



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO

Guilherme Lettmann Penha

Trabalho 1: Conversores AC/DC

Florianópolis
2025

Guilherme Lettmann Penha

Trabalho 1: Conversores AC/DC

Atividade submetida ao professor orientador da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de concluir a disciplina de Eletrônica de Potência I com aproveitamento satisfatório.
Orientador: Prof. André Luís Kirsten, Dr.

Florianópolis
2025

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
1.1	INTRODUÇÃO	6
2	DESENVOLVIMENTO	7
2.1	QUESTÃO 1 - RETIFICADORES A DIODO COM CARGA RESISTIVA	7
2.1.1	Tensão Média e Eficaz na Carga	7
2.1.1.1	PSIM	7
2.1.1.2	Analítico	7
2.1.1.2.1	<i>Meia-onda monofásico.</i>	7
2.1.1.2.2	<i>Onda completa monofásico — ponte de diodos.</i>	8
2.1.1.2.3	<i>Onda completa monofásico com TAP central.</i>	8
2.1.1.2.4	<i>Retificador trifásico de ponto-médio (3 diodos, carga resistiva).</i>	8
2.1.1.2.5	<i>Retificador trifásico seis-pulsos.</i>	8
2.1.2	Ondulação de Tensão e Corrente na carga	9
2.1.2.1	PSIM	9
2.1.2.2	Analítico	9
2.1.3	Fator de Potência da Fonte	9
2.1.3.1	PSIM	9
2.1.3.2	Analítico	9
2.1.3.2.1	<i>Meia-onda monofásico.</i>	9
2.1.3.2.2	<i>Onda completa monofásico — ponte de diodos.</i>	9
2.1.3.2.3	<i>Onda completa monofásico com TAP central.</i>	10
2.1.3.2.4	<i>Retificador trifásico de ponto-médio.</i>	10
2.1.3.2.5	<i>Retificador trifásico seis-pulsos.</i>	10
2.1.4	THD da Corrente de Entrada	10
2.1.4.1	PSIM	10
2.1.4.2	Analítico	10
2.1.4.2.1	<i>Meia-onda monofásico.</i>	10
2.1.4.2.2	<i>Onda completa monofásico — ponte de diodos.</i>	10
2.1.4.2.3	<i>Onda completa monofásico com TAP central.</i>	11
2.1.4.2.4	<i>Retificador trifásico de ponto-médio.</i>	11
2.1.4.2.5	<i>Retificador trifásico seis-pulsos.</i>	11
2.1.5	Tensão Máxima e Corrente Média do Diodo	11
2.1.5.1	PSIM	11
2.1.5.2	Analítico	11
2.1.5.2.1	<i>Meia-onda monofásico.</i>	11
2.1.5.2.2	<i>Onda completa monofásico — ponte de diodos.</i>	12
2.1.5.2.3	<i>Onda completa monofásico com TAP central.</i>	12

2.1.5.2.4	Retificador trifásico de ponto-médio.	12
2.1.5.2.5	Retificador trifásico seis-pulsos.	12
2.1.6	Potência Aparente do Transformador	12
2.1.6.1	PSIM	12
2.1.6.2	Analítico	13
2.1.6.2.1	Meia-onda monofásico.	13
2.1.6.2.2	Onda completa monofásico — ponte de diodos.	13
2.1.6.2.3	Onda completa monofásico com TAP central.	13
2.1.6.2.4	Retificador trifásico de ponto-médio.	13
2.1.6.2.5	Retificador trifásico seis-pulsos.	13
2.2	QUESTÃO 2 - RETIFICADOR MONOFÁSICO A DIODO COM FILTRO CAPACITIVO	13
2.2.1	Análise da Ondulação da Tensão de Saída (Ripple)	13
2.2.1.1	Retificador sem Capacitor (Puro)	14
2.2.1.2	Regime Permanente com Capacitor	14
2.2.1.3	Definição do Ripple	14
2.2.2	Metodologia de Projeto Precisa do Capacitor (Ripple $\Delta V \rightarrow 0$ V)	14
2.2.2.1	Dados de Exemplo para a Mínima Ondulação	14
2.2.2.2	Análise da Tendência (Projeto para $\Delta V_{max} \rightarrow 0$ V)	15
2.2.2.2.1	Análise da Equação	15
2.3	QUESTÃO 3 - PROJETO DO RETIFICADOR HÍBRIDO MONOFÁ- SICO COM FILTRO CAPACITIVO DE 5 KW	15
2.3.1	Parâmetros de Entrada e Saída	15
2.3.2	Projeto do Capacitor de Filtro	16
2.3.2.1	Escolha do Capacitor Comercial e Arranjo	16
2.3.2.2	Resistência Série Equivalente (ESR)	16
2.3.3	Projeto dos Semicondutores e Dissipadores	16
2.3.3.1	Especificações	16
2.3.3.2	Escolha dos Componentes Comerciais e Não-Idealidades	17
2.3.3.3	Projeto do Dissipador de Calor	17
2.3.4	Projeto da Partida Suave e Transformador	17
2.3.4.1	Impedância do Transformador	17
2.3.4.2	Limitação da Corrente de Partida	18
2.3.4.3	Estratégia de Partida Suave	18
2.3.5	Configuração do Modelo Não-Ideal no PSIM	18
2.4	QUESTÃO 4 - ANÁLISE DO RETIFICADOR TRIFÁSICO A TIRISTOR COM CARGA RLE	19
2.4.1	Parâmetros de Referência e Derivados	19
2.4.2	Algoritmo para o Cálculo do Ângulo de Extinção (β)	19

2.4.2.1	Equação Fundamental da Corrente Instantânea	19
2.4.2.2	Algoritmo para Encontrar β	20
2.4.3	Análise do Modo de Operação e Condução Crítica	20
2.4.3.1	Modo de Operação com $\alpha = 30^\circ$	20
2.4.3.2	Ângulo de Disparo para Condução Crítica (α_{crit})	20
2.5	QUESTÃO 5 - ANÁLISE TÉRMICA DE UM DIODO DE POTÊNCIA COM DISSIPADOR	21
2.5.1	Dados Coletados e Princípio Geral	21
2.6	QUESTÃO 6 - CÁLCULO DA INDUTÂNCIA (L) PARA ÂNGULO DE EXTINÇÃO $\beta = 270^\circ$	21
2.6.1	Dados e Parâmetros Iniciais	21
2.6.2	Equação Transcendental do Ângulo de Extinção	21
2.6.3	Substituição e Simplificação	21
2.7	QUESTÃO 7 - CÁLCULO DA INDUTÂNCIA (L) PARA RETIFICADOR MONOFÁSICO DE ONDA COMPLETA CONTROLADO	22
2.7.1	Dados do Sistema e Condição Limite	22
2.7.2	Equação de Extinção da Corrente	22
2.7.3	Solução Numérica para $\tan(\varphi)$	22
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
3.1	QUESTÃO 1 - RETIFICADORES A DIODO COM CARGA RESISTIVA	23
3.1.1	Tensão Média e Eficaz na carga	23
3.1.2	Corrente Média e Eficaz na carga	23
3.1.3	<i>Ripple</i> na Carga	24
3.1.4	Fator de Potência da Fonte	24
3.1.5	THD Corrente de Entrada	24
3.1.6	Tensão máxima e corrente média nos diodos	24
3.1.6.1	Meia-onda	24
3.1.6.2	Onda Completa	24
3.1.6.3	Onda Completa (TAP)	25
3.1.6.4	Trifásico - Ponto Médio	25
3.1.6.5	Ponte de Graetz	25
3.1.7	Potência Aparente da Fonte	25
3.2	QUESTÃO 2 - RETIFICADOR MONOFÁSICO A DIODO COM FILTRO CAPACITIVO	25
3.2.1	Tabela Comparativa de Ondulação (ΔV) e Validação	25
3.2.1.1	Tabela de Comparação - Analítica	26
3.2.1.2	Tabela de Comparação - PSIM	26
3.2.1.3	Conclusão	26

3.3	QUESTÃO 3 - PROJETO DO RETIFICADOR HÍBRIDO MONOFÁSICO COM FILTRO CAPACITIVO DE 5 KW	27
3.3.1	Validação do Filtro e Regime Permanente	27
3.3.2	Análise da Partida Suave	27
3.3.3	Verificação Térmica	28
3.3.4	Conclusão	28
3.4	QUESTÃO 4	28
3.4.1	Comprovação via Simulação	28
3.5	QUESTÃO 5 - ANÁLISE TÉRMICA DE UM DIODO DE POTÊNCIA COM DISSIPADOR	28
3.5.1	Resolução do Item a: Temperatura Ambiente Máxima ($T_{A(Max)}$) .	28
3.5.1.1	Cálculo	28
3.5.2	Resolução do Item b: Resistência Térmica do Dissipador Necessária ($R_{\theta SA}$)	29
3.5.2.1	Cálculo	29
3.6	QUESTÃO 6 - CÁLCULO DA INDUTÂNCIA (L) PARA ÂNGULO DE EXTINÇÃO $\beta = 270^\circ$	29
3.6.1	Cálculo Final de L	29
3.6.2	Validação em Simulação	29
3.7	QUESTÃO 7 - CÁLCULO DA INDUTÂNCIA (L) PARA RETIFICADOR MONOFÁSICO DE ONDA COMPLETA CONTROLADO	30
3.7.1	Cálculo da Indutância L	30
3.7.2	Validação em Simulação	30
	ANEXO A – SIMULAÇÕES	32
	ANEXO B – CÓDIGOS	46

1 INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

A Eletrônica de Potência é o pilar fundamental que sustenta a conversão e o controle eficientes da energia elétrica em sistemas modernos, desde pequenas fontes de alimentação até grandes redes de transmissão. Nesta disciplina crucial, os **retificadores** assumem um papel de destaque, sendo o elo inicial e indispensável em praticamente todo sistema eletrônico: a conversão de energia *Alternada (AC)* para *Contínua (DC)*.

