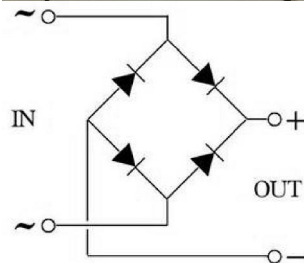


# Retificadores Monofasicos (Parte I)

Professor

Jorge Leonid Aching Samatelo  
[jlasm001@gmail.com](mailto:jlasm001@gmail.com)



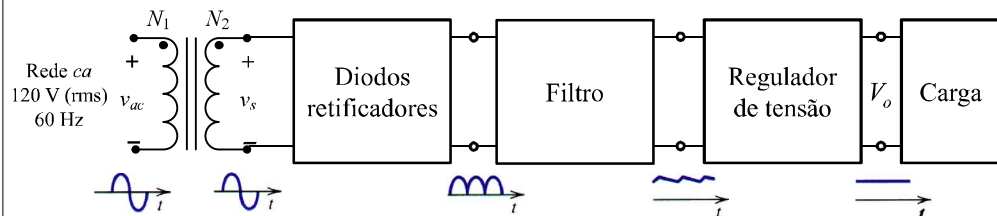
## Introdução a fontes CC

5

## Introdução a fontes CC

### Introdução

- Na seguinte figura e mostrada uma fonte CC:
  - com uma **tensão de entrada CA**: 120 V(rms) a 60Hz.
  - com uma **tensão de saída CC**:  $V_o$  (geralmente na faixa de 5 a 20V).



### Transformador de potência

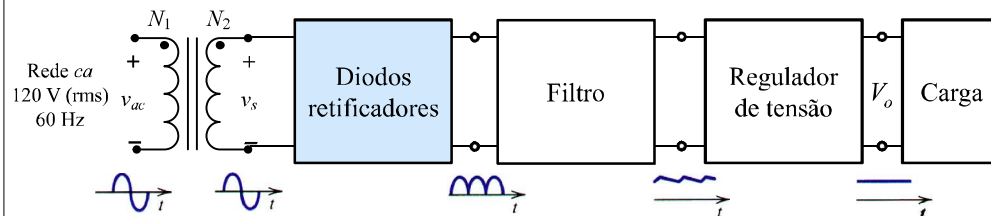
- Reduz a **tensão de entrada** segundo a relação
 
$$v_s = (N_2/N_1)v_{ac} \text{ (Volts rms)}$$
- Onde  $N_1$  e  $N_2$  são o número de enrolamentos no primário e no secundário do transformador.

6

## Introdução a fontes CC

### Introdução

- Na seguinte figura e mostrada uma fonte cc:
  - com uma **tensão de entrada CA**: 120 V(rms) a 60Hz.
  - com uma **tensão de saída CC**:  $V_o$  (geralmente na faixa de 5 a 20V).



### Diodos retificadores

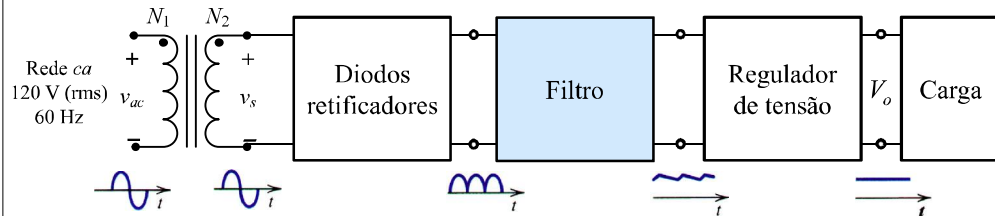
- Converte a tensão sinusoidal de entrada em uma tensão unipolar (unicamente tem ciclos positivos)
- Um parâmetro importante para um diodo de um circuito retificador é:
  - ❖ **Tensão de Pico Inversa (PIV – Pick Inverse Voltage)**
    - Tensão que deve soportar o diodo **sem chegar a região de ruptura**

8

## Introdução a fontes CC

### Introdução

- Na seguinte figura é mostrada uma fonte *cc*:
  - com uma **tensão de entrada CA**: 120 V(*rms*) a 60Hz.
  - com uma **tensão de saída CC**:  $V_o$  (geralmente na faixa de 5 a 20V).



### Filtro

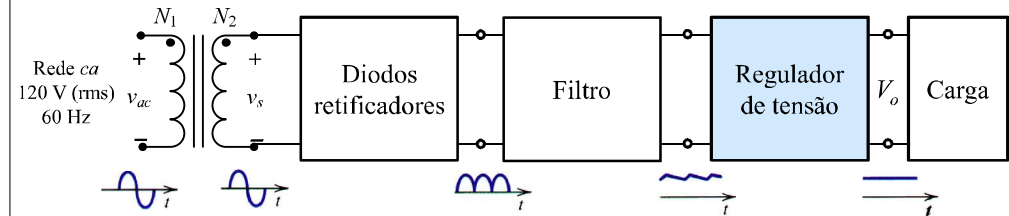
- Filtra a tensão retificada preservando:
  - O componente CC da tensão retificada + ondulação

9

## Introdução a fontes CC

### Introdução

- Na seguinte figura é mostrada uma fonte *cc*:
  - com uma **tensão de entrada CA**: 120 V(*rms*) a 60Hz.
  - com uma **tensão de saída CC**:  $V_o$  (geralmente na faixa de 5 a 20V).



### Regulador

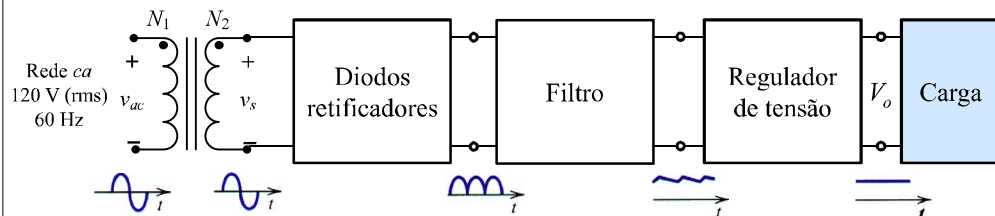
- Preserva o valor da tensão CC e atenua fortemente a ondulação.

10

## Introdução a fontes CC

### Introdução

- Na seguinte figura é mostrada uma fonte *cc*:
  - com uma **tensão de entrada CA**: 120 V(*rms*) a 60Hz.
  - com uma **tensão de saída CC**:  $V_o$  (geralmente na faixa de 5 a 20V).

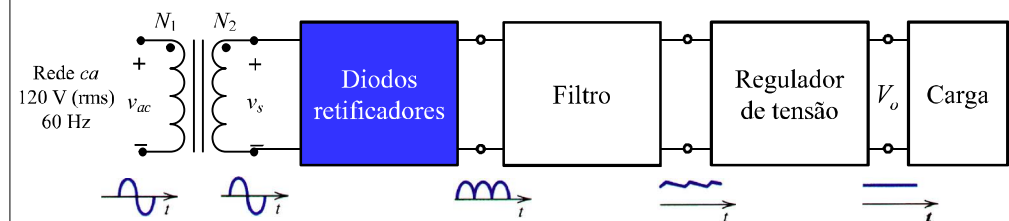


### Carga

- A tensão CC é aplicada a carga.

