



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

---

## ES664 - Laboratório de Eletrônica para Automação Industrial

### Relatório - Simulação 1 Retificadores não controlados

---

*Nome:*

Daniel Dello Russo Oliveira  
Marcelli Tiemi Kian

*RA*

101918  
117892

9 de setembro de 2016

## 0.1 Objetivos

Essa simulação tem como objetivo a familiarização com o ambiente de Simulink, com a toolbox SimPowerSystems e com retificadores não controlados.

## 0.2 Retificador monofásico

Através do Simulink implementamos o retificador monofásico de onda completa detalhado em [FUJIWARA, 2016] conforme mostrado na figura 1.

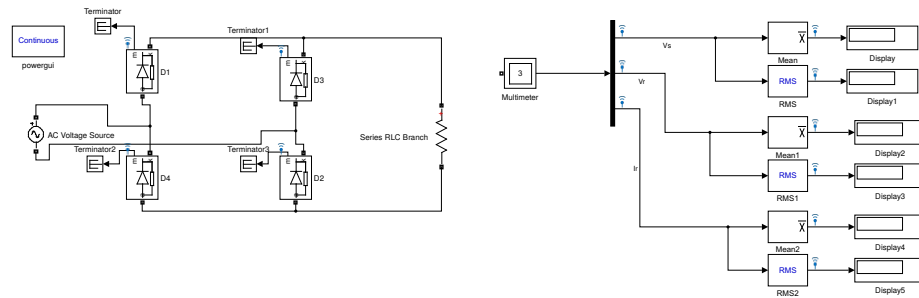


Figura 1: Esquema para simulação do retificador monofásico

Extraímos dessa simulação as curvas de tensão na fonte (figura 2), tensão na carga (figura 3) e corrente na carga (figura 4) para dois períodos da fonte.

