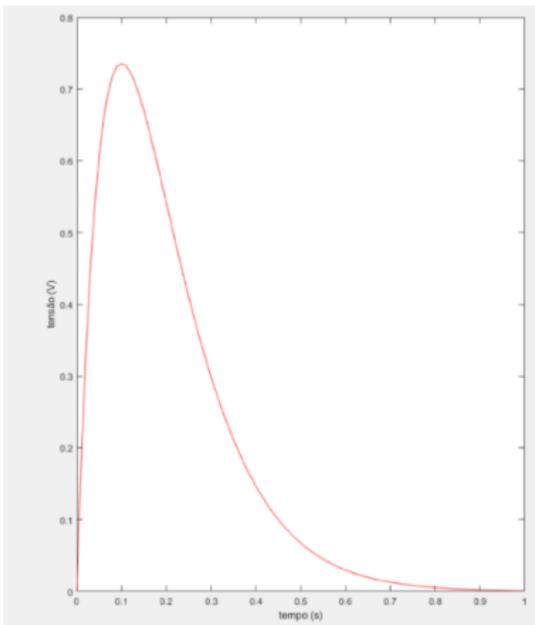
Referências

b) *Expressão da corrente*

a) *Gráfico da tensão*



## a) *Gráfico da tensão*



## b) *Expressão da corrente*

Se  $t \leq 0$ ,  $i = 0$

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

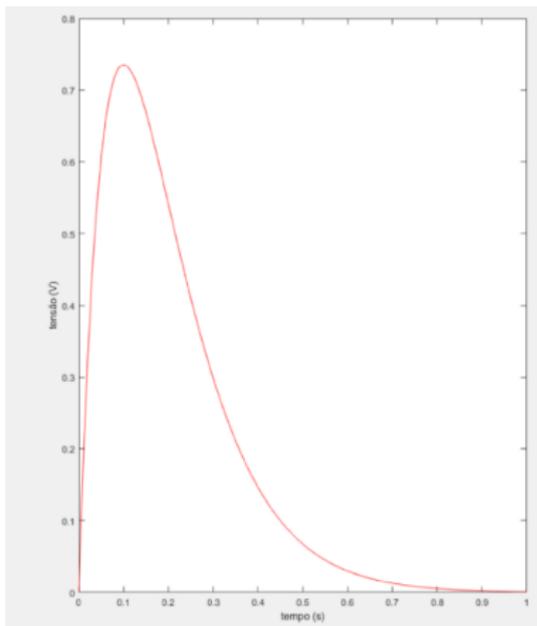
Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

## a) Gráfico da tensão



## b) Expressão da corrente

Se  $t \leq 0$ ,  $i = 0$

Se  $t > 0$ ,  $i = \frac{1}{L} \int_0^t v d\tau + i(0)$

$$\begin{aligned}
 i(t) &= \frac{1}{0.1} \int_0^t 20\tau e^{-10\tau} d\tau + 0 \\
 &= 200 \int_0^t \tau e^{-10\tau} d\tau \\
 &= 200 \left[ -\frac{e^{-10\tau}}{10} \left( \tau + \frac{1}{10} \right) \right]_0^t \\
 &= 200 \left[ -\frac{e^{-10\tau}}{100} (10\tau + 1) \right]_0^t \\
 &= 2 \left\{ -e^{-10\tau} (10\tau + 1) \right. \\
 &\quad \left. - \left[ -e^0 (0 + 1) \right] \right\} \\
 i(t) &= 2 \left( 1 - 10te^{-10t} - e^{-10t} \right)
 \end{aligned}$$

## c) *Gráfico da corrente*

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

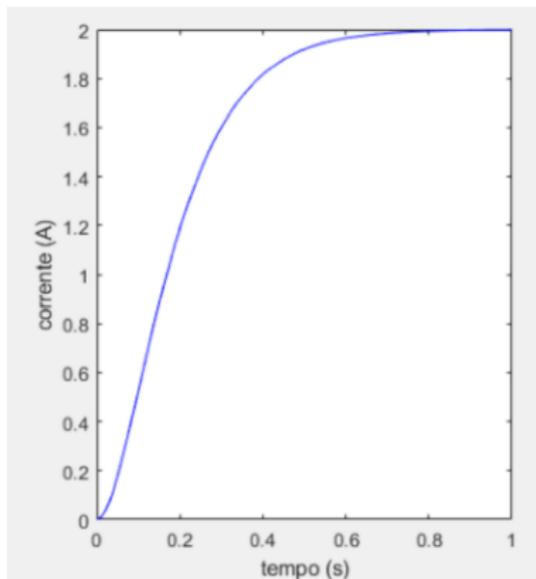
Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

## c) Gráfico da corrente



Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

Capacitância é um parâmetro de circuito utilizado para descrever um capacitor

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

Capacitância é um parâmetro de circuito utilizado para descrever um capacitor

- Embora a aplicação de uma tensão aos terminais do capacitor não o faça conduzir cargas através de seu dielétrico, ela pode produzir pequenos deslocamentos de uma carga dentro dele

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

Capacitância é um parâmetro de circuito utilizado para descrever um capacitor

- Embora a aplicação de uma tensão aos terminais do capacitor não o faça conduzir cargas através de seu dielétrico, ela pode produzir pequenos deslocamentos de uma carga dentro dele
- À medida que a **tensão varia com o tempo**, esse **deslocamento também varia** com o tempo, provocando a denominada **corrente de deslocamento**

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

Capacitância é um parâmetro de circuito utilizado para descrever um capacitor

- Embora a aplicação de uma tensão aos terminais do capacitor não o faça conduzir cargas através de seu dielétrico, ela pode produzir pequenos deslocamentos de uma carga dentro dele
- À medida que a **tensão varia com o tempo**, esse **deslocamento também varia** com o tempo, provocando a denominada **corrente de deslocamento**
- Nos terminais, a *corrente de deslocamento é indistinguível de uma corrente de condução*

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

A relação corrente-tensão é dada por:

$$i = C \frac{dv}{dt}$$

onde:

$v$  é medida em volts

$C$  em farads

$i$  em ampères

$t$  em segundos

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

A relação corrente-tensão é dada por:

$$i = C \frac{dv}{dt}$$

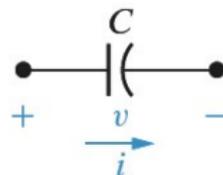
onde:

$v$  é medida em volts

$C$  em farads

$i$  em ampères

$t$  em segundos



- Sinal: **convenção passiva**

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

A relação corrente-tensão é dada por:

$$i = C \frac{dv}{dt}$$

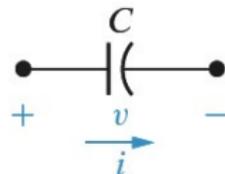
onde:

$v$  é medida em volts

$C$  em farads

$i$  em ampères

$t$  em segundos



- Sinal: **convenção passiva**
- A referência de corrente está na direção da queda de tensão no capacitor

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

A relação corrente-tensão é dada por:

$$i = C \frac{dv}{dt}$$

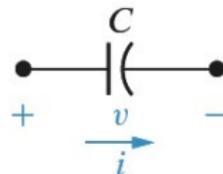
onde:

$v$  é medida em volts

$C$  em farads

$i$  em ampères

$t$  em segundos



- Sinal: **convenção passiva**
- A referência de corrente está na direção da queda de tensão no capacitor
- Se a referência de corrente estiver na direção da elevação de tensão, a equação é escrita com um sinal negativo

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

$$i = C \frac{dv}{dt}$$

- A corrente nos terminais de um capacitor é **proporcional à variação temporal da tensão** no capacitor

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

$$i = C \frac{dv}{dt}$$

- A corrente nos terminais de um capacitor é **proporcional à variação temporal da tensão** no capacitor
- Deste modo:
  - 1 Se  $v$  é constante,  $i = 0$ : capacitor se comporta como um circuito aberto

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

$$i = C \frac{dv}{dt}$$

- A corrente nos terminais de um capacitor é **proporcional à variação temporal da tensão** no capacitor
- Deste modo:
  - 1 Se  $v$  é constante,  $i = 0$ : capacitor se comporta como um circuito aberto
  - 2 Se  $v$  variar instantaneamente no capacitor,  $i = \infty$ : não é possível fisicamente

É também desejável poder expressar a tensão em função da corrente

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

É também desejável poder expressar a tensão em função da corrente

Relação tensão-corrente em um capacitor:

$$i = C \frac{dv}{dt}$$

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

É também desejável poder expressar a tensão em função da corrente

Relação tensão-corrente em um capacitor:

$$i = C \frac{dv}{dt}$$

$$idt = Cdv$$

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

É também desejável poder expressar a tensão em função da corrente

Relação tensão-corrente em um capacitor:

$$i = C \frac{dv}{dt}$$

$$idt = Cdv$$

$$\int_{v(t_0)}^{v(t)} dx = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t id\tau$$

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

É também desejável poder expressar a tensão em função da corrente

Relação tensão-corrente em um capacitor:

$$i = C \frac{dv}{dt}$$

$$idt = Cdv$$

$$\int_{v(t_0)}^{v(t)} dx = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t id\tau$$

$$v(t) = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t id\tau + v(t_0)$$

em que  $v(t)$  é a tensão correspondente a  $t$  e  $v(t_0)$  é o valor da tensão do capacitor quando iniciamos a integração, a saber, em  $t_0$

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

É também desejável poder expressar a tensão em função da corrente

Relação tensão-corrente em um capacitor:

$$i = C \frac{dv}{dt}$$

$$idt = Cdv$$

$$\int_{v(t_0)}^{v(t)} dx = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t id\tau$$

$$v(t) = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t id\tau + v(t_0)$$

em que  $v(t)$  é a tensão correspondente a  $t$  e  $v(t_0)$  é o valor da tensão do capacitor quando iniciamos a integração, a saber, em  $t_0$

Em muitas aplicações práticas,  $t_0 = 0$ , logo:

$$v(t) = \frac{1}{C} \int_0^t id\tau + v(0)$$

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

Assim como combinações de resistores em série e em paralelo podem ser **reduzidas a um único resistor equivalente**,

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

Assim como combinações de resistores em série e em paralelo podem ser **reduzidas a um único resistor equivalente**, as combinações de **indutores ou capacitores em série e em paralelo** podem ser reduzidas a um único indutor ou capacitor

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

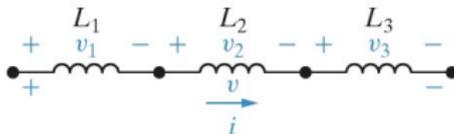
Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

Assim como combinações de resistores em série e em paralelo podem ser **reduzidas a um único resistor equivalente**, as combinações de **indutores ou capacitores em série e em paralelo** podem ser reduzidas a um único indutor ou capacitor



- Os indutores são forçados a conduzir a mesma corrente; assim, definimos somente **uma corrente para a combinação em série**

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

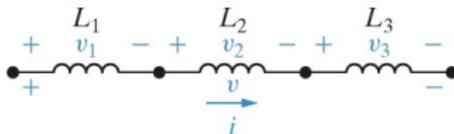
Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

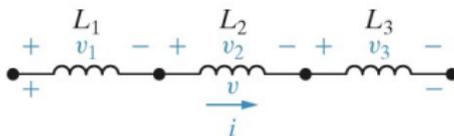
Referências

Assim como combinações de resistores em série e em paralelo podem ser **reduzidas a um único resistor equivalente**, as combinações de **indutores ou capacitores em série e em paralelo** podem ser reduzidas a um único indutor ou capacitor



- Os indutores são forçados a conduzir a mesma corrente; assim, definimos somente **uma corrente para a combinação em série**
- As **quedas de tensão** nos indutores individuais são:

$$v_1 = L_1 \frac{di}{dt}, \quad v_2 = L_2 \frac{di}{dt} \quad e \quad v_3 = L_3 \frac{di}{dt}.$$



- A **tensão** nos terminais da **ligação em série** é:

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

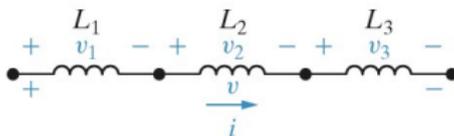
Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências



- A **tensão** nos terminais da **ligação em série** é:

$$v = v_1 + v_2 + v_3 = (L_1 + L_2 + L_3) \frac{di}{dt},$$

do que deve ficar evidente que

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

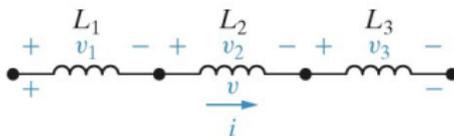
Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências



- A **tensão** nos terminais da **ligação em série** é:

$$v = v_1 + v_2 + v_3 = (L_1 + L_2 + L_3) \frac{di}{dt},$$

do que deve ficar evidente que a **indutância equivalente de indutores ligados em série é a soma das indutâncias individuais**

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

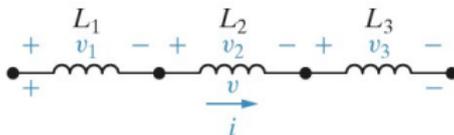
Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências



- A **tensão** nos terminais da **ligação em série** é:

$$v = v_1 + v_2 + v_3 = (L_1 + L_2 + L_3) \frac{di}{dt},$$

do que deve ficar evidente que a **indutância equivalente de indutores ligados em série é a soma das indutâncias individuais**

- Para  $n$  indutores em série:

$$L_{\text{eq}} = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n.$$

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

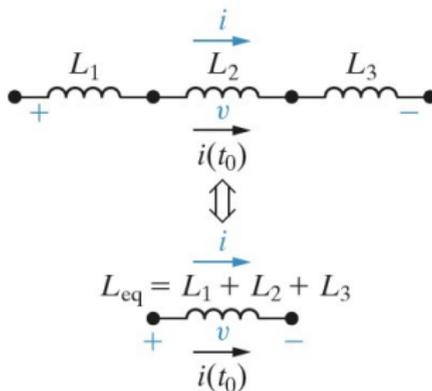
Material Complementar

Próxima Aula

Referências

Se os indutores originais conduzirem uma corrente inicial,  $i(t_0)$ , o indutor equivalente conduzirá a mesma corrente inicial:

**Figura 6.14** Circuito equivalente para indutores em série que transportam uma corrente inicial  $i(t_0)$ .



Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor  
Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância  
Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

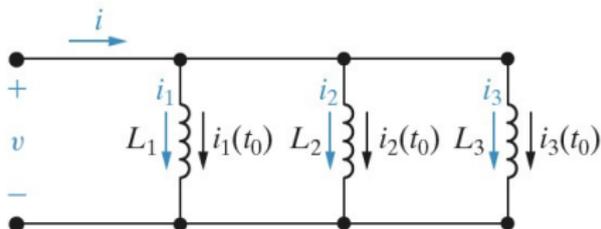
Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências



- Indutores em paralelo têm a **mesma tensão terminal**

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor  
Capacitor

Combinações série e paralelo

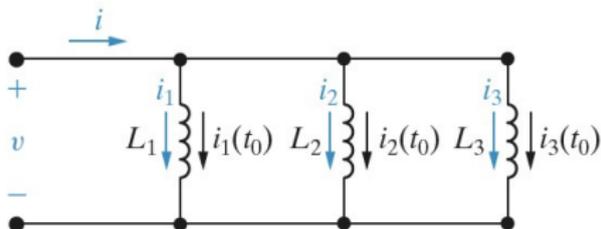
Indutância  
Capacitância

Atividade proposta

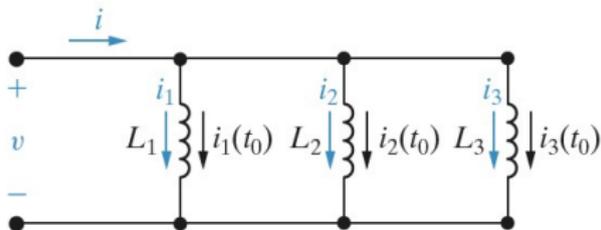
Material Complementar

Próxima Aula

Referências



- Indutores em paralelo têm a **mesma tensão terminal**
- No circuito equivalente, a **corrente** em cada indutor é função da:
  - 1 tensão terminal
  - 2 corrente inicial no indutor



- Para os três indutores em paralelo mostrados na figura, as **correntes para os indutores individuais** são:

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor  
Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

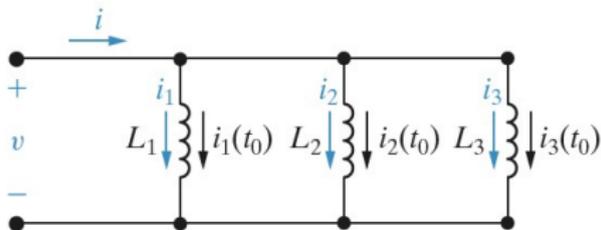
Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências



- Para os três indutores em paralelo mostrados na figura, as **correntes para os indutores individuais** são:

$$i_1 = \frac{1}{L_1} \int_{t_0}^t v \, d\tau + i_1(t_0),$$

$$i_2 = \frac{1}{L_2} \int_{t_0}^t v \, d\tau + i_2(t_0),$$

$$i_3 = \frac{1}{L_3} \int_{t_0}^t v \, d\tau + i_3(t_0).$$

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor  
Capacitor

Combinações  
série e paralelo

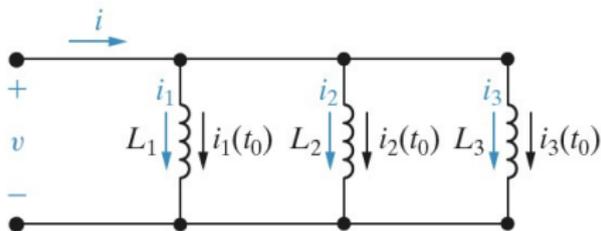
Indutância  
Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências



- A corrente nos terminais dos três indutores em paralelo é a soma das correntes dos indutores:

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

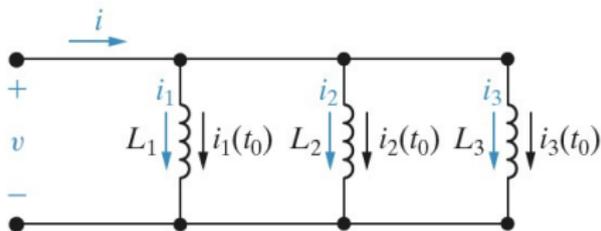
Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências



- A corrente nos terminais dos três indutores em paralelo é a soma das correntes dos indutores:

$$i = i_1 + i_2 + i_3$$

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

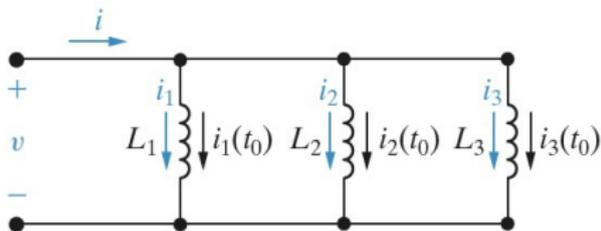
Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências



- A corrente nos terminais dos três indutores em paralelo é a soma das correntes dos indutores:

$$i = i_1 + i_2 + i_3$$

$$i = \left( \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} \right) \int_{t_0}^t v \, d\tau + i_1(t_0) + i_2(t_0) + i_3(t_0)$$

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

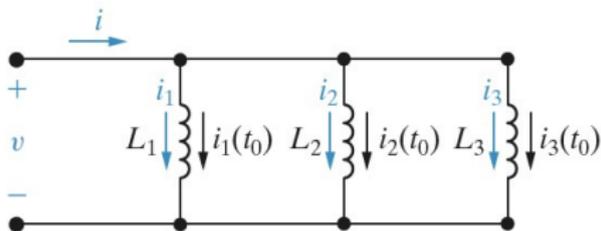
Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências



- A corrente nos terminais dos três indutores em paralelo é a soma das correntes dos indutores:

$$i = i_1 + i_2 + i_3$$

$$i = \left( \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} \right) \int_{t_0}^t v \, d\tau + i_1(t_0) + i_2(t_0) + i_3(t_0)$$

$$i = \frac{1}{L_{eq}} \int_{t_0}^t v \, d\tau + i(t_0)$$

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

Portanto, para  $n$  indutores em paralelo:

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

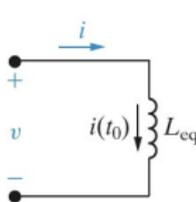
Referências

Portanto, para  $n$  indutores em paralelo:

$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}$$

$$i(t_0) = i_1(t_0) + i_2(t_0) + i_3(t_0).$$

**Figura 6.16** Circuito equivalente para os três indutores em paralelo.



$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}$$

$$i(t_0) = i_1(t_0) + i_2(t_0) + i_3(t_0)$$

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

## Exemplo 3: Combinar indutores em série e em paralelo para formar um único indutor equivalente

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

6.4 Os valores iniciais de  $i_1$  e  $i_2$  no circuito mostrado são  $+3$  A e  $-5$  A, respectivamente. A tensão nos terminais dos indutores em paralelo para  $t \geq 0$  é  $-30e^{-5t}$  mV.

- Se os indutores em paralelo forem substituídos por um único indutor, qual será sua indutância?
- Qual é a corrente inicial e sua direção de referência no indutor equivalente?
- Use o indutor equivalente para determinar  $i(t)$ .
- Determine  $i_1(t)$  e  $i_2(t)$ . Verifique se as soluções para  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$  e  $i(t)$  satisfazem a lei das correntes de Kirchhoff.

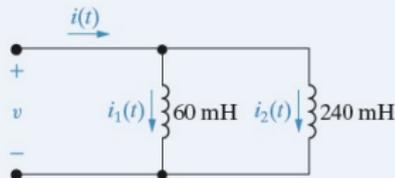
Resposta: (a) 48 mH;

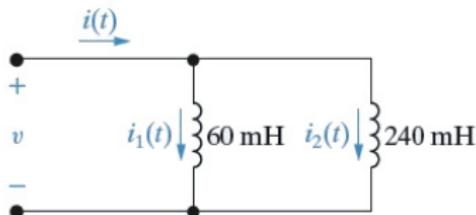
(b) 2 A, para cima;

(c)  $0,125e^{-5t} - 2,125$  A,  $t \geq 0$ ;

(d)  $i_1(t) = 0,1e^{-5t} + 2,9$  A,  $t \geq 0$ ,

$i_2(t) = 0,025e^{-5t} - 5,025$  A,  $t \geq 0$ .





Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

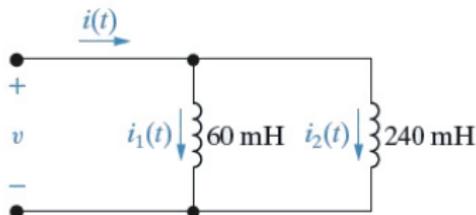
Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências



a) *Indutor equivalente*

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

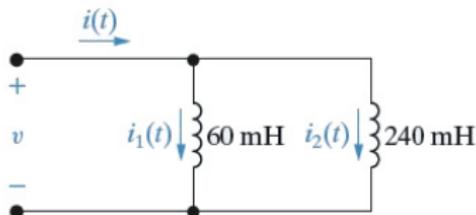
Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências



a) *Indutor equivalente*

$$L_{eq} = \frac{60(240)}{60 + 240} = 48 \text{ mH}$$

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor  
Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

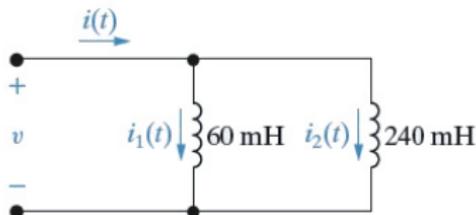
Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências



a) *Indutor equivalente*

$$L_{eq} = \frac{60(240)}{60 + 240} = 48 \text{ mH}$$

b) *Corrente inicial no Indutor equivalente*

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor  
Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