11

## Retificadores

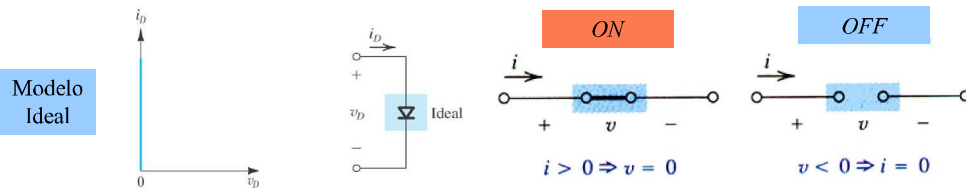


12

# Retificadores

## Método de Análise

- Para determinar as características da tensão de saída gerada por um circuito retificador efetuaremos um análise em **três passos**:
  - **Passo 1.** Determinar a **forma de onda** de saída considerando o **modelo de diodo ideal**. Aqui é necessário ver:
    - ❖ que diodos estão ativos no semiciclo positivo  $[0, T/2]$ .
    - ❖ que diodos estão ativos no semiciclo negativo  $[T/2, T]$ .

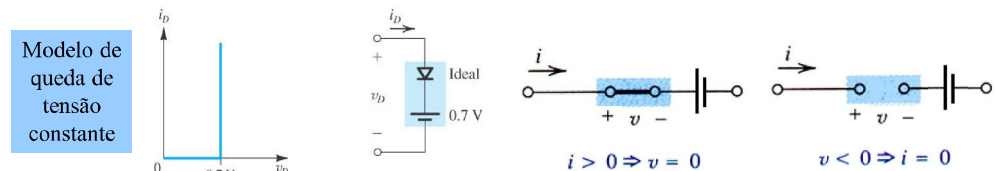


13

# Retificadores

## Método de Análise

- Para determinar as características da tensão de saída gerada por um circuito retificador efetuaremos um análise em **três passos**:
  - **Passo 2.** Determinar o **efeito de queda de tensão nos diodos (tensão térmica dos diodos)**, sendo necessário usar o **modelo de queda de tensão constante do diodo**.

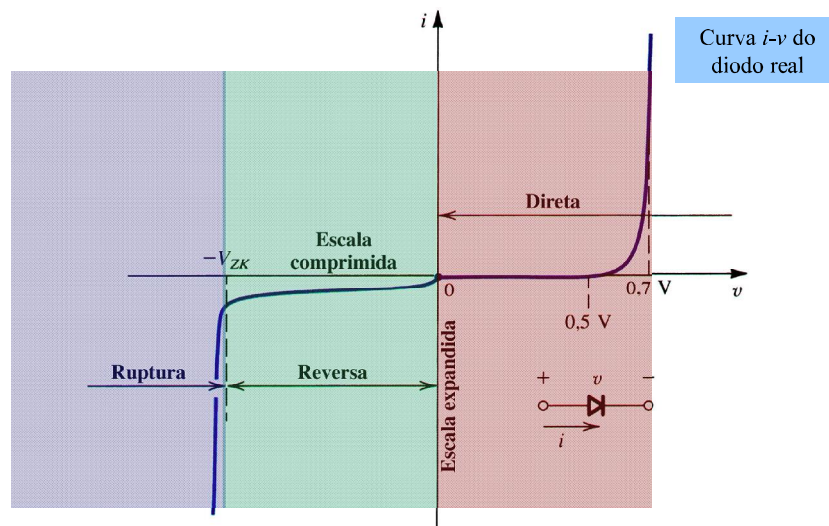


14

# Retificadores

## Método de Análise

- Para determinar as características da tensão de saída gerada por um circuito retificador efetuaremos um análise em **três passos**:
  - **Passo 3.** Determinar **PIV (Tensão de Pico Inversa)**.



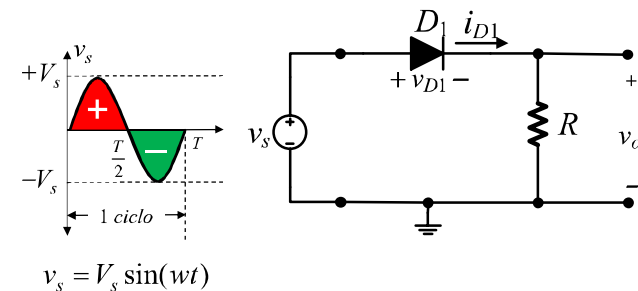
15

# Retificadores

## Retificador de Meia Onda

### Objetivo

- Gera uma **tensão unipolar** usando unicamente os **semiciclos positivos** da senoide de entrada.



16

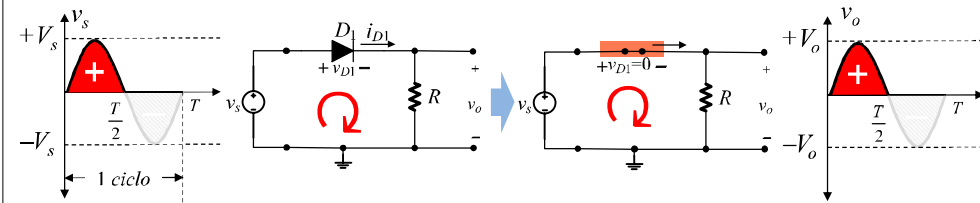
# Retificadores

## Retificador de Meia Onda

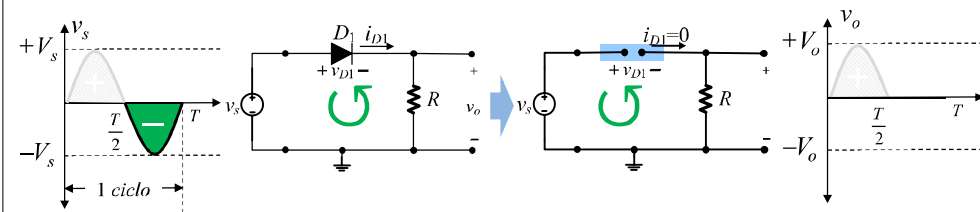
### Forma de Onda de Saída

➤ Considerando o modelo de diodo ideal

❖ Semiciclo positivo  $[0, T/2]$ :  $\Rightarrow D_1 = \text{ON}$ :  $v_{D1} = 0$  e  $i_{D1} > 0$



❖ Semiciclo negativo  $[T/2, T]$ :  $\Rightarrow D_1 = \text{OFF}$ :  $i_{D1} = 0$  e  $v_{D1} < 0$



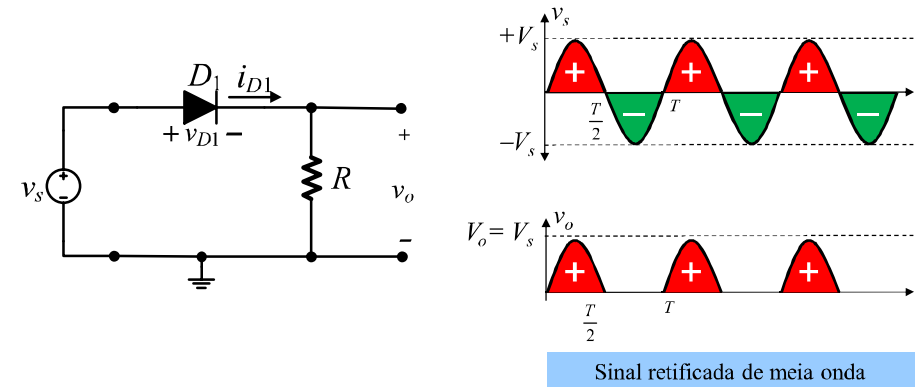
17

# Retificadores

## Retificador de Meia Onda

### Forma de Onda de Saída

➤ Então a forma de onda da saída para um ciclo completo será:



18

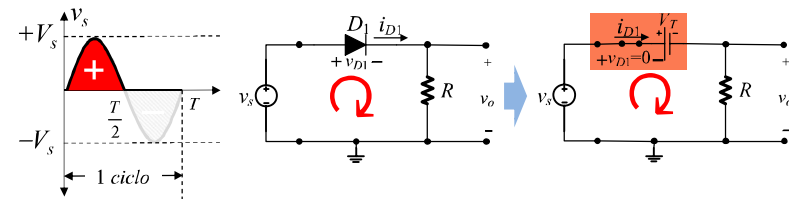
# Retificadores

## Retificador de Meia Onda

### Efeito da queda de tensão direta no diodo

➤ Considerando o modelo de tensão direta  $V_T$  do diodo.