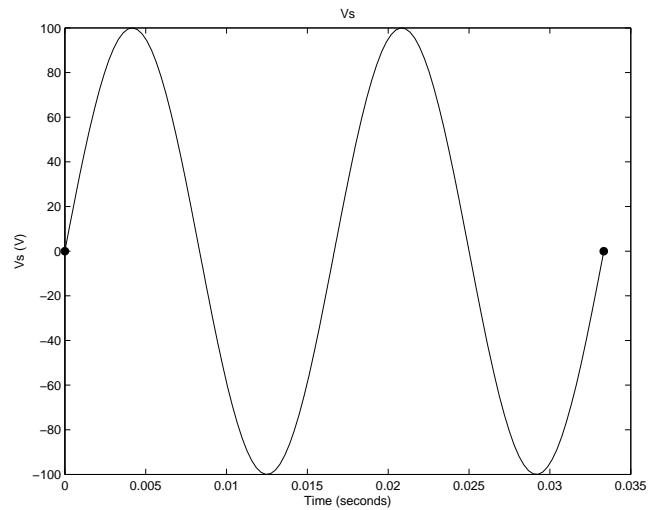


Figura 2: Tensão da fonte para retificador monofásico

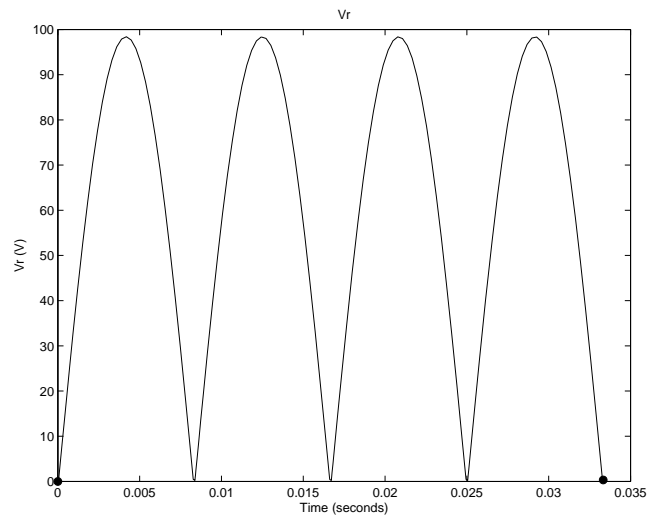


Figura 3: Tensão na carga para retificador monofásico

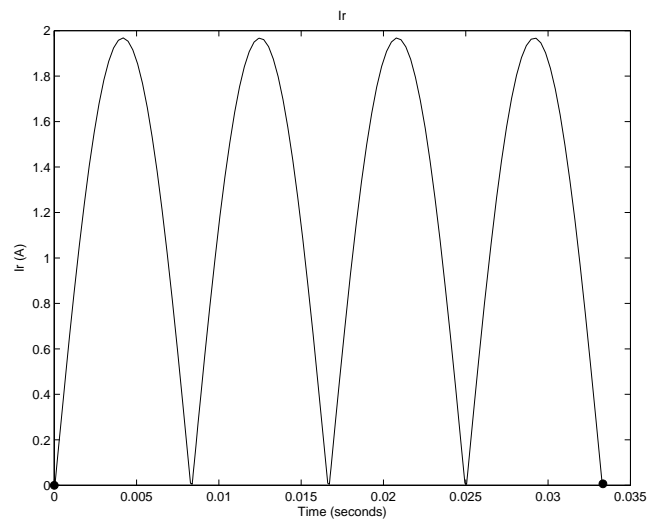


Figura 4: Corrente na carga para retificador monofásico

Medimos as tensões e correntes médias e efetivas na carga, obtendo os seguintes valores:

$$\overline{V_r} = 62.0713 \text{ V} \quad (1)$$

$$\overline{I_r} = 1.2414 \text{ A} \quad (2)$$

$$V_{rms} = 69.2708 \text{ V} \quad (3)$$

$$I_{rms} = 1.3854 \text{ A} \quad (4)$$

Obtivemos também as curvas de tensão e corrente para cada diodo do arranjo, representadas nas figuras 5, 6, 7 e 8