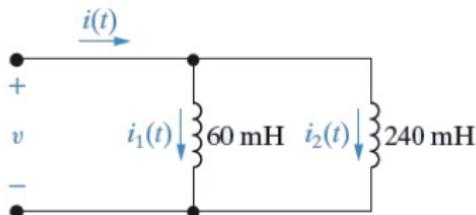
Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências



a) *Indutor equivalente*

$$L_{eq} = \frac{60(240)}{60 + 240} = 48 \text{ mH}$$

b) *Corrente inicial no Indutor equivalente*

$$i(0^+) = 3 + (-5) = -2 \text{ A para baixo, ou seja, 2 A para cima}$$

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor  
Capacitor

Combinações  
série e paralelo

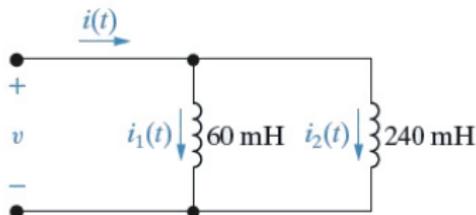
Indutância  
Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências



a) *Indutor equivalente*

$$L_{eq} = \frac{60(240)}{60 + 240} = 48 \text{ mH}$$

b) *Corrente inicial no Indutor equivalente*

$$i(0^+) = 3 + (-5) = -2 \text{ A para baixo, ou seja, 2 A para cima}$$

c)  *$i(t)$*

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor  
Capacitor

Combinações  
série e paralelo

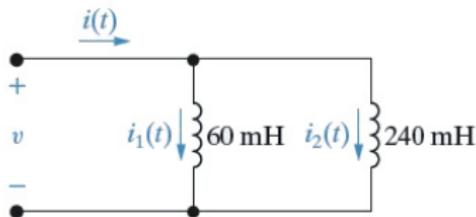
Indutância  
Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências



a) *Indutor equivalente*

$$L_{eq} = \frac{60(240)}{60 + 240} = 48 \text{ mH}$$

b) *Corrente inicial no Indutor equivalente*

$$i(0^+) = 3 + (-5) = -2 \text{ A para baixo, ou seja, 2 A para cima}$$

c)  $i(t)$

$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{1}{L_{eq}} \int_{0^+}^t v(t) dt + I_i = \frac{1000}{48} \int_0^t -0.03e^{-5t} dt - 2 \\ &= \frac{125}{6} \int_0^t -0.03e^{-5t} dt - 2 = 0.125e^{-5t} - 2 \text{ A} \end{aligned}$$

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

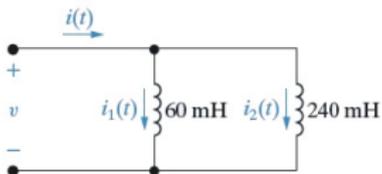
Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências



**d)**  $i_1(t)$  e  $i_2(t)$

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

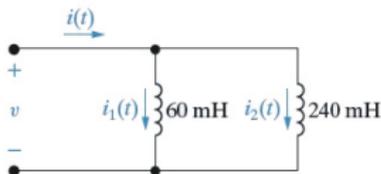
Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências



**d)**  $i_1(t)$  e  $i_2(t)$

$$\begin{aligned}
 i_1(t) &= \frac{1}{L_1} \int_{0^+}^t v(t) dt + I_{1i} = \frac{1000}{60} \int_0^t -0.03e^{-5t} dt + 3 \\
 &= \frac{50}{3} \int_0^t -0.03e^{-5t} dt + 3 = 0.1e^{-5t} + 2.9 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

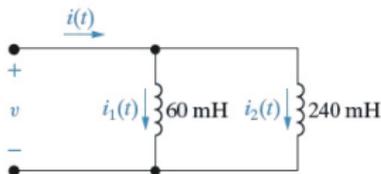
Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências



d)  $i_1(t)$  e  $i_2(t)$

$$\begin{aligned}
 i_1(t) &= \frac{1}{L_1} \int_{0^+}^t v(t) dt + I_{1i} = \frac{1000}{60} \int_0^t -0.03e^{-5t} dt + 3 \\
 &= \frac{50}{3} \int_0^t -0.03e^{-5t} dt + 3 = 0.1e^{-5t} + 2.9 \text{ A}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 i_2(t) &= \frac{1}{L_2} \int_{0^+}^t v(t) dt + I_{2i} = \frac{1000}{240} \int_0^t -0.03e^{-5t} dt - 5 \\
 &= \frac{25}{6} \int_0^t -0.03e^{-5t} dt - 5 = 0.025e^{-5t} - 5.025 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

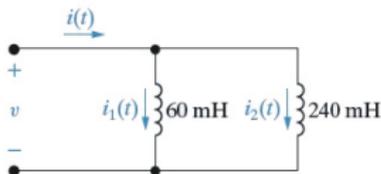
Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências



d)  $i_1(t)$  e  $i_2(t)$

$$\begin{aligned} i_1(t) &= \frac{1}{L_1} \int_{0^+}^t v(t) dt + I_{1i} = \frac{1000}{60} \int_0^t -0.03e^{-5t} dt + 3 \\ &= \frac{50}{3} \int_0^t -0.03e^{-5t} dt + 3 = 0.1e^{-5t} + 2.9 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_2(t) &= \frac{1}{L_2} \int_{0^+}^t v(t) dt + I_{2i} = \frac{1000}{240} \int_0^t -0.03e^{-5t} dt - 5 \\ &= \frac{25}{6} \int_0^t -0.03e^{-5t} dt - 5 = 0.025e^{-5t} - 5.025 \text{ A} \end{aligned}$$

$$i_1 + i_2 = i$$

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

- Capacitores ligados em série podem ser reduzidos a um **único capacitor equivalente**

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

- Capacitores ligados em série podem ser reduzidos a um **único capacitor equivalente**
- A recíproca da capacitância equivalente é igual à soma das recíprocas das capacitâncias individuais