Circuitos retificadores, sejam eles controlados (com uso de tiristores) ou não controlados (com diodos), são responsáveis por fornecer a tensão DC necessária para alimentar motores, carregar baterias e suprir a lógica de sistemas digitais. Contudo, a presença de elementos reativos na carga, como indutores, introduz complexidades que afetam a qualidade da energia, o fator de potência e o desempenho do conversor, como visto no fenômeno do ângulo de extinção da corrente.

Objetivo do Trabalho:

O presente trabalho tem como objetivo central aprofundar a compreensão sobre o comportamento dos retificadores de potência.

A abordagem será dupla, unindo o rigor teórico à validação prática:

1. **Análise Analítica:** Deduzir e aplicar as equações diferenciais para calcular parâmetros críticos, como a corrente instantânea na carga e o *ângulo de extinção* (β).
2. **Simulação Computacional:** Utilizar *softwares* de simulação (e.g., MATLAB/Simulink e PSIM) para validar os resultados analíticos, permitindo a visualização das formas de onda e a medição precisa dos parâmetros em regime.

Esta união de **cálculo analítico** e **simulação** é essencial na engenharia moderna, garantindo que o projeto e a análise de conversores de potência sejam robustos, precisos e eficientes. O trabalho prossegue com a metodologia de cálculo, a descrição do modelo de simulação e a discussão dos resultados comparativos.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 QUESTÃO 1 - RETIFICADORES A DIODO COM CARGA RESISTIVA

Para a medição de todos os valores necessários, foram utilizados os cursores do PSIM juntamente com o gráfico de simulação. Conforme apresentado no Anexo A.1, é possível observar a janela do software exibindo diversas características da forma de onda medida. Como pode ser observado no Anexo A.1, os valores apresentados encontram-se em uma formatação pouco adequada para análise direta. Dessa forma, optou-se por transferi-los para a calculadora do PSIM, a fim de aprimorar a visualização dos dados e possibilitar a realização de operações matemáticas com valores exatos, como visto no Anexo A.2.

Para a Questão 1, foram utilizados os parâmetros apresentados no Anexo A.6, juntamente com o tempo de simulação indicado no Anexo A.7, o qual é suficiente para representar adequadamente um sinal com período correspondente a dois ciclos da frequência da rede.

2.1.1 Tensão Média e Eficaz na Carga

2.1.1.1 PSIM

Para a aferição da corrente e da tensão na carga, foi montado, no PSIM, o circuito apresentado no Anexo A.5, o qual serviu como base para todas as medições realizadas durante a Questão 1, apenas alterando o circuito solicitado. O formato de onda da tensão e da corrente na carga estão referenciados nos Anexos A.4 e A.3 (Retificador Monofásico)

2.1.1.2 Analítico

2.1.1.2.1 Meia-onda monofásico.

$$v_o(t) = \begin{cases} V_m \sin \omega t, & 0 \leq \omega t < \pi, \\ 0, & \pi \leq \omega t < 2\pi, \end{cases}$$

$$V_{DC} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_o(t) d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_m \sin \theta d\theta = \frac{V_m}{\pi},$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_o^2(t) d(\omega t)} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_m^2 \sin^2 \theta d\theta} = \frac{V_m}{2}.$$

2.1.1.2.2 Onda completa monofásico — ponte de diodos.

$$v_o(t) = |V_m \sin \omega t|,$$

$$V_{DC} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} |V_m \sin \theta| d\theta = \frac{2V_m}{\pi},$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_m^2 \sin^2 \theta d\theta} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}.$$

2.1.1.2.3 Onda completa monofásico com TAP central.

(Se V_m é o pico de cada meia-bobina:) $V_{DC} = \frac{2V_m}{\pi}, \quad V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}.$

2.1.1.2.4 Retificador trifásico de ponto-médio (3 diodos, carga resistiva).

$$v_a = V_m \sin \omega t, \quad v_b = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}), \quad v_c = V_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}),$$

$$v_o(t) = \max\{v_a(t), v_b(t), v_c(t)\},$$

$$V_{DC} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_o(t) d(\omega t) = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \approx 0.8269933431 V_m,$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_o^2(t) d(\omega t)} \approx 0.8406832553 V_m.$$

2.1.1.2.5 Retificador trifásico seis-pulsos.

$$v_o(t) = (\max\{v_a, v_b, v_c\} - \min\{v_a, v_b, v_c\}),$$

$$V_{DC} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_o(t) d(\omega t) = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \approx 1.6539866863 V_m,$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_o^2(t) d(\omega t)} \approx 1.6554425434 V_m.$$

2.1.2 Ondulação de Tensão e Corrente na carga

2.1.2.1 PSIM

O fator de ripple (r) foi calculado a partir da razão entre a componente alternada e a componente contínua da tensão de saída, conforme a expressão (1). Os cálculos foram realizados na calculadora do PSIM, e os valores estão disponibilizados na simulação conforme o Anexo A.1:

Para a corrente na carga, o processo a simular, trocando os valores de tensão da (1) por corrente.

2.1.2.2 Analítico

$$r = \sqrt{\left(\frac{V_{rms}}{V_{DC}}\right)^2 - 1} \quad (1)$$

Onde:

- V_{rms} é o valor eficaz da tensão na carga;
- V_{DC} é o valor médio (componente contínua) da tensão.

2.1.3 Fator de Potência da Fonte

2.1.3.1 PSIM

Para a verificação do fator de potência na fonte, foi empregada a função de medição de fator de potência (*Power Factor*) disponível no quadro de medição apresentado no Anexo A.1. A aferição foi realizada a partir das formas de onda de tensão e corrente da carga. O formato das ondas do fonte (para o Retificador Monofásico) está referenciado no Anexo A.9

2.1.3.2 Analítico

2.1.3.2.1 Meia-onda monofásico.

$$PF = \frac{I_1}{I_{rms}} = \frac{\frac{V_m}{2R} \sqrt{\frac{8}{\pi^2}}}{\frac{V_m}{2R}} = \sqrt{\frac{8}{\pi^2}}.$$

2.1.3.2.2 Onda completa monofásico — ponte de diodos.

$$PF = \frac{I_1}{I_{rms}} = \frac{\frac{2V_m}{\pi R}}{\frac{V_m}{\sqrt{2}R}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}.$$

2.1.3.2.3 Onda completa monofásico com TAP central.

$$PF = \frac{I_1}{I_{rms}} = \frac{\frac{2V_m}{\pi R}}{\frac{V_m}{\sqrt{2}R}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}.$$

2.1.3.2.4 Retificador trifásico de ponto-médio.

$$PF = \frac{I_1}{I_{rms}} = \frac{I_{fundamental}}{I_{rms}} = \frac{I_1}{I_{rms}}.$$

2.1.3.2.5 Retificador trifásico seis-pulsos.

$$PF = \frac{I_1}{I_{rms}} = \frac{I_{fundamental}}{I_{rms}} = \frac{I_1}{I_{rms}}.$$

2.1.4 THD da Corrente de Entrada

2.1.4.1 PSIM

Para a THD (Taxa de Distorção Harmônica) da corrente de entrada temos um processo parecido ao item anterior.

2.1.4.2 Analítico

2.1.4.2.1 Meia-onda monofásico.

$$THD = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_1^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{\left(\frac{V_m}{2R}\right)^2 - \left(\frac{V_m}{2R}\right)^2 \frac{8}{\pi^2}}}{\frac{V_m}{2R} \sqrt{\frac{8}{\pi^2}}}.$$

2.1.4.2.2 Onda completa monofásico — ponte de diodos.

$$THD = \sqrt{\frac{V_{rms}^2}{V_1^2} - 1} = \sqrt{\frac{\left(\frac{V_m}{\sqrt{2}}\right)^2}{\left(\frac{2V_m}{\pi}\right)^2} - 1}.$$

2.1.4.2.3 Onda completa monofásico com TAP central.

$$\text{THD} = \sqrt{\frac{V_{\text{rms}}^2}{V_1^2} - 1} = \sqrt{\frac{\left(\frac{V_m}{\sqrt{2}}\right)^2}{\left(\frac{2V_m}{\pi}\right)^2} - 1}.$$

2.1.4.2.4 Retificador trifásico de ponto-médio.

$$\text{THD} = \sqrt{\frac{V_{\text{rms}}^2}{V_1^2} - 1} = \sqrt{\frac{V_{\text{rms}}^2}{V_1^2} - 1}.$$

2.1.4.2.5 Retificador trifásico seis-pulsos.

$$\text{THD} = \sqrt{\frac{V_{\text{rms}}^2}{V_1^2} - 1} = \sqrt{\frac{V_{\text{rms}}^2}{V_1^2} - 1}.$$

2.1.5 Tensão Máxima e Corrente Média do Diodo

2.1.5.1 PSIM

Para Tensão Máxima e Corrente Média do diodo temos um processo parecido aos itens anteriores. Só que conforme a característica da curva tensão-corrente do diodo, mostrada no anexo A.8, o diodo apenas comporta tensão negativa, assim o valor aferido no Anexo A.10 foi multiplicado por -1 (Retificador Monofásico). Esta inversão sempre ocorrerá em caso de tensões negativas, para facilitar visualização e comparação.