❖ Semiciclo positivo  $[0, T/2]$ :  $\Rightarrow D_1 = \text{ON}$ :  $v_{D1} = 0$  e  $i_{D1} > 0$



❖ Aplicando a lei de malhas de Kirchhoff no circuito, optemos:

$$-v_s + V_T + Ri_{D1} = 0 \Rightarrow i_{D1} = \frac{v_s - V_T}{R} \Rightarrow v_s > V_T$$

❖ No circuito também podemos observar que:

$$v_o = v_s - V_T$$

❖ Por tanto:

$$v_o = v_s - V_T ; v_s > V_T \quad (1)$$

19

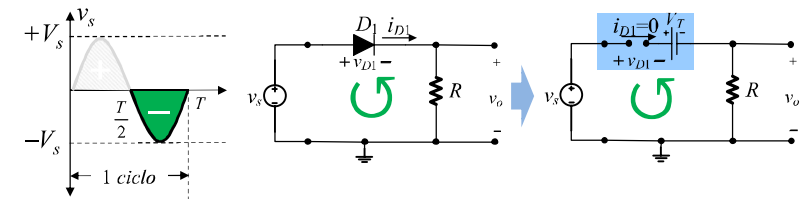
# Retificadores

## Retificador de Meia Onda

### Efeito da queda de tensão direta no diodo

➤ Considerando o modelo de tensão direta  $V_T$  do diodo.

❖ Semiciclo negativo  $[T/2, T]$ :  $\Rightarrow D_1 = \text{OFF}$ :  $i_{D1} = 0$  e  $v_{D1} < 0$



❖ Aplicando a lei de malhas de Kirchhoff no circuito, optemos:

$$-v_s + v_{D1} + V_T = 0 \Rightarrow v_{D1} = v_s - V_T \Rightarrow v_s < V_T$$

❖ No circuito também podemos observar que:

$$v_o = Ri_{D1} = 0 \text{ V}$$

❖ Por tanto:

$$v_o = 0 ; v_s < V_T \quad (2)$$

20

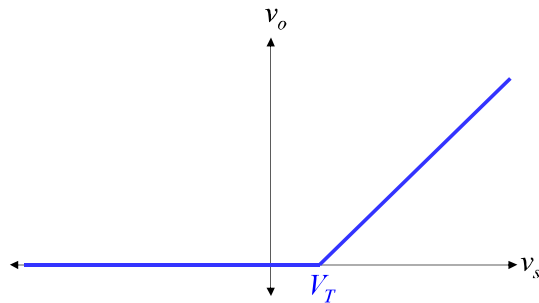
# Retificadores

## Retificador de Meia Onda

### □ Efeito da queda de tensão direta no diodo

➤ De (1) e (2) podemos obter a curva característica  $v_i-v_o$  do retificador de meia onda:

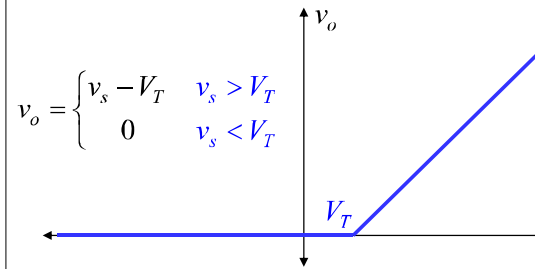
$$v_o = \begin{cases} v_s - V_T & v_s > V_T \\ 0 & v_s < V_T \end{cases}$$



Curva de transferência do retificador de meia onda

21

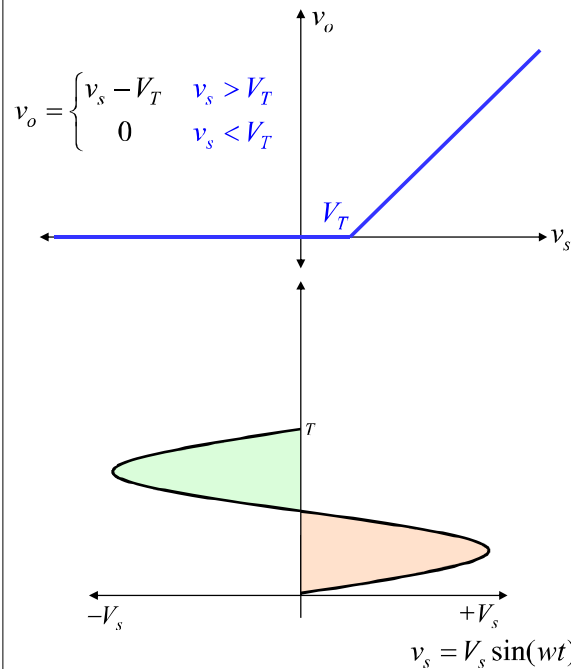
## Efeito de $V_T$ no sinal retificada de meia onda