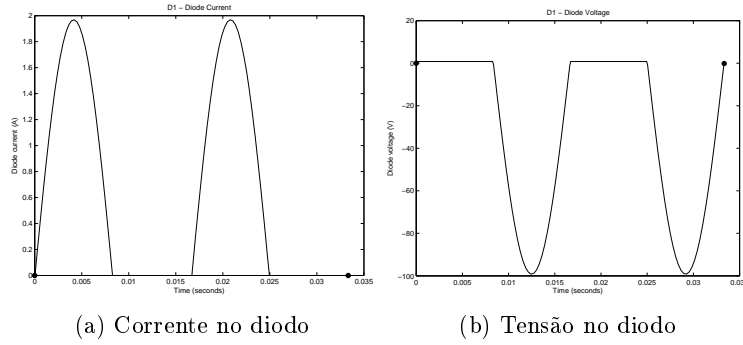


Figura 5: Curvas do diodo 1 para retificador monofásico

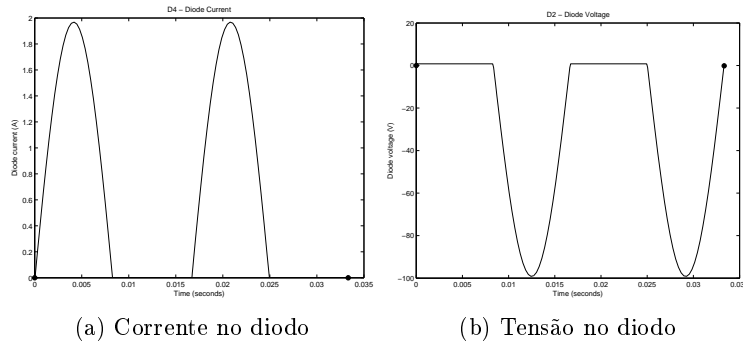


Figura 6: Curvas do diodo 2 para retificador monofásico

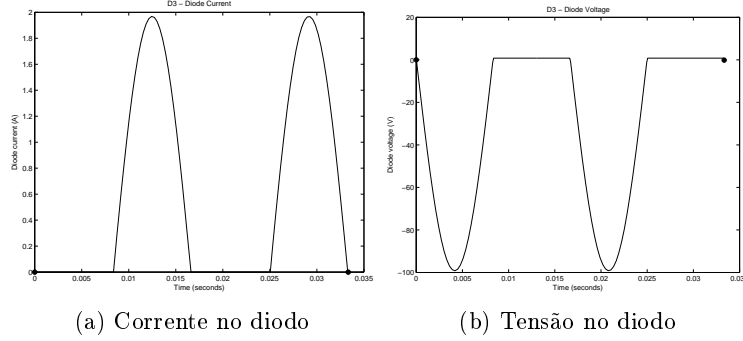


Figura 7: Curvas do diodo 3 para retificador monofásico

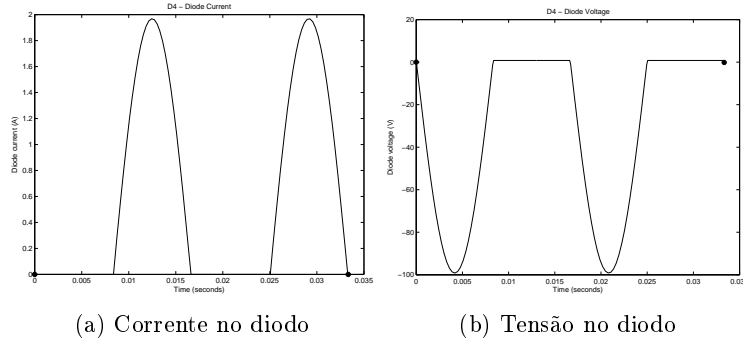


Figura 8: Curvas do diodo 4 para retificador monofásico

Conforme podemos ver analisando as curvas dos diodos (figuras 5, 6, 7 e 8) e a tensão da fonte (figura 2), para uma carga puramente resistiva, durante o semi-ciclo positivo da fonte, os diodos 1 e 2 estão conduzindo enquanto 3 e 4 estão bloqueando, dessa forma a tensão sobre a carga é  $V_s$ . Já no semi-ciclo negativo da fonte, os diodos 3 e 4 estão conduzindo enquanto 1 e 2 estão bloqueando, fazendo que a tensão na carga seja de  $-V_s$ . Dessa forma conseguimos transformar uma tensão senoidal sobre a carga em uma tensão sempre positiva, de maneira que seu valor médio não seja nulo. Podemos calcular a tensão média teórica sobre a carga através da equação 5

$$\overline{V_r} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_s \sin(\theta) d\theta = \frac{2V_s}{\pi} \quad (5)$$

Para calcular o valor efetivo da tensão sobre a carga utilizamos a equação 6.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi (V_s \sin(\theta))^2 d\theta} = \frac{V_s}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

Utilizando os valores da simulação ( $V_s = 100 \text{ V}$ ), encontramos as tensões e correntes esperadas:

$$\overline{V_r} = 63.6620 \text{ V} \quad (7)$$

$$\overline{I_r} = 1.2732 \text{ A} \quad (8)$$

$$V_{rms} = 70.7107 \text{ V} \quad (9)$$

$$I_{rms} = 1.4142 \text{ A} \quad (10)$$

Conforme podemos ver os valores medidos e esperados diferem levemente, isso se deve às imprecisões numéricas da simulação, à queda de tensão introduzida pelos diodos, ao pequeno período de amostragem, entre outros fatores.

Calculamos o fator de retificação teórico (12) e medido (13) usando a equação 11.

$$\sigma = \frac{\overline{P}}{P_{rms}} = \frac{\overline{V_r}^2}{V_{rms}^2} \quad (11)$$

$$\sigma_t = 0.8106 \quad (12)$$

$$\sigma_m = 0.8029 \quad (13)$$

Encontramos por fim o fator de forma teórico (15) e medido (16) usando a equação 14.

$$FF = \frac{\overline{V_r}}{V_{rms}} \quad (14)$$

$$FF_t = 1.1107 \quad (15)$$

$$FF_m = 1.1160 \quad (16)$$

### 0.3 Retificador trifásico

Através do Simulink implementamos o retificador trifásico de onda completa detalhado em [FUJIWARA, 2016] conforme mostrado na figura 9.

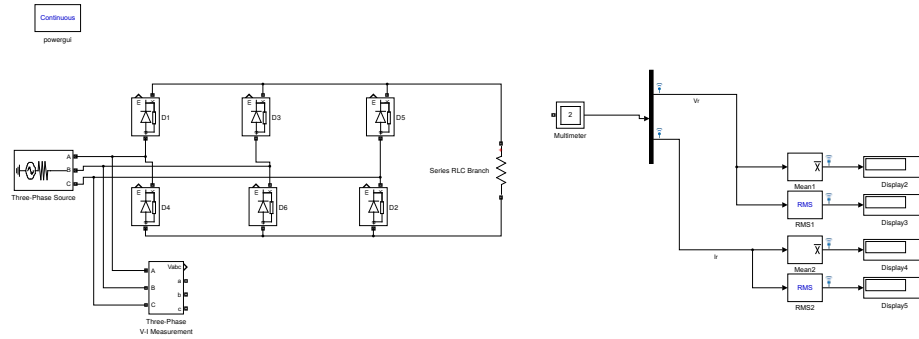


Figura 9: Esquema para simulação do retificador trifásico

Extraímos dessa simulação as curvas das tensões de fase na fonte trifásica (figura 10), da tensão na carga (figura 11) e da corrente na carga (figura 12) para dois períodos da fonte.