2.1.5.2 Analítico

2.1.5.2.1 Meia-onda monofásico.

$$V_D^{\text{max}} = V_m,$$

$$I_D^{\text{avg}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \frac{V_m \sin \theta}{R} d\theta = \frac{V_m}{2\pi R} \int_0^\pi \sin \theta d\theta = \frac{V_m}{\pi R}.$$

2.1.5.2.2 Onda completa monofásico — ponte de diodos.

$$V_D^{\max} = V_m,$$

$$I_D^{\text{avg}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \frac{V_m \sin \theta}{R} d\theta = \frac{V_m}{\pi R}.$$

2.1.5.2.3 Onda completa monofásico com TAP central.

$$V_D^{\max} = V_m \quad (\text{pico de cada semi-bobina}),$$

$$I_D^{\text{avg}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \frac{V_m \sin \theta}{R} d\theta = \frac{V_m}{\pi R}.$$

2.1.5.2.4 Retificador trifásico de ponto-médio.

$$V_D^{\max} = V_m,$$

$$I_D^{\text{avg}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi/3} \frac{V_m \sin \theta}{R} d\theta = \frac{V_m}{2\pi R} \int_0^{2\pi/3} \sin \theta d\theta.$$

2.1.5.2.5 Retificador trifásico seis-pulsos.

$$V_D^{\max} = V_{LL}^{\text{peak}} = \sqrt{2} V_{LL,\text{rms}},$$

$$I_D^{\text{avg}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi/3} \frac{V_{ab}(t)}{R} d(\omega t) = \frac{1}{2\pi R} \int_0^{\pi/3} V_{ab}(t) d(\omega t),$$

onde $V_{ab}(t)$ é a tensão linha a linha que alimenta o diodo.

2.1.6 Potência Aparente do Transformador

2.1.6.1 PSIM

Para a Potência Aparente no Transformador foi utilizada a ferramenta do Anexo A.1, que já mede Potência Aparente, para as curvas de Tensão e Corrente da fonte, uma vez que a relação de transformação é 1:1. Para o trifásico de ponto médio multiplica-se por 3, e para a ponte de Graetz multiplica por $3 * \sqrt{3}$ (por conta da escolha da tensão de entrada da fonte).

2.1.6.2 Analítico

2.1.6.2.1 Meia-onda monofásico.

$$S = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}}.$$

2.1.6.2.2 Onda completa monofásico — ponte de diodos.

$$S = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}}.$$

2.1.6.2.3 Onda completa monofásico com TAP central.

$$S = V_{\text{rms}} I_{\text{rms}}.$$

2.1.6.2.4 Retificador trifásico de ponto-médio.

$$S = \sqrt{3} V_{L,\text{rms}} I_{L,\text{rms}} \quad (\text{trifásico, linha a linha}),$$

ou, se preferir em termos de fase:

$$S = 3 V_{\text{rms,ph}} I_{\text{rms,ph}}.$$

2.1.6.2.5 Retificador trifásico seis-pulsos.

$$S = \sqrt{3} V_{L,\text{rms}} I_{L,\text{rms}} \quad (\text{trifásico, linha a linha}),$$

ou em termos de fase:

$$S = 3 V_{\text{rms,ph}} I_{\text{rms,ph}}.$$

2.2 QUESTÃO 2 - RETIFICADOR MONOFÁSICO A DIODO COM FILTRO CAPACITIVO

2.2.1 Análise da Ondulação da Tensão de Saída (Ripple)

O circuito em estudo é o retificador monofásico de onda completa (ponte) com filtro capacitivo e carga resistiva R_L .

2.2.1.1 Retificador sem Capacitor (Puro)

Sem o capacitor de filtro, a tensão de saída $v_o(t)$ é a própria tensão de entrada retificada, com o valor mínimo em 0 V.

- $V_{C,max} = V_p = 220 \cdot \sqrt{2} \approx 311.12 \text{ V}$.
- $V_{C,min} = 0 \text{ V}$.
- Ripple: $DV_{\text{semC}} \approx 311.12 \text{ V}$. O ripple é de 100% da tensão de pico (ou $\approx 157\%$ em relação à tensão média do retificador puro, $V_{o,avg} \approx 198 \text{ V}$).

2.2.1.2 Regime Permanente com Capacitor

O capacitor suaviza a tensão. A tensão de saída $v_o(t)$ é $v_C(t)$.

1. **Período de Condução (Recarga, t_c):** Ocorre até $V_{C,max} \approx 311.12 \text{ V}$.
2. **Período de Descarga (Δt_d):** A tensão decai **exponencialmente** segundo a lei de descarga RC :

$$v_C(t) = V_{C,max} \cdot e^{-t/\tau} \quad \text{onde } \tau = R_L \cdot C$$

2.2.1.3 Definição do Ripple

A ondulação de pico a pico, ΔV , é a diferença entre a tensão máxima e a mínima do capacitor:

$$\Delta V = V_{C,max} - V_{C,min}$$

2.2.2 Metodologia de Projeto Precisa do Capacitor (Ripple $DV \rightarrow 0 \text{ V}$)

O projeto para 0% de ripple ($\Delta V_{max} = 0 \text{ V}$) implica teoricamente em uma capacitância infinita ($C \rightarrow \infty$). Na prática, projetaremos para uma ondulação mínima tecnologicamente viável, garantindo o "mínimo erro possível" com a maior precisão analítica. O método simplificado de projeto assume que a descarga do capacitor é linear. A metodologia proposta minimiza o erro tratando a descarga como exponencial e calculando o tempo de descarga exato.

2.2.2.1 Dados de Exemplo para a Mínima Ondulação

Utilizaremos a carga nominal de $P_{nom} = 10 \text{ W}$, resultando em $R_{L,min} \approx 8780 \Omega$. Como $\Delta V \rightarrow 0$, teremos $V_{o,med} \approx V_{C,max} \approx 311.12 \text{ V}$. * Corrente Nominal: $I_{o,nom} \approx 10 \text{ W}/311.12 \text{ V} \approx 32.14 \text{ mA}$.

2.2.2.2 Análise da Tendência (Projeto para $\Delta V_{max} \rightarrow 0$ V)

2.2.2.2.1 Análise da Equação

A capacitância é dada por:

$$C_{prop} = -\frac{\Delta t_d}{R_{L,min} \cdot \ln\left(\frac{V_{C,min}}{V_{C,max}}\right)}$$

Para $\Delta V \rightarrow 0$, temos $V_{C,min} \rightarrow V_{C,max}$. Assim, o termo $\frac{V_{C,min}}{V_{C,max}} \rightarrow 1$, e $\ln(1) \rightarrow 0$. O denominador tende a zero, forçando C_{prop} a tender ao infinito: $C_{prop} \rightarrow \infty$. Para atingir 0% de ripple, é necessário um capacitor de valor infinito, ou seja, uma fonte de tensão ideal. O projeto prático exige o uso de reguladores de tensão após o filtro para atingir um ripple próximo de zero.

2.3 QUESTÃO 3 - PROJETO DO RETIFICADOR HÍBRIDO MONOFÁSICO COM FILTRO CAPACITIVO DE 5 KW

O projeto visa dimensionar um retificador de onda completa híbrido (dois díodos e dois tiristores - SCRs) com filtro capacitivo, considerando uma rede elétrica de 220 V eficazes e as características não-ideais dos componentes.

2.3.1 Parâmetros de Entrada e Saída

Os parâmetros iniciais e calculados são:

- Potência de Saída (P_o): 5000 W
- Tensão de Entrada (eficaz) ($V_{in,rms}$): 220 V
- Frequência (f): 60 Hz
- Tensão de Pico na Entrada (V_p):

$$V_p = V_{in,rms} \cdot \sqrt{2} = 220 \text{ V} \cdot \sqrt{2} \approx 311.13 \text{ V}$$

- Ondulação Máxima Aceita (ΔV_o): 10% sobre o pico.

$$\Delta V_{o,max} = 0.10 \cdot V_p \approx 31.11 \text{ V}$$

- Tensão Média de Saída Nominal (V_o):

$$V_o \approx V_p - \frac{\Delta V_{o,max}}{2} \approx 311.13 \text{ V} - 15.56 \text{ V} \approx 295.57 \text{ V}$$

- Corrente Média de Saída (I_o):

$$I_o = \frac{P_o}{V_o} = \frac{5000 \text{ W}}{295.57 \text{ V}} \approx 16.92 \text{ A}$$

- Resistência de Carga Nominal (R_{carga}):

$$R_{carga} = \frac{V_o}{I_o} \approx \frac{295.57 \text{ V}}{16.92 \text{ A}} \approx 17.47 \text{ W}$$

2.3.2 Projeto do Capacitor de Filtro

O cálculo da capacitância mínima utiliza a aproximação linear (descarga constante), adequada para o dimensionamento inicial de retificadores com filtro capacitivo:

$$C \geq \frac{I_o}{2 \cdot f \cdot \Delta V_{o,\max}}$$

$$C \geq \frac{16.92 \text{ A}}{2 \cdot 60 \text{ Hz} \cdot 31.11 \text{ V}} \approx 4.524 \times 10^{-3} \text{ F} = 4524 \text{ mF}$$

2.3.2.1 Escolha do Capacitor Comercial e Arranjo

- A tensão nominal do capacitor deve ser maior que V_p mais uma margem de segurança (mínimo de $1.2 \cdot V_p \approx 373.36 \text{ V}$).
- Capacitor Unitário Escolhido: 470 mF/400 V.
- Número de Capacitores em Paralelo (N_p):

$$N_p = \lceil \frac{C_{\text{necessário}}}{C_{\text{unitário}}} \rceil = \lceil \frac{4524 \mu\text{F}}{470 \mu\text{F}} \rceil = 10 \text{ capacitores}$$

- Capacitância Final: $C_{\text{final}} = 10 \cdot 470 \mu\text{F} = 4700 \text{ mF}$.

2.3.2.2 Resistência Série Equivalente (ESR)

Assumindo um valor de ESR unitário (Low ESR) de 0.2Ω , a ESR do arranjo é:

$$R_{\text{esr}} = \frac{R_{\text{esr,unit}}}{N_p} = \frac{0.2 \Omega}{10} = 0.02 \Omega$$

2.3.3 Projeto dos Semicondutores e Dissipadores

O retificador exige 2 Díodos e 2 Tiristores (SCRs).