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

# Combinação série de capacitores

- Capacitores ligados em série podem ser reduzidos a um **único capacitor equivalente**
- A recíproca da capacitância equivalente é igual à soma das recíprocas das capacitâncias individuais
- Se cada capacitor apresentar a própria tensão inicial, a **tensão inicial no capacitor equivalente** será a **soma algébrica das tensões iniciais nos capacitores individuais**

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

- Capacitores ligados em série podem ser reduzidos a um **único capacitor equivalente**
- A recíproca da capacitância equivalente é igual à soma das recíprocas das capacitâncias individuais
- Se cada capacitor apresentar a própria tensão inicial, a **tensão inicial no capacitor equivalente** será a **soma algébrica das tensões iniciais nos capacitores individuais**

Combinação de capacitores em série:

$$\frac{1}{C_{\text{eq}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n},$$

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor  
Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância  
Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

- Capacitores ligados em série podem ser reduzidos a um **único capacitor equivalente**
- A recíproca da capacitância equivalente é igual à soma das recíprocas das capacitâncias individuais
- Se cada capacitor apresentar a própria tensão inicial, a **tensão inicial no capacitor equivalente** será a **soma algébrica das tensões iniciais nos capacitores individuais**

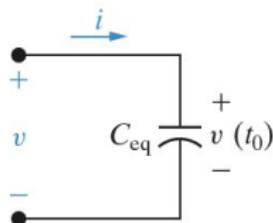
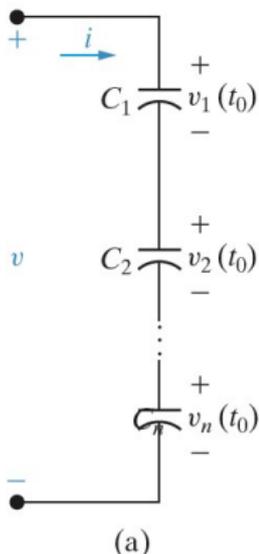
Combinação de capacitores em série:

$$\frac{1}{C_{\text{eq}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \cdots + \frac{1}{C_n},$$

Tensão inicial da capacitância equivalente:

$$v(t_0) = v_1(t_0) + v_2(t_0) + \cdots + v_n(t_0).$$

**Figura 6.17** Circuito equivalente para capacitores ligados em série. (a) Capacitores em série. (b) Circuito equivalente.



$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

$$v(t_0) = v_1(t_0) + v_2(t_0) + \dots + v_n(t_0)$$

(a)

(b)

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor  
Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância  
Capacitância

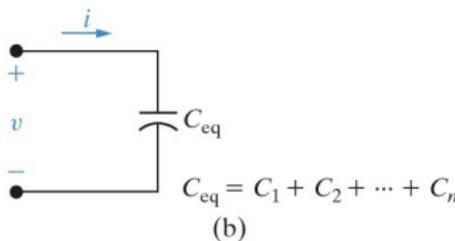
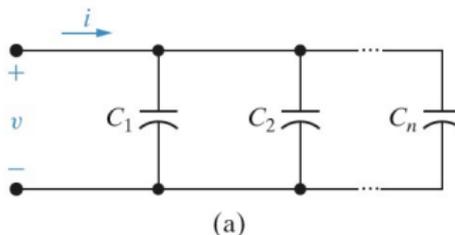
Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

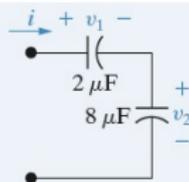
**Figura 6.18** Circuito equivalente para capacitores ligados em paralelo. (a) Capacitores em paralelo. (b) Circuito equivalente.



## Exemplo 4:

6.5 A corrente nos terminais dos dois capacitores mostrados é  $240e^{-10t} \mu\text{A}$  para  $t \geq 0$ . Os valores iniciais de  $v_1$  e  $v_2$  são  $-10 \text{ V}$  e  $-5 \text{ V}$ , respectivamente. Calcule a energia total armazenada nos capacitores à medida que  $t \rightarrow \infty$ . (*Sugestão*: não combine os capacitores em série – determine a energia armazenada em cada um para, então, somá-las.)

Resposta:  $20 \mu\text{J}$ .



Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

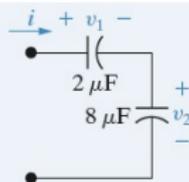
Próxima Aula

Referências

## Exemplo 4:

6.5 A corrente nos terminais dos dois capacitores mostrados é  $240e^{-10t}\mu\text{A}$  para  $t \geq 0$ . Os valores iniciais de  $v_1$  e  $v_2$  são  $-10\text{ V}$  e  $-5\text{ V}$ , respectivamente. Calcule a energia total armazenada nos capacitores à medida que  $t \rightarrow \infty$ . (Sugestão: não combine os capacitores em série – determine a energia armazenada em cada um para, então, somá-las.)

Resposta:  $20\mu\text{J}$ .



$$\begin{aligned}
 v_1(t) &= \frac{1}{C_1} \int_{0+}^t i(t) dt + V_{1i} = 0.5 \times 10^6 \int_{0+}^t 240 \times 10^{-6} e^{-10t} dt - 10 \\
 &= -12e^{-10t} + 2\text{ V} \implies v_1(\infty) = 2\text{ V}
 \end{aligned}$$

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

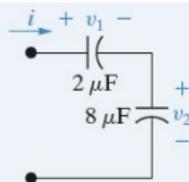
Próxima Aula

Referências

## Exemplo 4:

6.5 A corrente nos terminais dos dois capacitores mostrados é  $240e^{-10t}\mu\text{A}$  para  $t \geq 0$ . Os valores iniciais de  $v_1$  e  $v_2$  são  $-10\text{ V}$  e  $-5\text{ V}$ , respectivamente. Calcule a energia total armazenada nos capacitores à medida que  $t \rightarrow \infty$ . (Sugestão: não combine os capacitores em série – determine a energia armazenada em cada um para, então, somá-las.)