$$v_o = \begin{cases} v_s - V_T & v_s > V_T \\ 0 & v_s < V_T \end{cases}$$

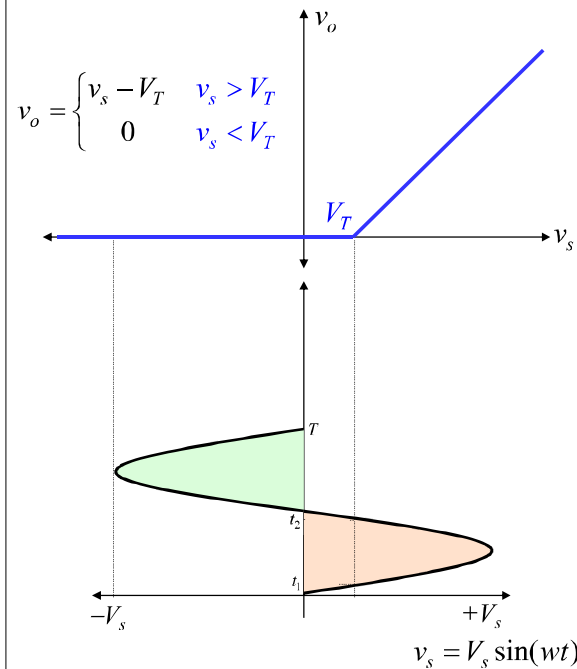
22

## Efeito de $V_T$ no sinal retificada de meia onda



**Passo 1.** Aplicamos a tensão de entrada no eixo das abscissas.

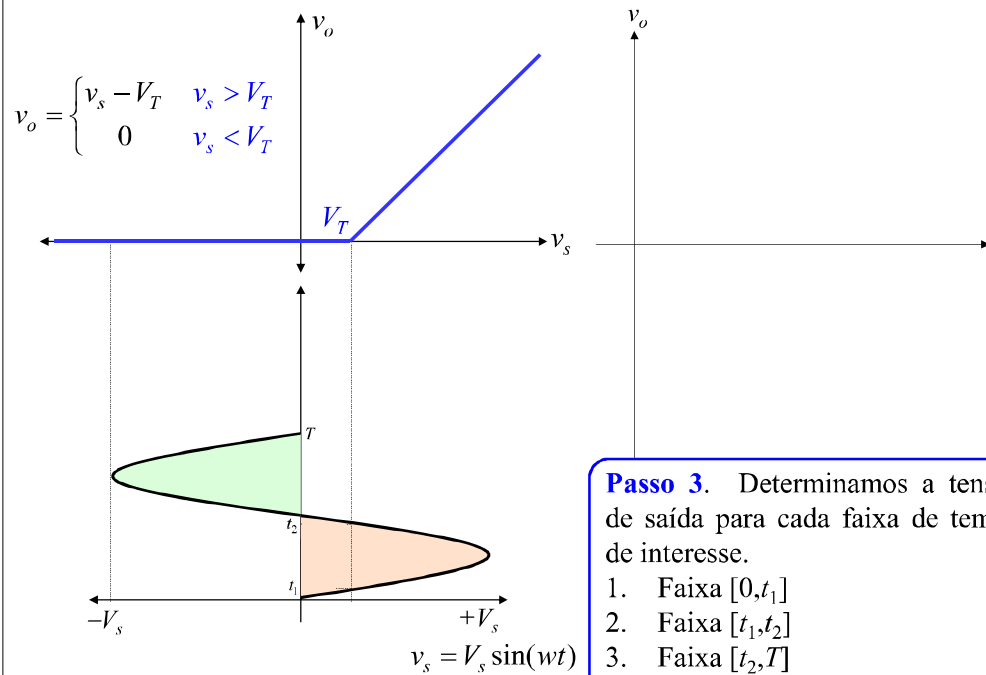
## Efeito de $V_T$ no sinal retificada de meia onda



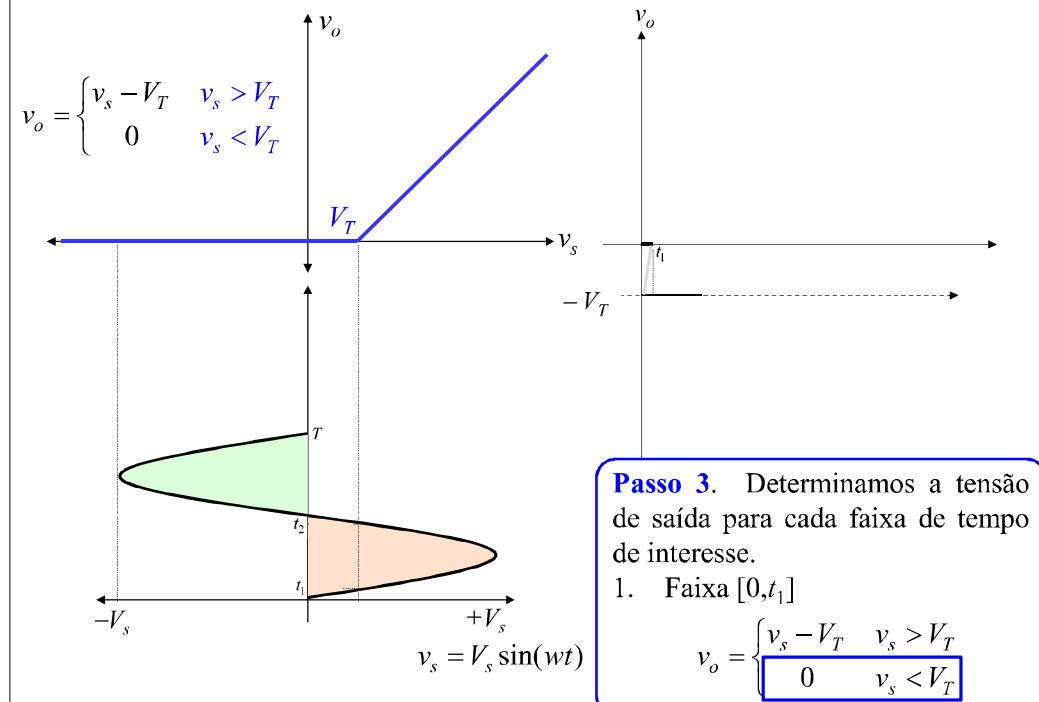
**Passo 2.** Projetamos linhas correspondentes aos pontos relacionados com:

1. As tensões de pico do sinal de entrada
2. O ponto de ruptura da curva  $v_i-v_o$ .

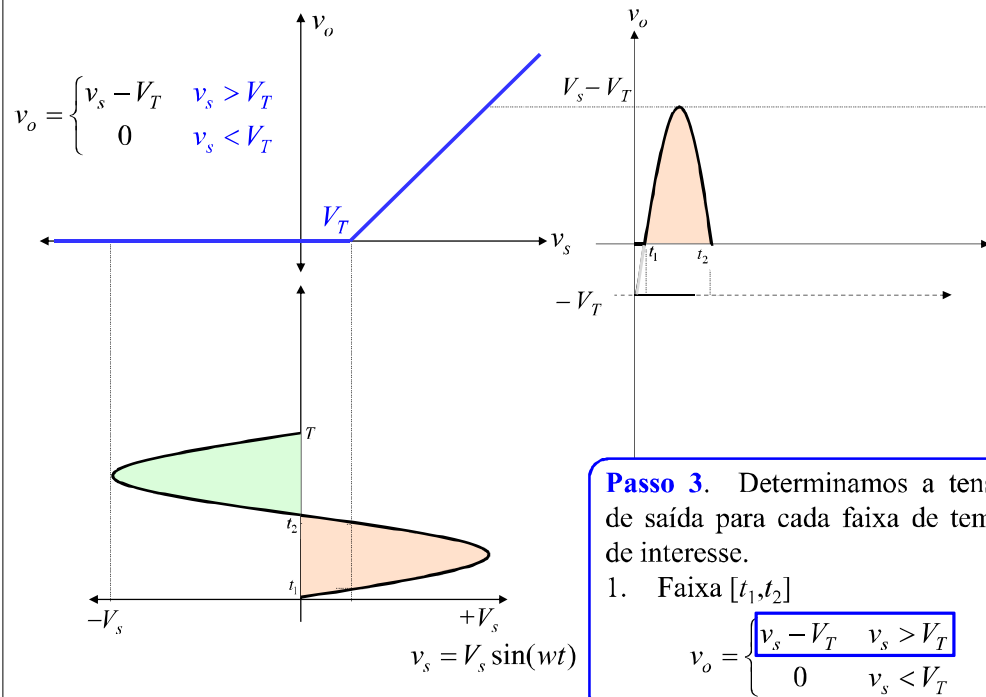
### Efeito de $V_T$ no sinal retificada de meia onda