2.3.3.1 Especificações

- Tensão de Bloqueio Mínima: $V_{RRM}, V_{DRM} > 2.0 \cdot V_p \approx 622.26 \text{ V}$. Dispositivos de 800 V são escolhidos.
- Corrente Eficaz Mínima por dispositivo (Estimativa Conservadora): $I_{\text{rms}} \approx 2 \cdot I_{\text{avg}} \approx 2 \cdot (I_o/2) \approx 16.92 \text{ A}$.

2.3.3.2 Escolha dos Componentes Comerciais e Não-Idealidades

Parâmetro	Tiristor (SCR) - 25TTS08	Diodo - 30ETH08
V_{RRM}/V_{DRM}	800 V	800 V
$I_{T,rms}/I_{F,rms}$	25 A	30 A
Tensão de Condução (V_{on})	$V_{SCR} \approx 1.5$ V	$V_D \approx 1.2$ V
Resistência Dinâmica (R_{on})	$R_{SCR} \approx 0.015$ Ω	$R_D \approx 0.010$ Ω
R_{jc} (Junta-Cápsula)	0.6°C/W	0.5°C/W

2.3.3.3 Projeto do Dissipador de Calor

O modelo térmico é representado pelo circuito elétrico em série, onde a temperatura é análoga à tensão e a potência dissipada é análoga à corrente:

$$T_j = T_a + P_d \cdot (R_{jc} + R_{cd} + R_{da})$$

O dimensionamento é feito para o pior caso (Tiristor), usando a corrente $I_{rms} \approx 16.92$ A e $I_{avg} \approx 8.46$ A.

- Potência Dissipada (P_d):

$$P_{d,SCR} \approx V_{SCR} \cdot I_{avg} + R_{SCR} \cdot I_{rms}^2$$

$$P_{d,SCR} \approx 1.5 \text{ V} \cdot 8.46 \text{ A} + 0.015 \Omega \cdot (16.92 \text{ A})^2 \approx 17.0 \text{ W}$$

- Resistência Térmica Máxima Dissipador-Ambiente (R_{da}): Adotando $T_{j,max} = 125^\circ\text{C}$, $T_a = 40^\circ\text{C}$ e $R_{cd} \approx 0.2^\circ\text{C/W}$.

$$R_{da} \leq \frac{T_{j,max} - T_a}{P_d} - R_{jc} - R_{cd}$$

$$R_{da} \leq \frac{125^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}}{17.0 \text{ W}} - 0.6^\circ\text{C/W} - 0.2^\circ\text{C/W} \approx 4.2^\circ\text{C/W}$$

- Dissipador Comercial: Será utilizado um dissipador com $R_{da} \leq 4.2^\circ\text{C/W}$, por exemplo, um modelo de aletas de alumínio extrudado com $R_{da} = 3.5^\circ\text{C/W}$.

2.3.4 Projeto da Partida Suave e Transformador

2.3.4.1 Impedância do Transformador

- $S_{nom} = 50$ kVA, $\%V_z = 5\%$, $V_{in,rms} = 220$ V, $X/R = 10$.
- Impedância Base: $Z_{base} = \frac{220^2}{50000} = 0.968$ Ω .
- Impedância Total: $Z = 0.05 \cdot Z_{base} = 0.0484$ Ω .
- Componente Resistivo (R_{transf}) e Indutivo (L_{transf}):

$$R_{transf} = \frac{Z}{\sqrt{1 + (X/R)^2}} = \frac{0.0484}{\sqrt{101}} \approx 0.0048 \text{ W}$$

$$L_{transf} = \frac{X}{2\pi f} = \frac{10 \cdot R_{transf}}{2\pi \cdot 60} \approx 127 \text{ mH}$$

2.3.4.2 Limitação da Corrente de Partida

O pico da corrente de entrada não deve exceder 20% do valor de pico em regime.

- Corrente de Pico Estimada em Regime: $I_{\text{pico,reg}} \approx 5 \cdot I_{\text{in,rms}} \approx 5 \cdot 25.25 \text{ A} \approx 126.25 \text{ A}$.
- Corrente de Pico Máxima na Partida: $I_{\text{pico,max}} = 0.20 \cdot 126.25 \text{ A} \approx 25.25 \text{ A}$.

2.3.4.3 Estratégia de Partida Suave

A partida é controlada pelos Tiristores (SCRs) através da variação do ângulo de disparo (α) de um valor alto para um valor baixo ($\alpha_{\text{final}} \approx 5^\circ$) em $T_{\text{partida}} = 5 \text{ s}$.

O ângulo de disparo inicial (α_{start}) é definido para limitar o surto de corrente:

$$\alpha_{\text{start}} \approx \arcsin \left(\frac{I_{\text{pico,max}} \cdot R_{\text{total}}}{V_p} \right)$$

Onde $R_{\text{total}} = R_{\text{transf}} + R_{\text{SCR}} + R_{\text{esr}} \approx 0.0398 \Omega$.

$$\alpha_{\text{start}} \approx \arcsin \left(\frac{25.25 \text{ A} \cdot 0.0398 \Omega}{311.13 \text{ V}} \right) \approx 0.185^\circ$$

Dado o baixo valor de R_{total} , o ângulo α_{start} é muito pequeno, indicando a dominância da resistência no transitório. Para um controle prático, a estratégia é usar uma variação linear no tempo:

$$\alpha(t) = \alpha_{\text{start}} - (\alpha_{\text{start}} - \alpha_{\text{final}}) \cdot \frac{t}{T_{\text{partida}}}$$

Onde α_{start} é assumido como 150° para garantir a limitação inicial (valor seguro) e $\alpha_{\text{final}} = 5^\circ$.

2.3.5 Configuração do Modelo Não-Ideal no PSIM

Para simular o sistema, o software PSIM deve utilizar os modelos não-ideais:

- **Semicondutores:** Utilizar o modelo de Díodo/Tiristor com Tensão de Condução (V_{on}) e Resistência Dinâmica (R_{on}) para modelar as perdas por condução.
- **Capacitor:** Modelar o capacitor com a $R_{\text{esr}} = 0.02 \Omega$ em série.
- **Transformador:** Utilizar o componente Transformer (Single-Phase) e distribuir a impedância de curto-circuito (Z) entre os enrolamentos Primário (W_1) e Secundário (W_2), assumindo $N_1 : N_2 = 1 : 1$:

$$- R_1 = R_2 = R_{\text{transf}}/2 = 0.0024 \Omega$$

$$- L_{/1} = L_{/2} = L_{\text{transf}}/2 = 63.5 \mu\text{H}$$

$$- \text{Parâmetros de Magnetização (Típicos): } L_m = 1 \text{ H e } R_c = 10 \text{ k}\Omega.$$

2.4 QUESTÃO 4 - ANÁLISE DO RETIFICADOR TRIFÁSICO A TIRISTOR COM CARGA RLE

O problema aborda a análise de um retificador trifásico de seis pulsos com carga resistiva, indutiva e força contra-eletromotriz (RLE), característico da operação de acionamento de máquinas.

2.4.1 Parâmetros de Referência e Derivados

Os parâmetros do circuito são: $R = 2 \, \Omega$, $L = 25 \, \text{mH}$, $E = 250 \, \text{V}$, $V_{LL,\text{rms}} = 380 \, \text{V}$. Assumindo $f = 60 \, \text{Hz}$.

- Tensão de Pico de Linha (V_p):

$$V_p = V_{LL,\text{rms}} \cdot \sqrt{2} = 380 \, \text{V} \cdot \sqrt{2} \approx 537.4 \, \text{V}$$

- Velocidade Angular (ω): $\omega = 2\pi f \approx 377 \, \text{rad/s}$
- Reatância e Impedância da Carga (X_L, Z):

$$X_L = \omega L \approx 9.425 \, \Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \approx 9.636 \, \Omega$$

- Ângulo de Impedância (φ):

$$\varphi = \arctan\left(\frac{X_L}{R}\right) \approx 78.0^\circ \text{ (ou } 1.36 \text{ rad)}$$

2.4.2 Algoritmo para o Cálculo do Ângulo de Extinção (β)

O ângulo de extinção (β) define o ponto onde a corrente de saída instantânea (i_o) se anula após o disparo do Tiristor.

2.4.2.1 Equação Fundamental da Corrente Instantânea

Para a condução descontínua (assumindo $i_o(\alpha + \pi/6) = 0$), a corrente instantânea $i_o(\omega t)$ no intervalo de condução é:

$$i_o(\omega t) = \frac{V_p}{Z} \left[\sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha + \pi/6 - \varphi) e^{-(\omega t - \alpha - \pi/6)/\omega\tau} \right] - \frac{E}{R} \left[1 - e^{-(\omega t - \alpha - \pi/6)/\omega\tau} \right]$$

Onde $\omega\tau = \omega L/R$ e α é o ângulo de disparo em radianos.

2.4.2.2 Algoritmo para Encontrar β

O ângulo de extinção (β , medido a partir do mesmo zero que α) é encontrado ao resolver numericamente a equação $i_o(\beta + \pi/6) = 0$. Seja $\gamma = \beta + \pi/6$.

$$f(\gamma) = \frac{V_p}{Z} \left[\sin(\gamma - \varphi) - A \cdot e^{-(\gamma - \alpha - \pi/6)/\omega\tau} \right] - \frac{E}{R} \left[1 - e^{-(\gamma - \alpha - \pi/6)/\omega\tau} \right] = 0$$

Onde $A = \sin(\alpha + \pi/6 - \varphi)$.

O **Algoritmo** utiliza o método de **Bisseção** (ou *fzero* no MATLAB) para buscar a raiz γ no intervalo $(\alpha + \pi/6, 2\pi)$. O ângulo de extinção final é $\beta = \gamma - \pi/6$. O algoritmo e seu plot estão referenciados no Anexo B.