Resposta:  $20\mu\text{J}$ .



$$v_1(t) = \frac{1}{C_1} \int_{0+}^t i(t) dt + V_{1i} = 0.5 \times 10^6 \int_{0+}^t 240 \times 10^{-6} e^{-10t} dt - 10$$

$$= -12e^{-10t} + 2\text{ V} \implies v_1(\infty) = 2\text{ V}$$

$$v_2(t) = \frac{1}{C_2} \int_{0+}^t i(t) dt + V_{2i} = 0.125 \times 10^6 \int_{0+}^t 240 \times 10^{-6} e^{-10t} dt - 5$$

$$= -3e^{-10t} - 2\text{ V} \implies v_2(\infty) = -2\text{ V}$$

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

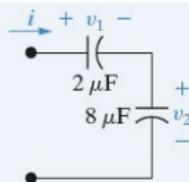
Próxima Aula

Referências

## Exemplo 4:

6.5 A corrente nos terminais dos dois capacitores mostrados é  $240e^{-10t} \mu\text{A}$  para  $t \geq 0$ . Os valores iniciais de  $v_1$  e  $v_2$  são  $-10 \text{ V}$  e  $-5 \text{ V}$ , respectivamente. Calcule a energia total armazenada nos capacitores à medida que  $t \rightarrow \infty$ . (Sugestão: não combine os capacitores em série – determine a energia armazenada em cada um para, então, somá-las.)

Resposta:  $20 \mu\text{J}$ .



$$v_1(t) = \frac{1}{C_1} \int_{0+}^t i(t) dt + V_{1i} = 0.5 \times 10^6 \int_{0+}^t 240 \times 10^{-6} e^{-10t} dt - 10$$

$$= -12e^{-10t} + 2 \text{ V} \implies v_1(\infty) = 2 \text{ V}$$

$$v_2(t) = \frac{1}{C_2} \int_{0+}^t i(t) dt + V_{2i} = 0.125 \times 10^6 \int_{0+}^t 240 \times 10^{-6} e^{-10t} dt - 5$$

$$= -3e^{-10t} - 2 \text{ V} \implies v_2(\infty) = -2 \text{ V}$$

$$W = \frac{C_1 v_1^2(\infty)}{2} + \frac{C_2 v_2^2(\infty)}{2} = \frac{2 \times 10^{-6} (2)^2}{2} + \frac{8 \times 10^{-6} (-2)^2}{2} = 20 \mu\text{J}$$

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

## Exercício proposto 1: *Determinação da corrente, tensão, potência e energia para um capacitor*

**EXEMPLO 6.4** Determinação da corrente, tensão, potência e energia para um capacitor.

O pulso de tensão descrito pelas equações a seguir está aplicado nos terminais de um capacitor de  $0,5 \mu\text{F}$ :

$$v(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \text{ s}; \\ 4t \text{ V}, & 0 \text{ s} \leq t \leq 1 \text{ s}; \\ 4e^{-(t-1)} \text{ V}, & t \geq 1 \text{ s}. \end{cases}$$

- Deduzas as expressões para a corrente, potência e energia do capacitor.
- Faça os gráficos da tensão, corrente, potência e energia em função do tempo. Alinhe os gráficos na vertical.
- Especifique o intervalo de tempo em que energia está sendo armazenada no capacitor.
- Especifique o intervalo de tempo em que energia está sendo fornecida pelo capacitor.
- Avalie as integrais

$$\int_0^1 p \, dt \quad \text{e} \quad \int_1^{\infty} p \, dt$$

e comente seus significados.

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

**Atividade proposta**

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

## b) Determinação da corrente, tensão, potência e energia para um capacitor

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor  
Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância  
Capacitância

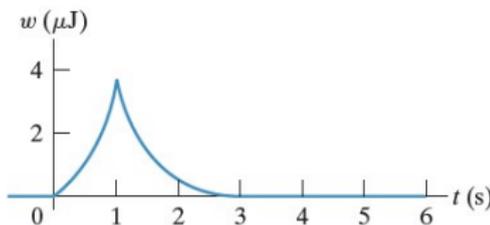
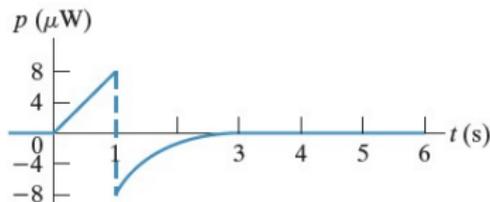
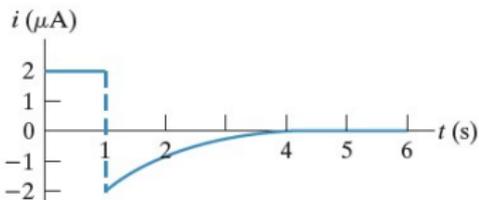
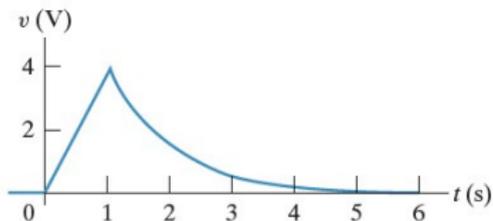
Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

**Figura** Variáveis  $v$ ,  $i$ ,  $p$  e  $w$  versus  $t$  para o Exemplo



Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

**Atividade proposta**

Material Complementar

Próxima Aula

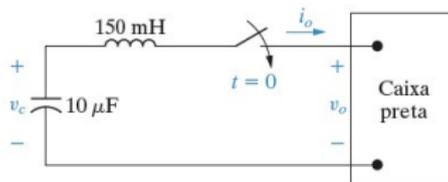
Referências

Em  $t = 0$ , um capacitor e um indutor ligados em série são ligados aos terminais de uma caixa preta, como mostra a Figura P6.34. Para  $t > 0$ , sabe-se que

$$i_o = 200e^{-800t} - 40e^{-200t} \text{ mA.}$$

Se  $v_c(0) = 5 \text{ V}$ , determine  $v_o$  para  $t \geq 0$ .