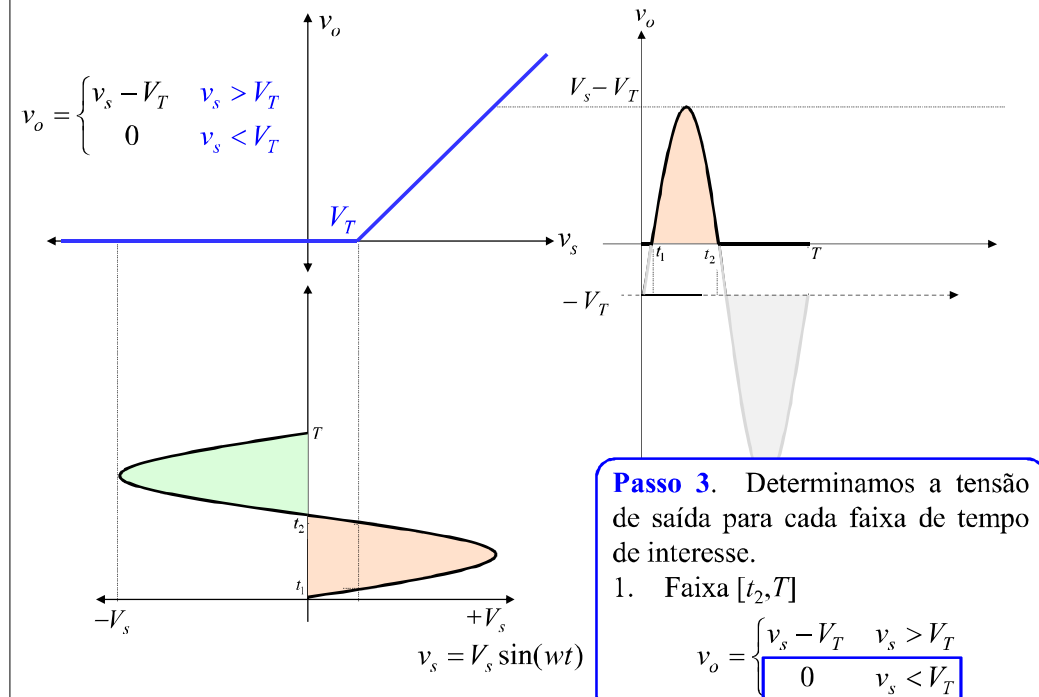
### Efeito de $V_T$ no sinal retificada de meia onda

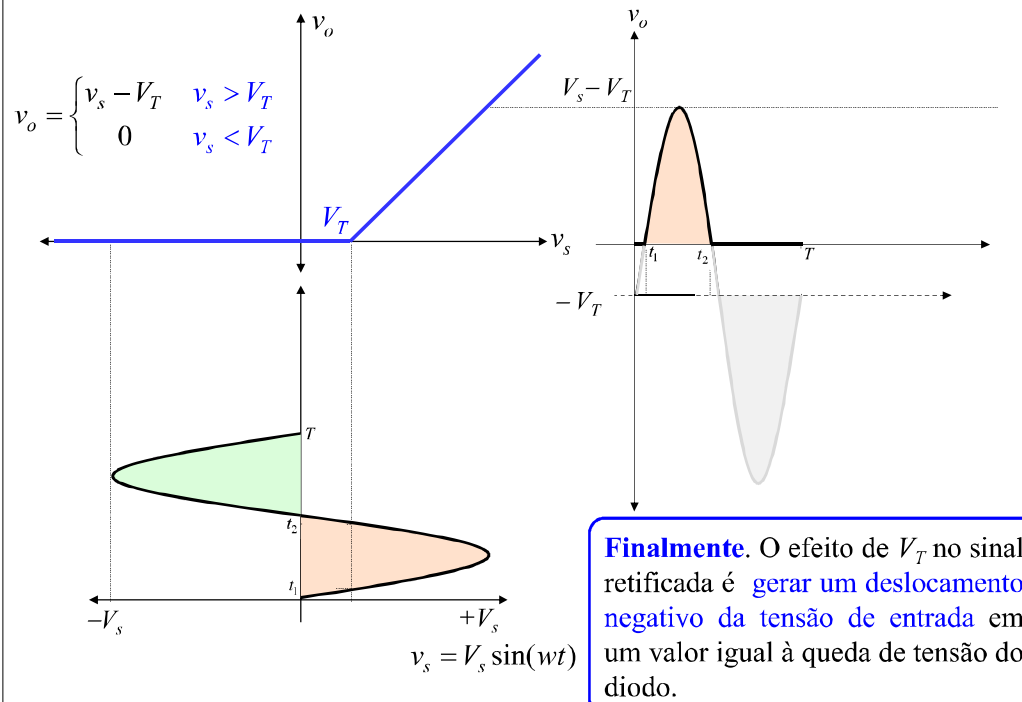


### Efeito de $V_T$ no sinal retificada de meia onda



### Efeito de $V_T$ no sinal retificada de meia onda





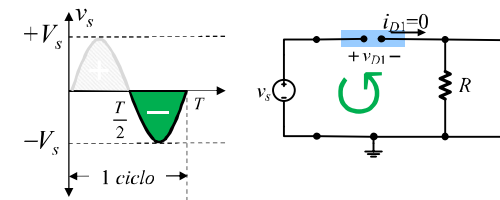
## Retificadores

### Retificador de Meia Onda

#### □ Cálculo do PIV

➤ Considerando Semiciclo negativo  $[T/2, T]$ :

❖  $D_1 = \text{OFF}$ :  $i_{D1} = 0$  e  $v_{D1} < 0$



❖ Aplicando a lei de malhas de Kirchhoff no circuito, determinamos a tensão inversa no diodo  $D_1$  ( $v_{D1}$ ).

$$-v_s + v_{D1} + Ri_{D1} = 0 \Rightarrow v_{D1} = v_s \quad i_{D1} = 0$$

## Retificadores

### Retificador de Meia Onda

#### □ Cálculo do PIV

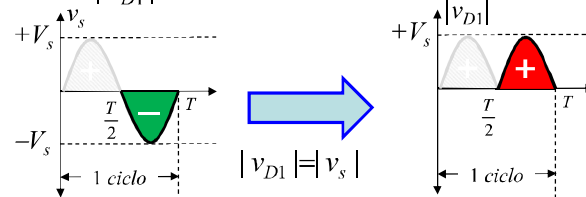
➤ Calculamos o PIV tomando em conta que é o maior valor na tensão inversa no diodo  $D_1$ .

❖ Primeiro, calculamos o valor absoluto de  $v_{D1}$ .

$$|v_{D1}| = |v_s|$$

❖ Segundo, graficamos  $|v_{D1}|$  e visualmente determinamos sua amplitude máxima.

▪ Graficando  $|v_{D1}|$



▪ Podemos ver que, o valor máximo de  $|v_{D1}|$  é  $V_s$ , portanto:

$$PIV = \max\{|v_{D1}|\} = \max\{|v_s|\} = V_s$$

## Retificadores

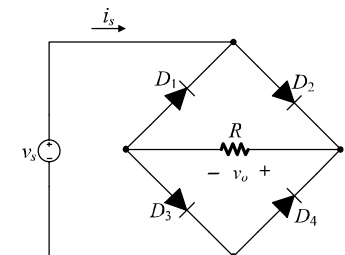
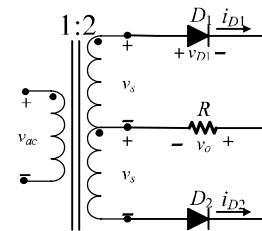
### Retificador de Onda Completa

#### □ Objetivo

➤ Gera uma tensão unipolar usando tanto os semiciclos positivos como negativos da senoíde de entrada.