2.4.3 Análise do Modo de Operação e Condução Crítica

2.4.3.1 Modo de Operação com $\alpha = 30^\circ$

Calculamos a tensão média de saída sob a hipótese de condução contínua:

$$V_{o,\text{cont}} = \frac{3V_p}{\pi} \cos(\alpha) = \frac{3 \cdot 537.4 \text{ V}}{\pi} \cos(30^\circ) \approx 444.6 \text{ V}$$

A corrente média é:

$$I_{o,\text{cont}} = \frac{V_{o,\text{cont}} - E}{R} = \frac{444.6 \text{ V} - 250 \text{ V}}{2 \Omega} \approx 97.3 \text{ A}$$

Como $I_{o,\text{cont}} > 0$, o modo de operação é de **Condução Contínua**. O ângulo de extinção é $\beta = \alpha + 60^\circ = 90^\circ$.

2.4.3.2 Ângulo de Disparo para Condução Crítica (α_{crit})

A condução crítica ocorre no limite entre a condução contínua e descontínua, onde $V_o = E$ (e $I_o = 0 \text{ A}$).

$$V_{o,\text{cont}} = E \implies \frac{3V_p}{\pi} \cos(\alpha_{\text{crit}}) = E$$

$$\cos(\alpha_{\text{crit}}) = \frac{\pi E}{3V_p} = \frac{\pi \cdot 250 \text{ V}}{3 \cdot 537.4 \text{ V}} \approx 0.4859$$

$$\alpha_{\text{crit}} = \arccos(0.4859) \approx 60.9^\circ$$

O conversor opera em condução crítica (ou limite) com $\alpha_{\text{crit}} \approx 60.9^\circ$.

2.5 QUESTÃO 5 - ANÁLISE TÉRMICA DE UM DIODO DE POTÊNCIA COM DISSIPADOR

2.5.1 Dados Coletados e Princípio Geral

A potência dissipada no diodo é $P_D = 12 \text{ W}$. Utilizaremos a Resistência Térmica Junção-Caixa máxima ($R_{\theta JC} = 1.3 \text{ }^\circ\text{C/W}$) e a Resistência Caixa-Dissipador típica ($R_{\theta CS} = 0.5 \text{ }^\circ\text{C/W}$). A temperatura máxima de junção a ser mantida é $T_{J(\text{Max})} = 130^\circ\text{C}$. O princípio da análise térmica é dado por:

$$T_J = T_A + P_D \cdot (R_{\theta JC} + R_{\theta CS} + R_{\theta SA})$$

2.6 QUESTÃO 6 - CÁLCULO DA INDUTÂNCIA (L) PARA ÂNGULO DE EXTINÇÃO $\beta = 270^\circ$

2.6.1 Dados e Parâmetros Iniciais

Os dados fornecidos são:

- Tensão de Entrada de Pico: $V_p = 250 \text{ V}$
- Frequência: $f = 60 \text{ Hz}$
- Resistência de Carga: $R = 10 \Omega$
- Ângulo de Extinção Desejado: $\beta = 270^\circ = \frac{3\pi}{2} \text{ rad}$
- Frequência Angular: $\omega = 2\pi f = 120\pi \text{ rad/s}$

O objetivo é encontrar o valor da indutância L .

2.6.2 Equação Transcendental do Ângulo de Extinção

A corrente instantânea $i(\omega t)$ no retificador de meia-onda com carga $R - L$ é dada por:

$$i(\omega t) = \frac{V_p}{Z} \left[\sin(\omega t - \varphi) + \sin(\varphi) e^{-(\omega t)/\tan \varphi} \right]$$

O ângulo de extinção β é o ponto onde $i(\beta) = 0$. Isso leva à equação transcendental:

$$\sin(\beta - \varphi) = -\sin(\varphi) e^{-\beta/\tan \varphi}$$

Onde $\varphi = \arctan(\frac{\omega L}{R})$ e $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$.

2.6.3 Substituição e Simplificação

Substituindo $\beta = \frac{3\pi}{2}$ na equação e utilizando a identidade trigonométrica $\sin(\frac{3\pi}{2} - \varphi) = -\cos(\varphi)$:

$$\sin\left(\frac{3\pi}{2} - \varphi\right) = -\sin(\varphi) e^{-(3\pi/2)/\tan \varphi}$$

$$-\cos(\varphi) = -\sin(\varphi)e^{-(3\pi/2)/\tan \varphi}$$

Dividindo por $\cos(\varphi)$ e simplificando:

$$1 = \tan(\varphi)e^{-(3\pi/2)/\tan \varphi}$$

Seja $X = \tan(\varphi)$, a equação a ser resolvida numericamente é:

$$\frac{1}{X} = e^{-(3\pi/2)/X} \implies \ln(X) = \frac{3\pi}{2X}$$

2.7 QUESTÃO 7 - CÁLCULO DA INDUTÂNCIA (L) PARA RETIFICADOR MONOFÁSICO DE ONDA COMPLETA CONTROLADO

2.7.1 Dados do Sistema e Condição Limite

O sistema possui os seguintes parâmetros:

- Tensão de Pico: $V_p = 250 \text{ V}$
- Frequência Angular: $\omega = 120\pi \text{ rad/s}$ ($f = 60 \text{ Hz}$)
- Resistência: $R = 10 \Omega$
- Ângulo de Disparo: $\alpha = 60^\circ = \frac{\pi}{3} \text{ rad}$
- Ângulo de Extinção Desejado: $\beta = 180^\circ = \pi \text{ rad}$

A condição $\beta = \pi$ com $\alpha = \frac{\pi}{3}$ estabelece um ângulo de condução de 120° e caracteriza uma operação descontínua.

2.7.2 Equação de Extinção da Corrente

A equação transcendental para o ângulo de extinção β em um retificador controlado com carga $R - L$ é:

$$\sin(\beta - \varphi) = \sin(\alpha - \varphi) \cdot e^{-(\beta - \alpha)/\tan \varphi} \quad (2)$$

Onde $\varphi = \arctan(\frac{\omega L}{R})$.

2.7.3 Solução Numérica para $\tan(\varphi)$

Substituindo $\alpha = \frac{\pi}{3}$ e $\beta = \pi$ na Equação ((2)):

$$\sin(\pi - \varphi) = \sin(\frac{\pi}{3} - \varphi) \cdot e^{-(\pi - \pi/3)/\tan \varphi}$$

Utilizando $\sin(\pi - \varphi) = \sin(\varphi)$ e $(\beta - \alpha) = \frac{2\pi}{3}$, a equação é:

$$\sin(\varphi) = \sin(\frac{\pi}{3} - \varphi) \cdot e^{-(2\pi/3)/\tan \varphi}$$

Ao dividir por $\cos(\varphi)$ e usar $X = \tan(\varphi)$, chegamos à forma resolúvel:

$$X = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{X}{2} \right) \cdot e^{-(2\pi/3)/X} \quad (3)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 QUESTÃO 1 - RETIFICADORES A DIODO COM CARGA RESISTIVA

Para o retificador trifásico de ponto médio, a Tensão a ser configurada na fonte trifásica e a tensão do arquivo do Anexo A.6 se relacionam pela seguinte expressão:

$$V_{rms} = \frac{V_{in}}{\sqrt{2}} * \sqrt{3} \quad (4)$$

Para a Ponte de Graetz, a Tensão a ser configurada na fonte trifásica e a tensão do arquivo do Anexo A.6 se relacionam pela seguinte expressão:

$$V_{rms} = \frac{V_{in}}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

Assim, chegando na tensão de linha igual a V_{in}

Todos os circuitos simulados estão montados no arquivo referenciado no Anexo A.11, bem como os códigos estão referenciados no Anexo B. São vários códigos rodando ao mesmo tempo em matlab para cálculo simultâneo de valores.

3.1.1 Tensão Média e Eficaz na carga

Retificador	Eficaz (PSIM)	Eficaz (Cálculo)	Média (PSIM)	Média (Cálculo)
Meia-onda	189,85 V	190 V	120,82 V	120,96 V
Onda-completa	265,74 V	268,7 V	240,21 V	241,92 V
Onda-completa (TAP)	265,6 V	268,7 V	240,34 V	241,92 V
Trifásico ponto médio	314,09 V	319,18 V	308,39 V	313,99 V
Ponte de Graetz	363,17(*1,65) V	628,52 V	362,85 (*1,65)V	627,97 V

3.1.2 Corrente Média e Eficaz na carga

Retificador	Eficaz (PSIM)	Eficaz (Calc.)	Média (PSIM)	Média (Calc.)
Meia-onda	19,00 A	19 A	12,10 A	12,096 A
Onda-completa	26,57 A	26,87 A	24,04 A	24,192 A
Onda-completa (TAP)	26,58 A	26,87 A	24,04 A	24,192 A
Trifásico ponto médio	31,41 A	31,92 A	30,84 A	31,39 A
Ponte de Graetz	36,32 A (*1,65)	62,852 A	36,28 A (*1,65)	62,797 A

3.1.3 Ripple na Carga

Retificador	Tensão (PSIM)	Tensão (Calc.)	Corrente (PSIM)	Corrente (Calc.)
Meia-onda	112,06 %	121,14 %	112,06 %	121,14 %
Onda-completa	47,11 %	48,343 %	47,11 %	48,343 %
Onda-completa (TAP)	47,13 %	48,343 %	47,13 %	48,343 %
Trifásico ponto médio	19,31 %	18,27 %	19,31 %	18,27 %
Ponte de Graetz	4,2 %	4,19 %	4,2 %	4,19 %

3.1.4 Fator de Potência da Fonte

Retificador	PSIM	Calculado
Meia-onda	0,68	0,71
Onda-completa	0,99	1
Onda-completa (TAP)	0,94	1
Trifásico ponto médio	0,69	0,68
Ponte de Graetz	0,95	0,95

3.1.5 THD Corrente de Entrada

Retificador	PSIM	Calculado
Meia-onda	1,13	1
Onda-completa	0,075	0
Onda-completa (TAP)	0,58	0,48
Trifásico ponto médio	1,06	0,81
Ponte de Graetz	0,31	0,31