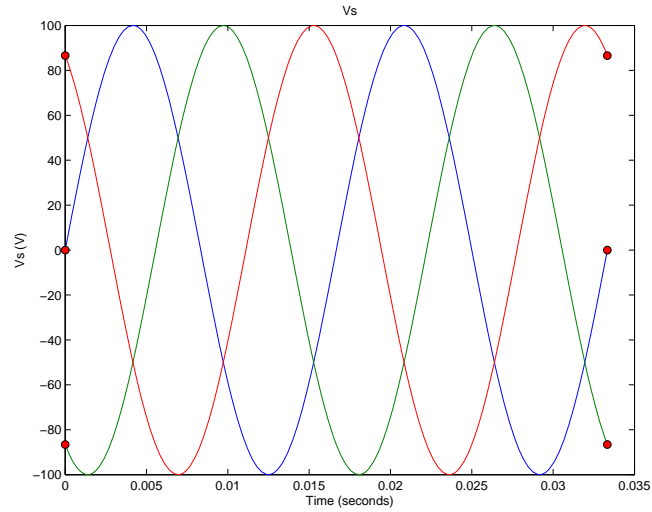


Figura 10: Tensões das fontes para retificador trifásico

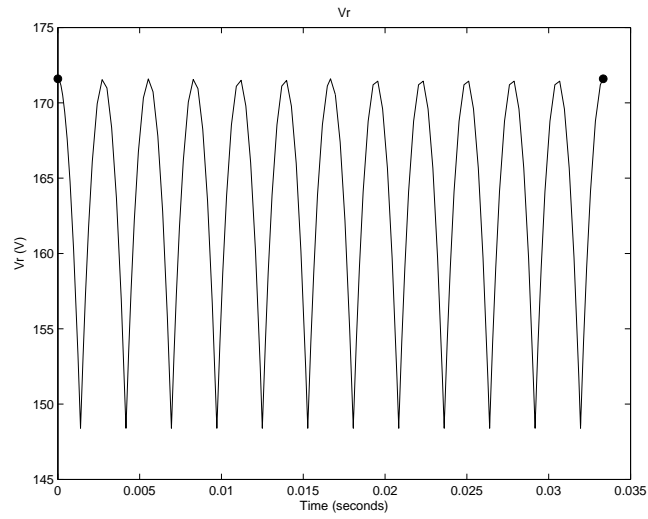


Figura 11: Tensão na carga para retificador trifásico

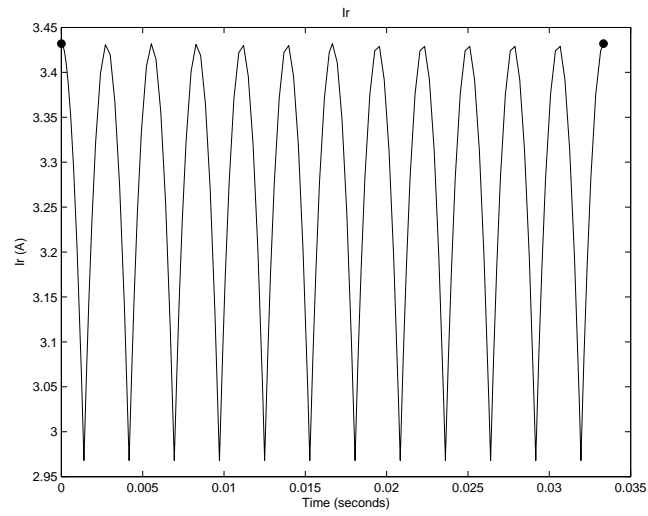


Figura 12: Corrente na carga para retificador trifásico

Medimos as tensões e correntes médias e efetivas na carga, obtendo os seguintes valores:

$$\overline{Vr} = 163.7921 \text{ V} \quad (17)$$

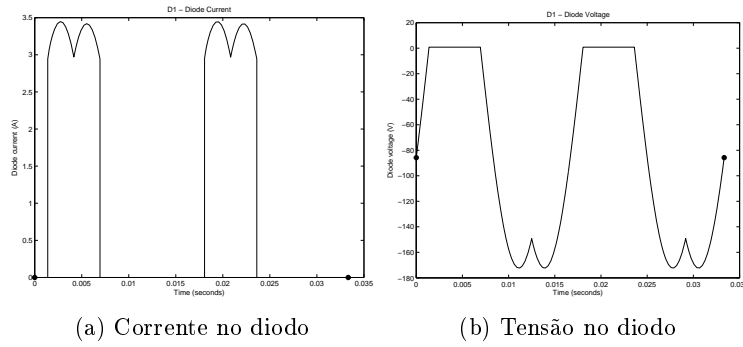
$$\overline{Ir} = 3.2758 \text{ A} \quad (18)$$



$$V_{rms} = 163.9391 \text{ V} \quad (19)$$

$$I_{rms} = 3.2788 \text{ A} \quad (20)$$

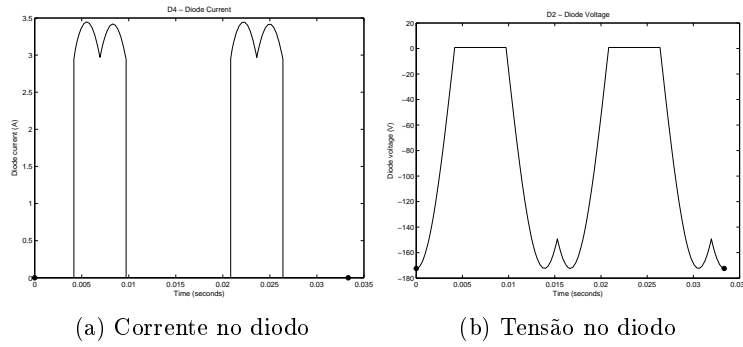
Obtivemos também as curvas de tensão e corrente para cada diodo do arranjo, representadas nas figuras 13, 14, 15, 16, 17 e 18