#### Transformador com derivação central

#### Configuração tipo ponte

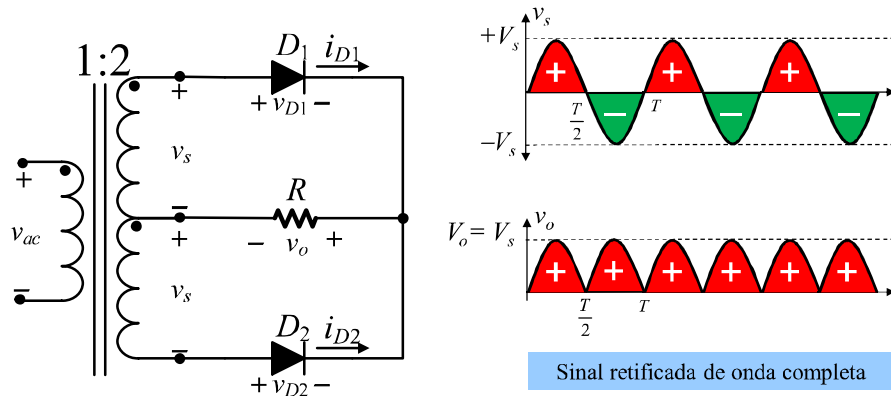


## Retificadores

### Retificador de Onda Completa usando um transformador com derivação central

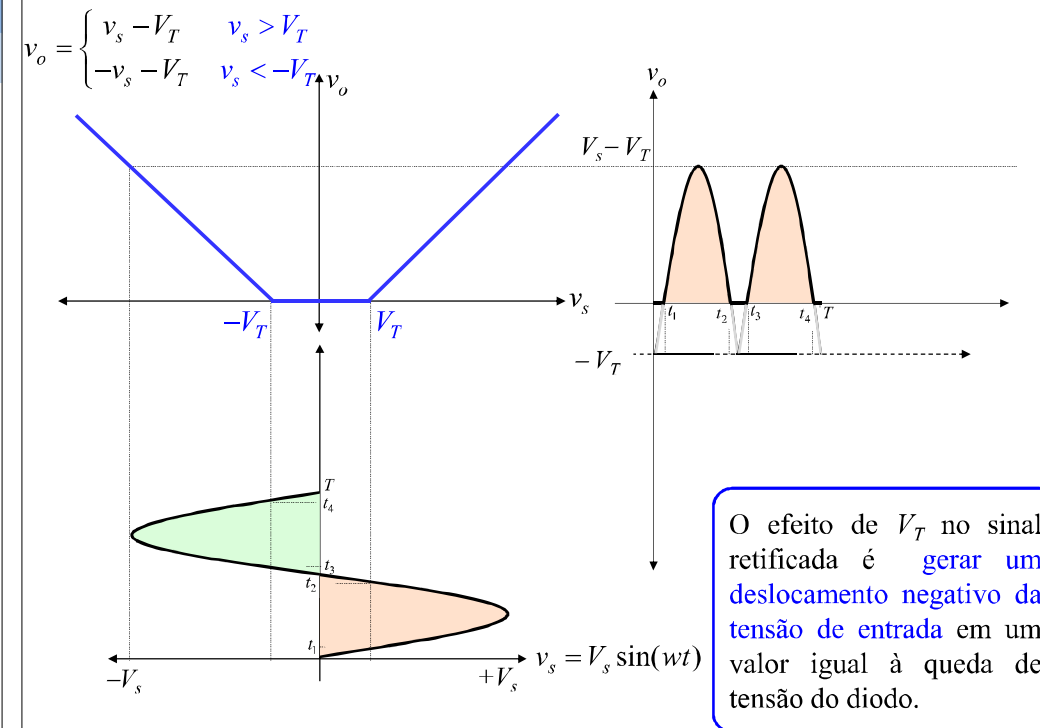
#### Forma de Onda de Saída

➤ A forma de onda da saída para um ciclo completo será:



36

### Efeito de $V_T$ no sinal retificada de onda completa



## Retificadores

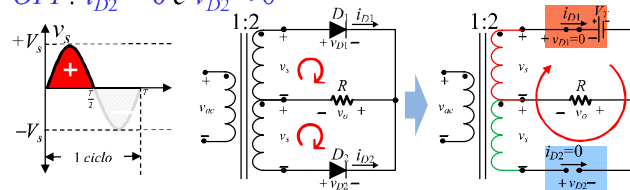
### Retificador de Onda Completa usando um transformador com derivação central

#### Calculo do PIV

➤ Considerando Semiciclo positivo  $[0, T/2]$ :

❖  $D_1 = \text{ON}$ :  $v_{D1} = 0$  e  $i_{D1} > 0$

❖  $D_2 = \text{OFF}$ :  $i_{D2} = 0$  e  $v_{D2} < 0$



❖ Aplicando a lei de malhas de Kirchhoff na malha superior e inferior, determinamos a tensão inversa no diodo  $D_2$  ( $v_{D2}$ ).

$$-v_s - v_s + V_T - v_{D2} = 0$$

$$v_{D2} = -(2v_s - V_T)$$

41

## Retificadores

### Retificador de Onda Completa usando um transformador com derivação central

#### Calculo do PIV

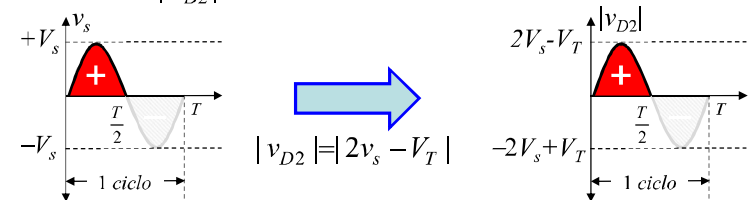
➤ Calculamos o PIV tomando em conta que é o maior valor na tensão inversa no diodo  $D_2$ .

❖ Primeiro, calculamos o valor absoluto de  $v_{D2}$ .

$$|v_{D2}| = |-(2v_s - V_T)| = 2v_s - V_T$$

❖ Segundo, graficamos  $|v_{D2}|$  e visualmente determinamos sua amplitude máxima.

▪ Graficando  $|v_{D2}|$



▪ Podemos ver que, o valor máximo de  $|v_{D2}|$  é  $2V_s - V_T$ , portanto:

$$PIV = \max\{|v_{D2}|\} = \max\{2v_s - V_T\} = 2V_s - V_T$$

42

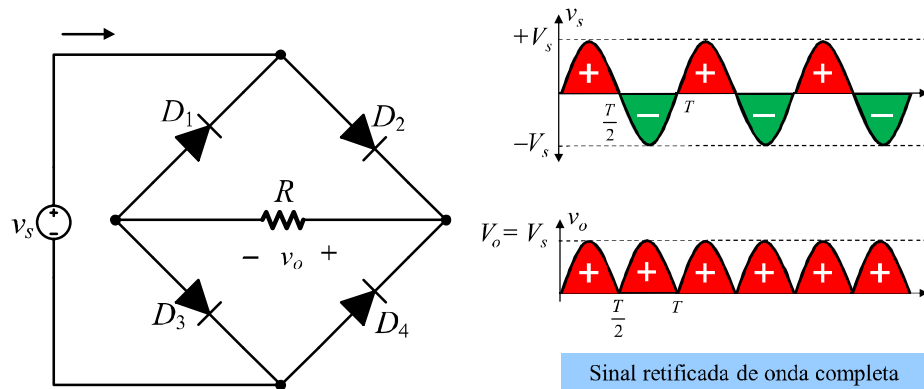


# Retificadores

## Retificador de Onda Completa usando uma configuração tipo ponte

### Forma de Onda de Saída

➤ A forma de onda da saída para um ciclo completo será:



46

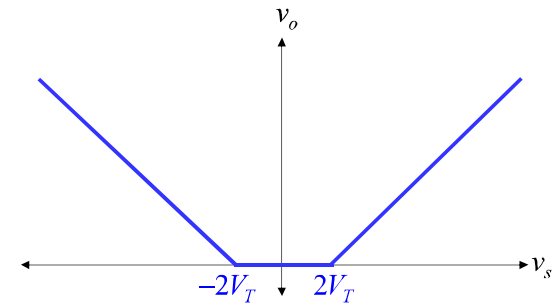
# Retificadores

## Retificador de Onda Completa usando uma configuração tipo ponte

### Efeito da queda de tensão direta no diodo

➤ De (1) e (2) podemos obter a curva de transferência do retificador de meia onda:

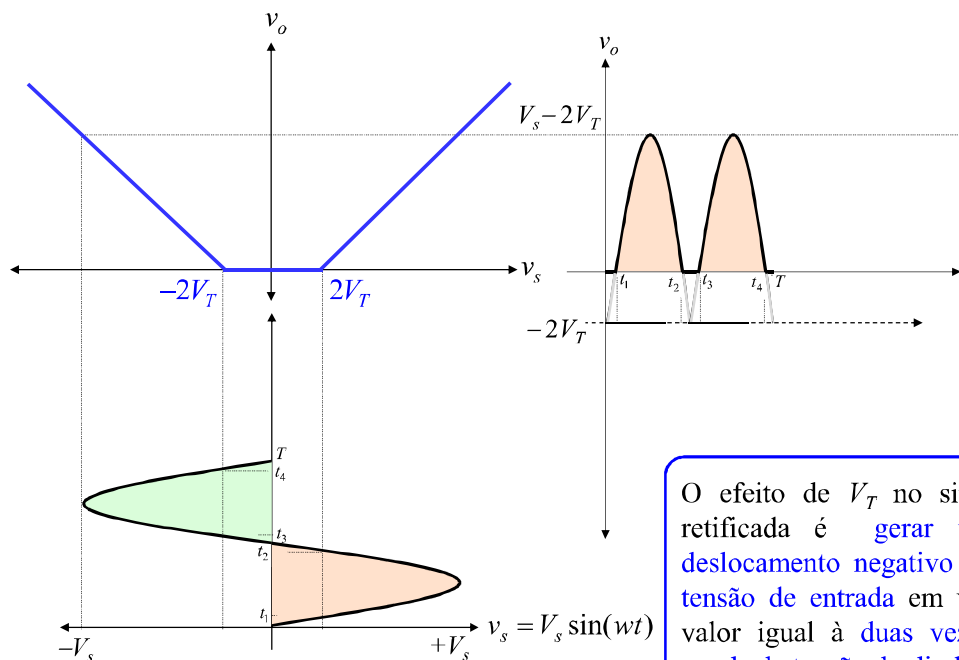
$$v_o = \begin{cases} v_s - 2V_T & v_s > 2V_T \\ -v_s - 2V_T & v_s < -2V_T \end{cases}$$



Curva de transferência do retificador de meia onda

49

## Efeito de $V_T$ no sinal retificada de onda completa



O efeito de  $V_T$  no sinal retificada é gerar um deslocamento negativo da tensão de entrada em um valor igual à duas vezes queda de tensão do diodo.

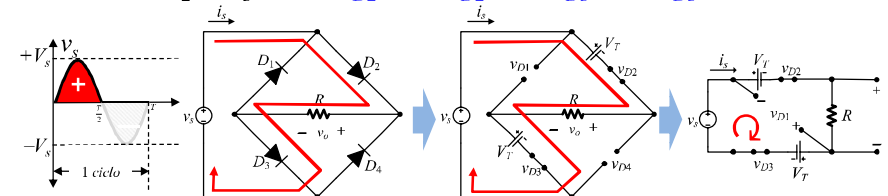
# Retificadores

## Retificador de Onda Completa usando uma configuração tipo ponte

### Calculo do PIV

➤ Considerando Semiciclo positivo  $[0, T/2]$ :

- $D_1 = D_4 = OFF$ :  $i_{D1} = 0$  e  $v_{D1} < 0$ ;  $v_{D4} = 0$  e  $i_{D4} > 0$
- $D_2 = D_3 = ON$ :  $v_{D2} = 0$  e  $i_{D2} > 0$ ;  $v_{D3} = 0$  e  $i_{D3} > 0$



❖ Aplicando a lei de malhas de Kirchhoff na malha inferior, determinamos a tensão inversa no diodo  $D_1$  ( $v_{D1}$ ).

51

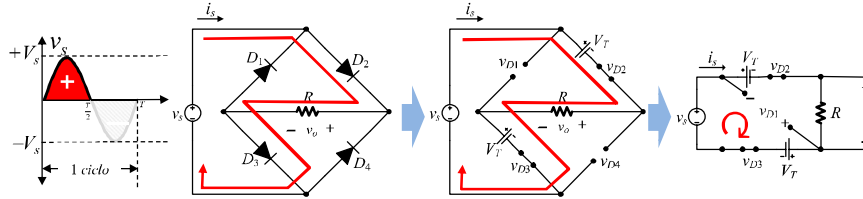
## Retificadores

### Retificador de Onda Completa usando uma configuração tipo ponte

#### □ Cálculo do PIV

➤ Considerando Semiciclo positivo  $[0, T/2]$ :

- $D_1 = D_4 = OFF$ :  $i_{D1} = 0$  e  $v_{D1} < 0$ ;  $v_{D4} = 0$  e  $i_{D4} > 0$
- $D_2 = D_3 = ON$ :  $v_{D2} = 0$  e  $i_{D2} > 0$ ;  $v_{D3} = 0$  e  $i_{D3} > 0$



❖ Aplicando a lei de malhas de Kirchhoff na **malha inferior**, determinamos a tensão inversa no diodo  $D_1$  ( $v_{D1}$ ).

$$-v_s - v_{D1} + V_T = 0$$

$$v_{D1} = -(v_s - V_T)$$

52

## Retificadores

### Retificador de Onda Completa usando uma configuração tipo ponte

#### □ Cálculo do PIV

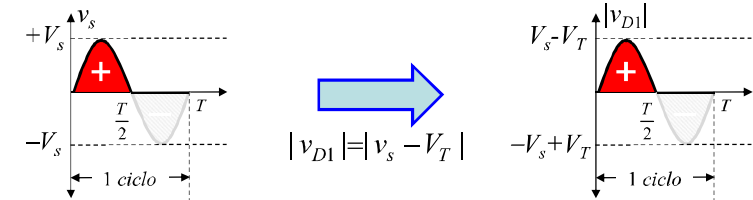
➤ Calculamos o PIV tomando em conta que é o **maior valor na tensão inversa no diodo  $D_1$** .

❖ Primeiro, calculamos o valor absoluto de  $v_{D1}$ .

$$|v_{D1}| = |-(v_s - V_T)| = |v_s - V_T|$$

❖ Segundo, graficamos  $|v_{D1}|$  e visualmente determinamos sua amplitude máxima.