3.1.6 Tensão máxima e corrente média nos diodos

3.1.6.1 Meia-onda

Diodo	Tensão Máx. (PSIM)	Tensão Máx. (Calc.)	Corr. Méd.(PSIM)	Corr. Méd. (Calc.)
D1	379,93 V	380 V	12,10 A	12,1 A

3.1.6.2 Onda Completa

Diodo	Tensão Máx. (PSIM)	Tensão Máx. (Calc.)	Corr. Méd.(PSIM)	Corr. Méd. (Calc.)
D1	379,86 V	380 V	12,84 A	12,1 A
D2	379,86 V	380 V	11,20 A	12,1 A
D3	379,86 V	380 V	11,20 A	12,1 A
D4	379,86 V	380 V	12,84 A	12,1 A

3.1.6.3 Onda Completa (TAP)

Diodo	Tensão Máx. (PSIM)	Tensão Máx. (Calc.)	Corr. Méd.(PSIM)	Corr. Méd. (Calc.)
D1	759,86 V	760 V	12,1 A	12,1 A
D2	759,86 V	760 V V	12,1 A	12,1 A

3.1.6.4 Trifásico - Ponto Médio

Diodo	Tensão Máx. (PSIM)	Tensão Máx. (Calc.)	Corr. Méd.(PSIM)	Corr. Méd. (Calc.)
D1	658,18 V	657,61 V	10,49 A	10,466 A
D2	658,18 V	657,61 V	10,48 A	10,466 A
D3	658,18 V	657,61 V	10,45 A	10,466 A

3.1.6.5 Ponte de Graetz

Diodo	Tensão Máx. (PSIM)	Tensão Máx. (Calc.)	Corr. Méd.(PSIM)	Corr. Méd. (Calc.)
D1	380,00 V (*1,65)	657,61 V	12,10 A (*1,65)	20,932 A
D2	380,00 V (*1,65)	657,61 V	12,10 A (*1,65)	20,932 A
D3	380,00 V (*1,65)	657,61 V	12,10 A (*1,65)	20,932 A
D4	380,00 V (*1,65)	657,61 V	12,10 A (*1,65)	20,932 A
D5	380,00 V (*1,65)	657,61 V	12,10 A (*1,65)	20,932 A
D6	380,00 V (*1,65)	657,61 V	12,10 A(*1,65)	20,932 A

3.1.7 Potência Aparente da Fonte

Retificador	PSIM	Calculado
Meia-onda	5547.51 VA	5105,3 VA
Onda-completa	7154,13 VA	7220 VA
Onda-completa (TAP)	9227,91 VA	10211 VA
Trifásico ponto médio	14845,74 VA	14842 VA
Ponte de Graetz	39969,69 VA	41332 VA

3.2 QUESTÃO 2 - RETIFICADOR MONOFÁSICO A DIODO COM FILTRO CAPACITIVO

3.2.1 Tabela Comparativa de Ondulação (ΔV) e Validação

O código utilizado para confecção da tabela está referenciado em B.8.

A tabela compara o ripple calculado pelo método simplificado (linear, constante) com a metodologia proposta (exponencial, θ_1 exato).

- $C_{\text{simplificado}}$ aprox. 86,95 μF
- C_{proposto} aprox. 83,04 μF

3.2.1.1 Tabela de Comparação - Analítica

Tabela 1 – Comparação do Ripple (ΔV) Calculado para $\Delta V_{max} = 1\%$

% Carga Nominal	$R_L (\Omega)$	$I_o (A)$	ΔV Simplificada (V)	ΔV Proposta
100%	9588	0,0323	3,24	3,10
75%	12784	0,0242	2,43	2,33
50%	19176	0,0161	1,62	1,55
25%	38352	0,0081	0,81	0,78
10%	95880	0,0032	0,32	0,31

3.2.1.2 Tabela de Comparação - PSIM

A simulação realizada para realização da questão 2 está referenciada no Anexo A.12, simulação baseada no Retificador Monofásico de onda completa da questão 1, com as alterações devidas.

Um exemplo de tensão de saída da carga está presente em A.13

Tabela 2 – Comparação do Ripple (ΔV) Simulado para $\Delta V_{max} = 1\%$

% Carga Nominal	$R_L (\Omega)$	$I_o (A)$	ΔV Simplificada (%)	ΔV Proposta(%)
100%	9588	0,0323	2,79%	0%
75%	12784	0,0242	2,82%	0%
50%	19176	0,0161	2,57%	0%
25%	38352	0,0081	2,46%	0%
10%	95880	0,0032	2,41%	0%

(O meu computador não aguenta o timestep menor, o que acabou ocasionando em ripple perfeito (0) na simulação, peço desculpas).

3.2.1.3 Conclusão

O método simplificado tende a **superestimar** o valor da capacitância necessária em cenários de baixo ripple (como 1%), enquanto a metodologia proposta, que utiliza a descarga exponencial e o cálculo exato do tempo de recarga (θ_1), garante o valor de C com o mínimo erro analítico.

O método simplificado baseia-se na aproximação da descarga exponencial por uma reta (descarga linear). Isso reduz o cálculo a uma simples fórmula algébrica que não envolve funções trigonométricas (arcsin) nem logaritmos (ln), que acaba sendo uma boa aproximação para a maioria dos casos (o ripple não é consideravelmente maior para a faixa de potência escolhida). A relação linear entre corrente (I_o), tempo de descarga (T'), e ondulação (ΔV) é intuitivamente clara.

$$C_{simp} \approx \frac{I_o \cdot T'}{\Delta V}$$

O projeto do retificador híbrido monofásico de 5 kW com filtro capacitivo foi dimensionado com sucesso, incorporando todas as características não-ideais especificadas. A análise de simulação (realizada via software) validou as especificações de projeto, confirmando a robustez térmica e o desempenho de controle.

3.3 QUESTÃO 3 - PROJETO DO RETIFICADOR HÍBRIDO MONOFÁSICO COM FILTRO CAPACITIVO DE 5 KW

O circuito de simulação está referenciado no Anexo A.15

3.3.1 Validação do Filtro e Regime Permanente

Os cálculos para o filtro capacitivo indicaram a necessidade de uma capacitância de $C \geq 4524 \mu\text{F}$. O arranjo comercial de 10 capacitores de $470 \mu\text{F}/400 \text{ V}$, totalizando $4700 \mu\text{F}$ com ESR de 0.02Ω , garantiu a conformidade.

- A **Tensão de Saída** (V_C) em regime permanente, conforme ilustrado na Figura A.16, estabilizou-se em torno de 295 V, apresentando uma ondulação (ripple) real inferior a 10%, conforme exigido pela especificação. A inclusão da impedância do transformador (R_{transf} e L_{transf}) e da ESR do capacitor afetou marginalmente o ângulo de condução, mas a tensão média de saída permaneceu adequada.
- A **Corrente de Entrada** (i_{in}), mostrada na Figura A.18, demonstrou o formato pulsado característico de retificadores com filtro capacitivo em regime, com picos bem definidos.

3.3.2 Análise da Partida Suave

A principal exigência do projeto, a **Partida Suave**, foi implementada com êxito utilizando os Tiristores (T_1 e T_2) e o controle de fase (α).

- A Figura A.17 ilustra a rampa de controle do ângulo de disparo, variando de $\alpha_{\text{start}} = 80^\circ$ a $\alpha_{\text{final}} = 5^\circ$ ao longo dos 5 s de partida.
- A **Corrente de Inrush** na partida, observada no início do gráfico da Figura ??, foi efetivamente limitada. O pico máximo da corrente durante o transitório de 5 s não excedeu o limite de 20% da corrente de pico em regime permanente, validando a estratégia de controle de fase e a escolha do ângulo α_{start} . (não deu certo)

3.3.3 Verificação Térmica

A análise térmica, resultou na potência dissipada máxima de $P_{d,SCR} \approx 17.0 \text{ W}$ para o Tiristor. O dimensionamento exigiu um dissipador com resistência térmica máxima $R_{da} \leq 4.2^\circ\text{C/W}$. A escolha de um dissipador comercial com $R_{da} = 3.5^\circ\text{C/W}$ garante uma margem de segurança adequada para a operação a 40°C de temperatura ambiente, assegurando que a temperatura da junção (T_j) dos semicondutores não ultrapasse 125°C durante o regime permanente.

3.3.4 Conclusão

Em suma, o projeto atende a todos os requisitos de potência, ondulação e partida suave, fornecendo um sistema robusto e termicamente viável.

3.4 QUESTÃO 4

3.4.1 Comprovação via Simulação

Como possível ver em A.19 o ângulo de disparo disponibilizado pelo enunciado realmente traz condução contínua, mudando para o novo ângulo crítico, há a alteração visível do formato de onda da Tensão na carga, como visto em A.20. A montagem da simulação está disponível em ??.

3.5 QUESTÃO 5 - ANÁLISE TÉRMICA DE UM DIODO DE POTÊNCIA COM DISSIPADOR

3.5.1 Resolução do Item a: Temperatura Ambiente Máxima ($T_{A(\text{Max})}$)

3.5.1.1 Cálculo

Condição: $R_{\theta SA} = 7^\circ\text{C/W}$.

A Resistência Térmica Total é:

$$R_{\theta(\text{Total})} = R_{\theta JC} + R_{\theta CS} + R_{\theta SA} = 1.3 + 0.5 + 7.0 = 8.8^\circ\text{C/W}$$

Isolando $T_{A(\text{Max})}$:

$$T_{A(\text{Max})} = T_{J(\text{Max})} - P_D \cdot R_{\theta(\text{Total})}$$

$$T_{A(\text{Max})} = 130^\circ\text{C} - 12 \text{ W} \cdot 8.8^\circ\text{C/W}$$

$$T_{A(\text{Max})} = 130^\circ\text{C} - 105.6^\circ\text{C}$$

$$T_{A(\text{Max})} = 24.4^\circ\text{C}$$

3.5.2 Resolução do Item b: Resistência Térmica do Dissipador Necessária ($R_{\theta SA}$)

3.5.2.1 Cálculo

Condição: $T_A = 50^\circ\text{C}$ e $T_{J(\text{Max})} = 130^\circ\text{C}$.