(a) Corrente no diodo

(b) Tensão no diodo

Figura 13: Curvas do diodo 1 para retificador trifásico



(a) Corrente no diodo

(b) Tensão no diodo

Figura 14: Curvas do diodo 2 para retificador trifásico

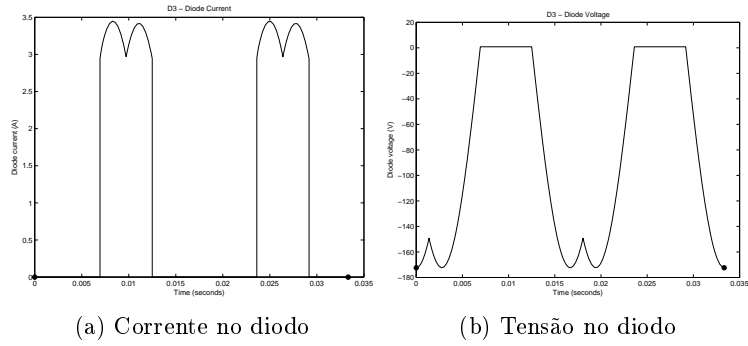


Figura 15: Curvas do diodo 3 para retificador trifásico

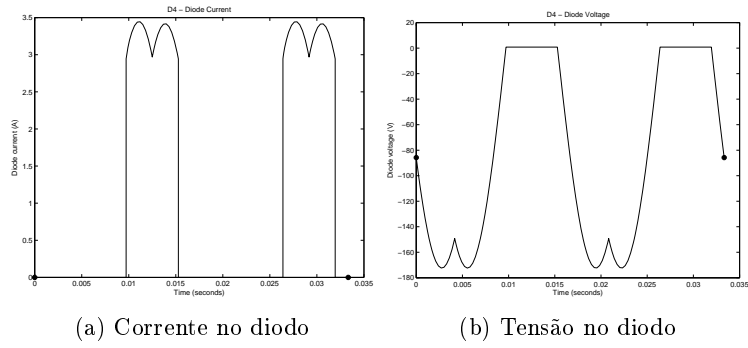


Figura 16: Curvas do diodo 4 para retificador trifásico

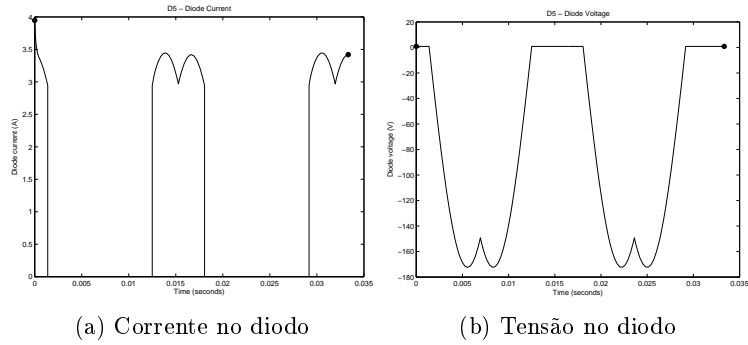


Figura 17: Curvas do diodo 5 para retificador trifásico

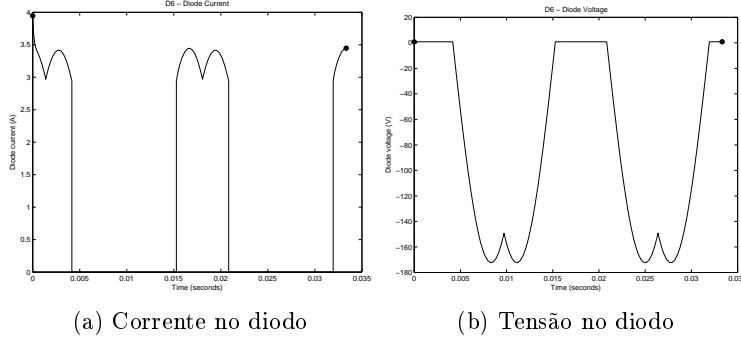


Figura 18: Curvas do diodo 6 para retificador trifásico

Conforme podemos ver analisando as curvas dos diodos (figuras 13, 14, 15, 16, 17 e 18) e a tensão da fonte (figura 10), para uma carga puramente resistiva, quando a tensão da fonte A é a maior e a tensão da fonte C é a menor os diodos 1 e 2 estão conduzindo e os outros bloqueando, uma vez que a tensão da fonte B ultrapassa a de A, os diodos 2 e 3 passam a conduzir, quando a fonte C ultrapassa A por sua vez, temos os diodos 3 e 4 conduzindo e assim sucessivamente.

Podemos calcular a tensão média teórica sobre a carga através da equação 21.

$$\overline{Vr} = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{4\pi}{6}} Vs(\sin(\theta) - \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}))d\theta = \frac{3\sqrt{3}Vs}{\pi} \quad (21)$$

Para calcular o valor efetivo da tensão sobre a carga utilizamos a equação 22.

$$Vr_{rms} = \sqrt{\frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{3\pi}{6}} Vs^2(\sin(\theta) - \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}))^2 d\theta} = \sqrt{\frac{3}{2} + \frac{9\sqrt{3}}{4\pi}} Vs \quad (22)$$

Utilizando os valores da simulação ( $Vs = 100 \text{ V}$ ), encontramos as tensões e correntes esperadas:

$$\overline{Vr} = 165.3987 \text{ V} \quad (23)$$

$$\overline{Ir} = 3.3080 \text{ A} \quad (24)$$

$$Vr_{rms} = 165.5443 \text{ V} \quad (25)$$

$$I_{rms} = 3.3109 \text{ A} \quad (26)$$

Conforme podemos ver os valores medidos e esperados diferem levemente, isso se deve às imprecisões numéricas da simulação, à queda de tensão introduzida pelos diodos, ao pequeno período de amostragem, entre outros fatores.

Calculamos o fator de retificação teórico (27) e medido (28) usando a equação 11.

$$\sigma_t = 0.9982 \quad (27)$$

$$\sigma_m = 0.9982 \quad (28)$$

Encontramos por fim o fator de forma teórico (29) e medido (30) usando a equação 14.

$$FF_t = 1.0009 \quad (29)$$

$$FF_m = 1.0009 \quad (30)$$

Como podemos ver o retificador trifásico apresenta um desempenho significativamente melhor que o monofásico, apresentando uma tensão sobre a carga mais próxima de constante e fatores de retificação e forma muito próximos de 1, com o acréscimo de somente dois componentes semicondutores de potência, porém ele necessita de uma fonte trifásica que nem sempre está disponível.

# Referências Bibliográficas

[FUJIWARA, 2016] FUJIWARA, E. **Retificadores não controlados**. Roteiro Simulação 1, Unicamp/FEM/DSI, 2016.