▪ Graficando  $|v_{D1}|$



▪ Podemos ver que, o valor máximo de  $|v_{D1}|$  é  $V_s - V_T$ , portanto:

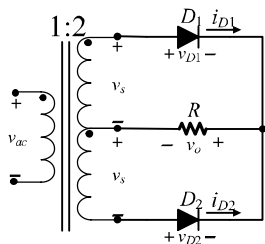
$$PIV = \max\{|v_{D1}|\} = \max\{|v_s - V_T|\} = V_s - V_T$$

53

## Retificadores

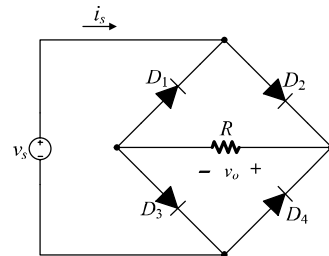
### Comparação de PIV para os configurações de onda completa

#### Transformador com derivação central



$$PIV = 2V_s - V_T$$

#### Configuração tipo ponte



$$PIV = V_s - V_T$$

Dado que, normalmente escolhemos um diodo que suporte 50% a mais do valor esperado para PIV, a configuração tipo ponte precisaria de diodos com um menor valor de PIV que a configuração transformador com derivação central.

55

## Retificadores

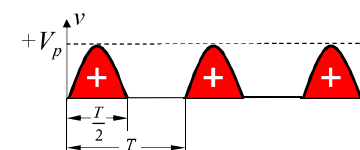
### Características das Sinais ca

#### Valor Médio de um Sinal Periódico

□ É um valor de tensão constante que num dado intervalo de tempo  $T$  corresponde à **componente continua (cc)** da sinal  $v(t)$ . Matematicamente:

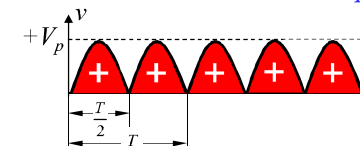
$$V_{cc} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt$$

□ Para um sinal de **meia onda**:



$$V_{cc} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} V_p \sin(\omega t) dt = \frac{V_p}{\pi}$$

□ Para um sinal de **onda completa**:



$$V_{cc} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt = \frac{1}{T} \left( 2 \int_0^{T/2} V_p \sin(\omega t) dt \right) = \frac{2V_p}{\pi}$$

56

- Consideremos que a tensão  $v(t)$  é um **sinhal periódico de periodo  $T$** .
- Então, podemos representar  $v(t)$  como uma **serie de Fourier**:

$$v(t) = V_o + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin(k\omega_o t) + \sum_{k=1}^{\infty} B_k \cos(k\omega_o t)$$

Valor Constante

Harmônicos de ordem superior

- Calculando o valor  $V_o$ :

$$v(t) = V_o + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin(k\omega_o t) + \sum_{k=1}^{\infty} B_k \cos(k\omega_o t)$$

$$\int_0^T v(t) dt = \int_0^T V_o dt + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \underbrace{\int_0^T \sin(k\omega_o t) dt}_{=0} + \sum_{k=1}^{\infty} B_k \underbrace{\int_0^T \cos(k\omega_o t) dt}_{=0}$$

$$\int_0^T v(t) dt = V_o T$$

$$\underbrace{\frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt}_{=V_{cc}} = V_o$$

O valor constante da serie de Fourier é igual ao **valor Médio**.

57

## Retificadores

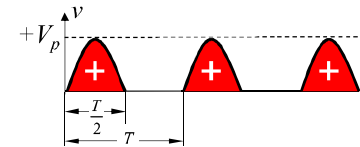
### Características das Sinais $ca$

#### Valor Eficaz de um Sinal Periódico

- Representa o valor de uma tensão continua que produz a mesma **DISSIPACÃO** de potencia que uma tensão periódica. Matematicamente:

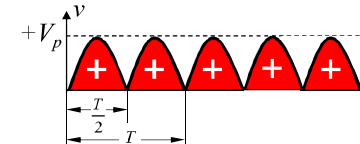
$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}$$

- Para um sinal de **meia onda**:



$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} (V_p \sin(\omega t))^2 dt} = \frac{V_p}{2}$$

- Para um sinal de **onda completa**:

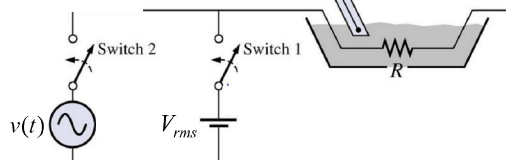


$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \left( 2 \int_0^{T/2} (V_p \sin(\omega t))^2 dt \right)} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}$$

58

### Dedução do valor eficaz

- Pense em um resistor  $R$  que esquent a água, ele está conectado via *switchs*, já seja, a uma **fonte CA** ou a uma **fonte CC ajustável**, como se ilustra:



#### Casos

- Fechamos o **Switch 2** e abrimos o **Switch 1**. O resistor é alimentado pela fonte **CA**. Neste caso, a leitura da temperatura (que é um indicativo da potência) pode nos parecer constante; mas isso é uma falsa impressão. O que se observa é apenas a **temperatura média** produzida pela tensão média do sinal **CA**.

#### Formalizando

- ❖ a potência instantânea dissipada pelo resistor será:

$$p(t) = v i = v^2 / R$$

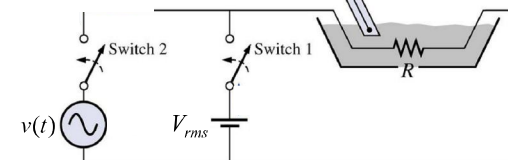
- ❖ e a potência média será:

$$P_{ca} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{v^2}{R} dt = \frac{1}{R} \left( \frac{1}{T} \int_0^T v^2 dt \right) \quad (1)$$

59

### Dedução do valor eficaz

- Pense em um resistor  $R$  que esquent a água, ele está conectado via *switchs*, já seja, a uma **fonte CA** ou a uma **fonte CC ajustável**, como se ilustra:



#### Casos

- Fechamos o **Switch 1** e abrimos o **Switch 2**. O resistor é alimentado pela fonte **CC**. Neste caso, a leitura da temperatura é realmente constante porque a corrente é constante.

#### Formalizando

- ❖ a potência constante dissipada pelo resistor será:

$$P_{dc} = \frac{V_{rms}^2}{R} \quad (2)$$

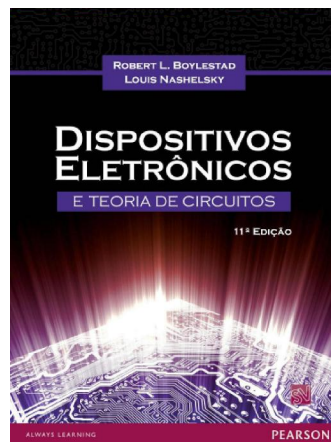
60



## Bibliografia

Boylestad, Robert L.; Nashelsky, Louis. *Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos* (11va Edição). Pearson, Prentice Hall, São Paulo, 2013.

- ☐ Estudar a parte de:
  - **Retificadores**
  - Filtro com Capacitor
  - **Regulador de Tensão**
- ☐ Disponível no acervo:  
**4**
- ☐ Número de chamada:  
**621.38 B792d 11.ed.**



## Bibliografia

Sedra, Adel S; Smith, Kenneth C. *Microeletrônica* (5<sup>ta</sup> Edição). Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2007.

- ☐ Estudar a parte de:
  - Retificadores
  - **Filtro com Capacitor**
  - Regulador de Tensão
- ☐ Disponível no acervo:  
**20**
- ☐ Número de chamada:  
**621.3.049.77 S449m 5.ed.**