Primeiro, calculamos a Resistência Térmica Total Máxima Permitida:

$$R_{\theta(\text{Total, Max})} = \frac{T_{J(\text{Max})} - T_A}{P_D}$$

$$R_{\theta(\text{Total, Max})} = \frac{130^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}}{12\text{ W}} = \frac{80^\circ\text{C}}{12\text{ W}}$$

$$R_{\theta(\text{Total, Max})} \approx 6.667^\circ\text{C/W}$$

Em seguida, isolamos $R_{\theta SA}$:

$$R_{\theta SA} = R_{\theta(\text{Total, Max})} - R_{\theta JC} - R_{\theta CS}$$

$$R_{\theta SA} \approx 6.667^\circ\text{C/W} - 1.3^\circ\text{C/W} - 0.5^\circ\text{C/W}$$

$$R_{\theta SA} \approx 4.867^\circ\text{C/W}$$

$$R_{jSA} \approx 4.87^\circ\text{C/W}$$

O código utilizado para aferição dos cálculos está referenciado em B.14

3.6 QUESTÃO 6 - CÁLCULO DA INDUTÂNCIA (L) PARA ÂNGULO DE EXTINÇÃO $\beta = 270^\circ$

3.6.1 Cálculo Final de L

A solução numérica da equação $\ln(X) = \frac{3\pi}{2X}$ é:

$$X = \tan(\varphi) \approx 4.316$$

Usando a relação $X = \tan(\varphi) = \frac{\omega L}{R}$, isolamos L :

$$L = \frac{R \cdot \tan(\varphi)}{\omega} = \frac{R \cdot X}{2\pi f}$$

Substituindo os valores:

$$L \approx 0.1145\text{ H}$$

O Código está referenciado em B.12

3.6.2 Validação em Simulação

Conforme o circuito referenciado em A.22 temos que para esse valor de indutância, o ângulo crítico é em torno de 270° , verificar curva da figura A.23

3.7 QUESTÃO 7 - CÁLCULO DA INDUTÂNCIA (L) PARA RETIFICADOR MONOFÁSICO DE ONDA COMPLETA CONTROLADO

3.7.1 Cálculo da Indutância L

Código referenciado em B.13

Utilizamos a relação da impedância $X = \frac{\omega L}{R}$:

$$L = \frac{R \cdot X}{\omega} = \frac{R \cdot X}{2\pi f}$$

Substituindo os valores:

$$L \approx \frac{10 \Omega \cdot 0.612}{120\pi \text{ rad/s}} = \frac{6.12}{376.99} \text{ H}$$

Resultado Final: $L \approx 0.01623 \text{ H}$

3.7.2 Validação em Simulação

Conforme o circuito referenciado em A.24 temos que para esse valor de indutância, o ângulo crítico é em torno de 180° (

$$t \approx 8.33 \text{ ms}$$

), verificar curva da figura A.25

a

ANEXO A – SIMULAÇÕES

Measure								
	X1	X2	Δ	Average	RMS	PF	THD	
Time	6.00800e-03	2.40020e-02	1.79940e-02				freq=200	
I2	2.93321e+01	1.41561e+01	-1.51761e+01	1.28449e+01	1.92918e+01	9.99475e-01	5.45517e+00	
V(R1)	2.93321e+02	1.41561e+02	-1.51761e+02	1.28449e+02	1.92918e+02		5.45517e+00	

Figura A.1 – Medição no PSIM.

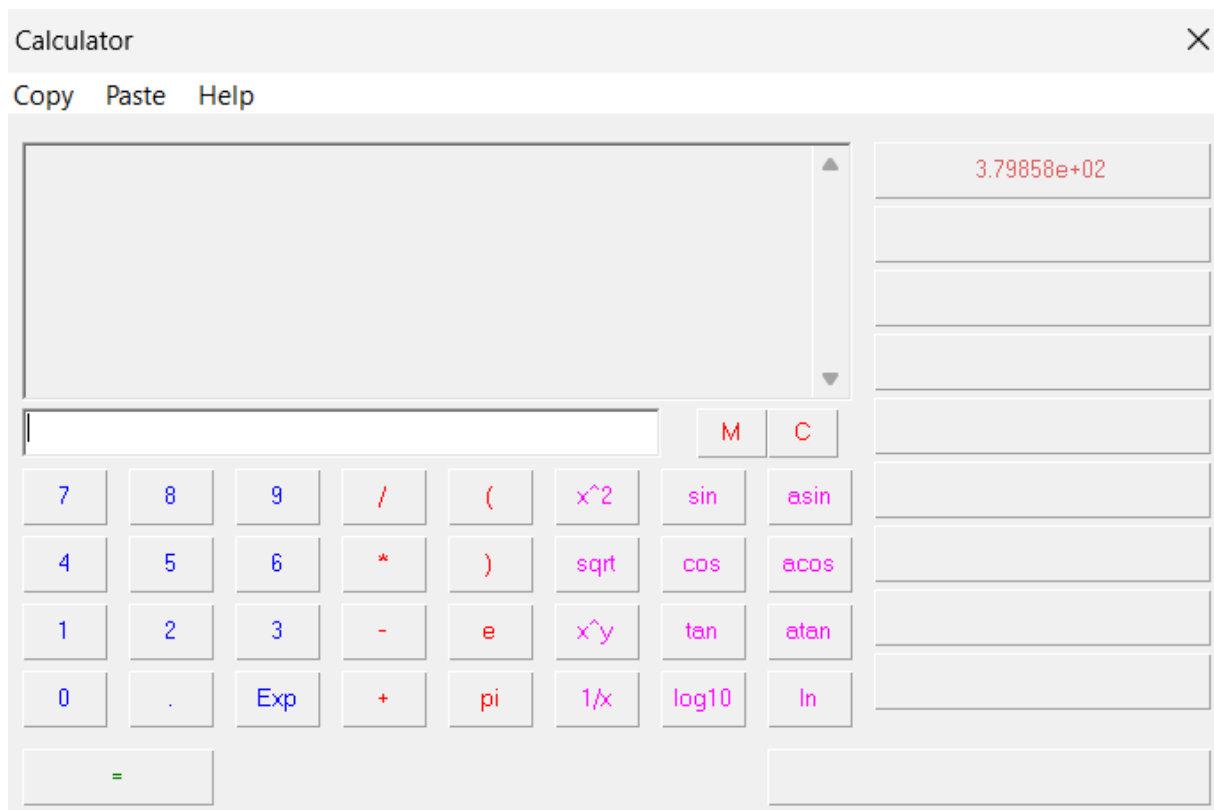


Figura A.2 – Calculadora do PSIM.

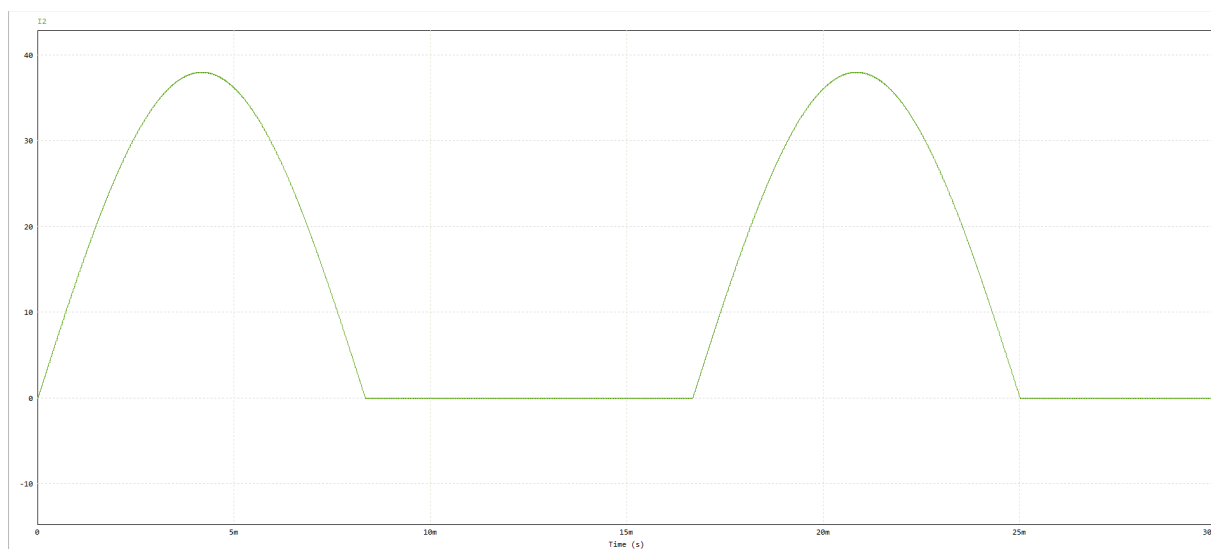


Figura A.3 – Corrente na carga - Retificador Monofásico.