Figura P6.34



**Tabela 6.1** Equações terminais para indutores e capacitores ideais.

## Indutores

$$v = L \frac{di}{dt} \quad (\text{V})$$

$$i = \frac{1}{L} \int_{t_0}^t v \, d\tau + i(t_0) \quad (\text{A})$$

$$p = vi = Li \frac{di}{dt} \quad (\text{W})$$

$$w = \frac{1}{2} Li^2 \quad (\text{J})$$

## Capacitores

$$v = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i \, d\tau + v(t_0) \quad (\text{V})$$

$$i = C \frac{dv}{dt} \quad (\text{A})$$

$$p = vi = Cv \frac{dv}{dt} \quad (\text{W})$$

$$w = \frac{1}{2} Cv^2 \quad (\text{J})$$

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor  
Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância  
Capacitância

Atividade  
proposta

**Material  
Complementar**

Próxima Aula

Referências

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

**Material Complementar**

Próxima Aula

Referências

**Tabela 6.2** Equações para indutores e capacitores ligados em série e em paralelo.

### Ligados em série

$$L_{\text{eq}} = L_1 + L_2 + \dots + L_n$$

$$\frac{1}{C_{\text{eq}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

### Ligados em paralelo

$$\frac{1}{L_{\text{eq}}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n}$$

$$C_{\text{eq}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor  
Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância  
Capacitância

Atividade  
proposta

**Material  
Complementar**

Próxima Aula

Referências

- Capítulo 6 (ALEXANDER; SADIKU, 2013)
- Capítulo 6 (NILSSON; RIEDEL, 2016)

## Perspectiva prática

### Telas *touch* capacitivas

A perspectiva prática no Capítulo 3 mostrou como uma malha de resistores é usada para criar uma tela *touch* (de toque) para um telefone ou monitor de computador. Mas as telas de toque resistivo têm algumas limitações, a mais importante é que só podem processar um único toque em qualquer instante no tempo (veja o Problema 3.75). Por exemplo, uma tela sensível ao toque não pode processar o gesto de *pinch* (pinça) utilizado por muitos dispositivos para ampliar ou diminuir a imagem na tela.

Telas *multitouch* (múltiplos toques) usam um componente diferente no interior de uma malha abaixo da tela – os capacitores. Como você está prestes a descobrir neste capítulo, um capacitor é um elemento de circuito cujas características terminais são determinadas por campos elétricos. Ao tocar uma tela *touch* capacitiva, você produz uma alteração no valor de um capacitor, provocando uma mudança de tensão. Após apresentarmos o comportamento básico de capacitores e o modo como eles combinam em série e em paralelo, vamos mostrar dois modelos possíveis para uma tela de múltiplos toques utilizando uma malha de capacitores. Esses projetos são apresentados no exemplo da *Perspectiva prática* no final deste capítulo.

A Seção 6.3 descreve técnicas utilizadas para simplificar circuitos com combinações de capacitores ou indutores em série ou em paralelo.

A energia pode ser armazenada tanto no campo magnético quanto no elétrico. Consequentemente, não é nenhuma surpresa saber que indutores e capacitores são capazes de armazenar energia. Por exemplo, a energia pode ser armazenada em um indutor e, então, fornecida para uma vela de ignição. Ela pode ser armazenada em um capacitor e, então, fornecida para acender um *flash* de máquina fotográfica. Em indutores e capacitores ideais, a quantidade de energia por eles fornecida tem de ser igual à energia neles armazenada. Como indutores e capacitores não podem gerar energia, são classificados como **elementos passivos**.

Nas seções 6.4 e 6.5, examinaremos a situação em que dois circuitos estão ligados por um campo magnético e, por isso, são denominados magneticamente acoplados. Nesse caso, a tensão induzida no segundo circuito pode ser relacionada à corrente que varia com o tempo no primeiro circuito por um parâmetro conhecido como **indutância mútua**. O significado prático do acoplamento magnético revela-se ao estudarmos as relações entre corrente, tensão, potência e vários novos parâmetros específicos da indutância mútua. Aqui, apresentaremos essas relações; nos capítulos 9 e 10, descreveremos sua utilidade em um dispositivo denominado transformador.

Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

**Material Complementar**

Próxima Aula

Referências



Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

Supercapacitores: <https://youtu.be/-7T-6XdiRTw>



Cronograma

Objetivos da  
Aula

Introdução

Resposta no  
tempo

Indutor

Capacitor

Combinações  
série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade  
proposta

Material  
Complementar

Próxima Aula

Referências

## 1 Análise de Circuitos Resistivos

## 2 Análise de Circuitos no Domínio do Tempo

- indutor e capacitor
- Respostas Temporais e associação série/paralelo de indutores/capacitores
- **Funções de singularidade: degrau, impulso e rampa**
- Circuitos de 1<sup>a</sup> ordem
- Resposta natural de circuitos RL e RC
- Constante de tempo
- Resposta ao degrau de circuitos RL e RC
- Resposta completa de circuitos RL e RC
- Circuitos de 2<sup>a</sup> ordem
- Condições iniciais e finais para fontes constantes
- Resposta natural: superamortecida, subamortecida criticamente amortecida (RLC)
- Resposta completa de circuitos RLC paralelo
- Resposta completa de circuitos RLC série
- Dualidade
- Chaveamento Sequencial
- Resposta Indefinidamente crescente
- Resposta Impulsiva
- Circuitos de ordem superior

Cronograma

Objetivos da Aula

Introdução

Resposta no tempo

Indutor

Capacitor

Combinações série e paralelo

Indutância

Capacitância

Atividade proposta

Material Complementar

Próxima Aula

Referências

ALEXANDER, Charles K.; SADIKU, Matthew N.O. **Fundamentos de circuitos elétricos**. Tradução: José Lucimar do Nascimento. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

NILSSON, James W; RIEDEL, Susan A. **Circuitos elétricos**. Tradução: Ronaldo Sérgio de Biasi. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

Informações complementares:

- Acessar Sabi:

<https://sabi.ufrgs.br>

- Como acessar ebook pelo SABi:

<https://www.ufrgs.br/bibcln/como-acessar-ebooks-pelo-sabi-windows>