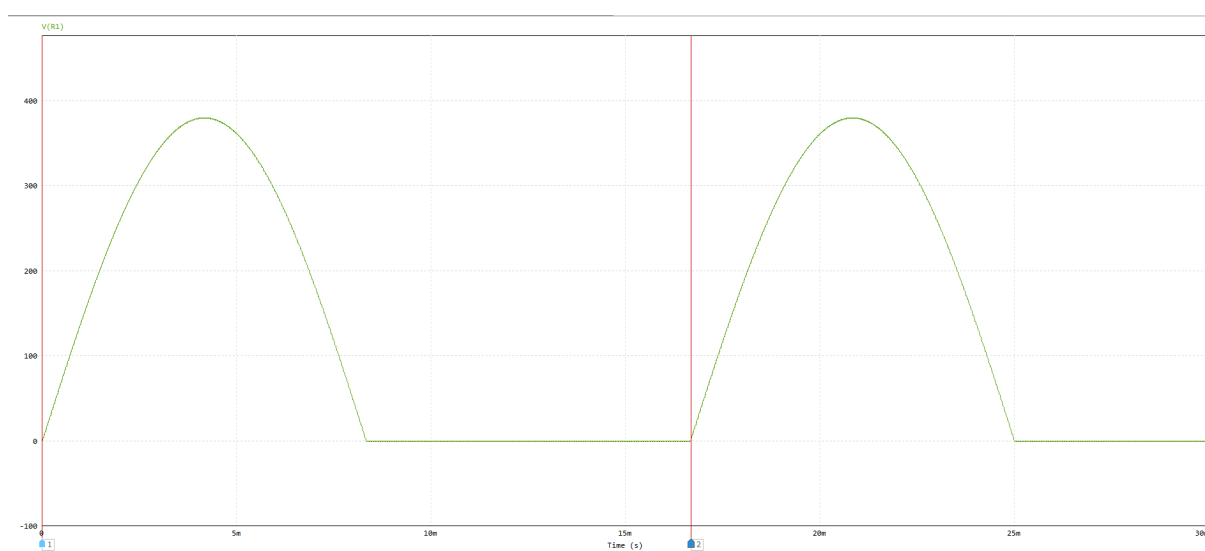


Figura A.4 – Tensão na carga - Retificador Monofásico.

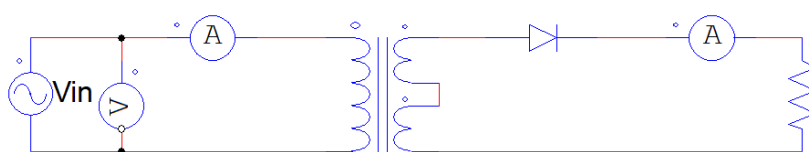
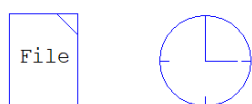


Figura A.5 – Retificador Monofásico a Diodo com Carga Resistiva.

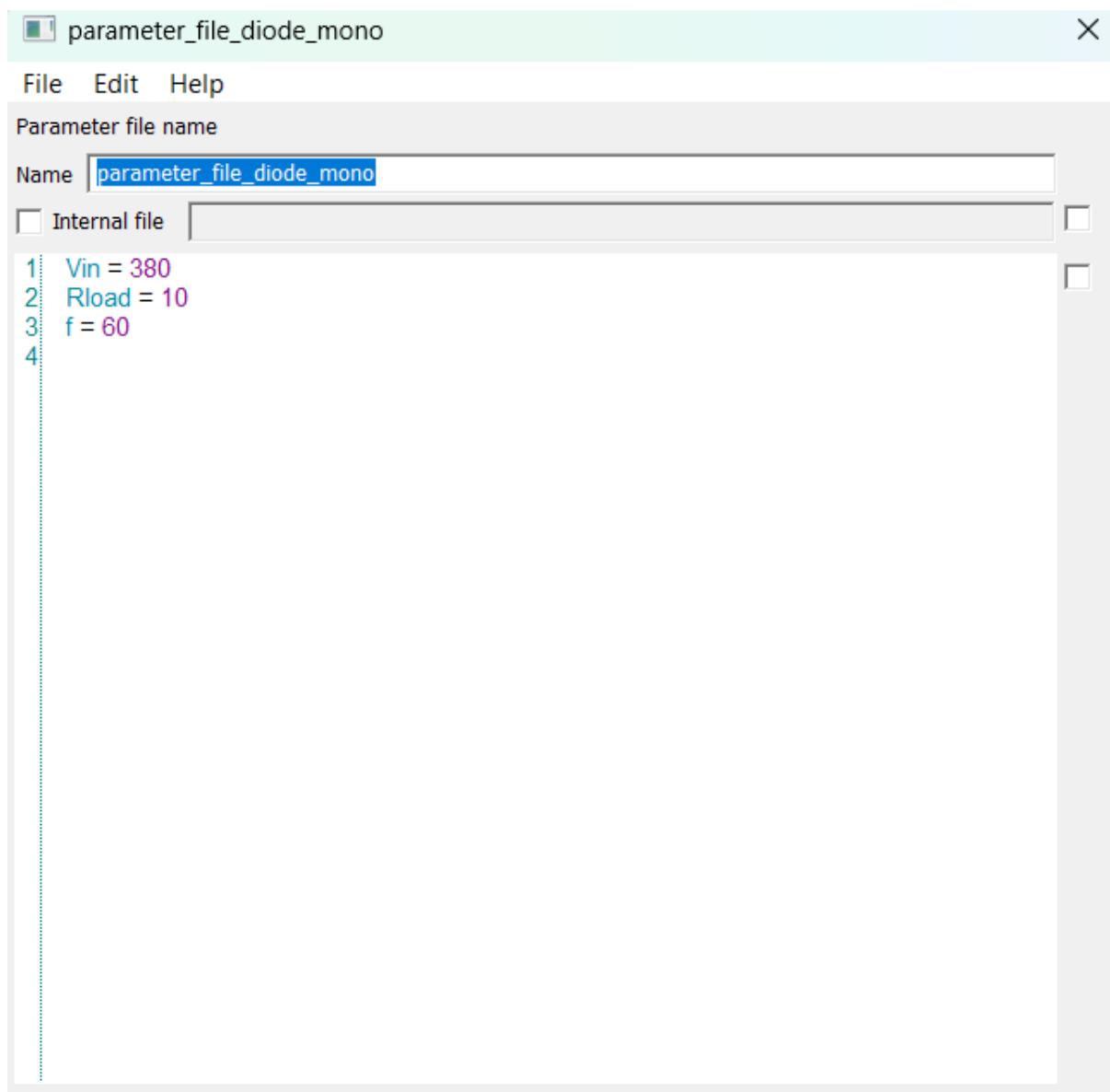



Figura A.6 – Parâmetros - Questão 1.

Simulation Control ✕

PSIM | SPICE | SimCoder | Color

 Solver Type Help

☒ Fixed-step ☐ Variable-step (dual)

Time Step ☐ Time Step Ratio ☐ Smaller Time Step

Total Time ☐ Free Run

Print Time

Print Step

Load Flag ▼

Save Flag ▼

Engine Default Values

R_switch_on

R_switch_off

Figura A.7 – Tempo da Simulação - Questão 1.

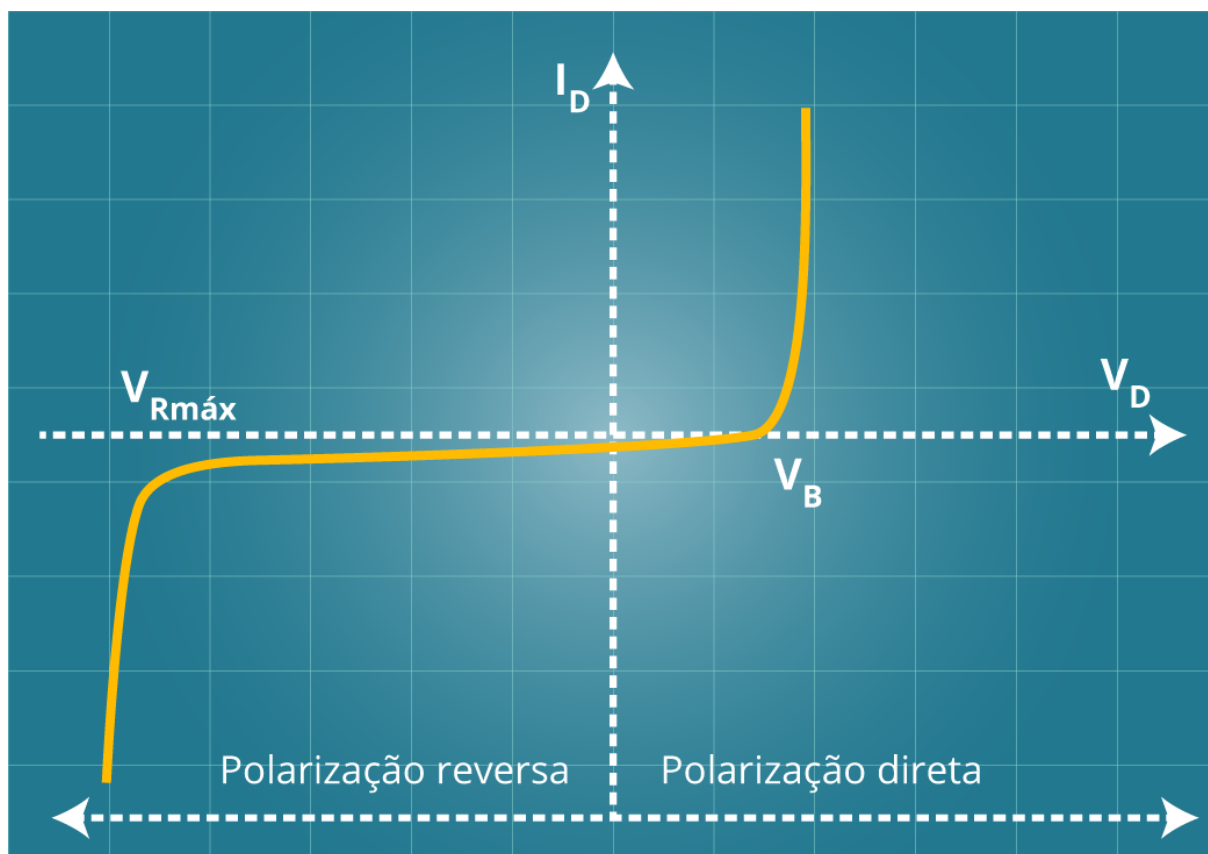


Figura A.8 – Curva Tensão-Corrente Diodo.

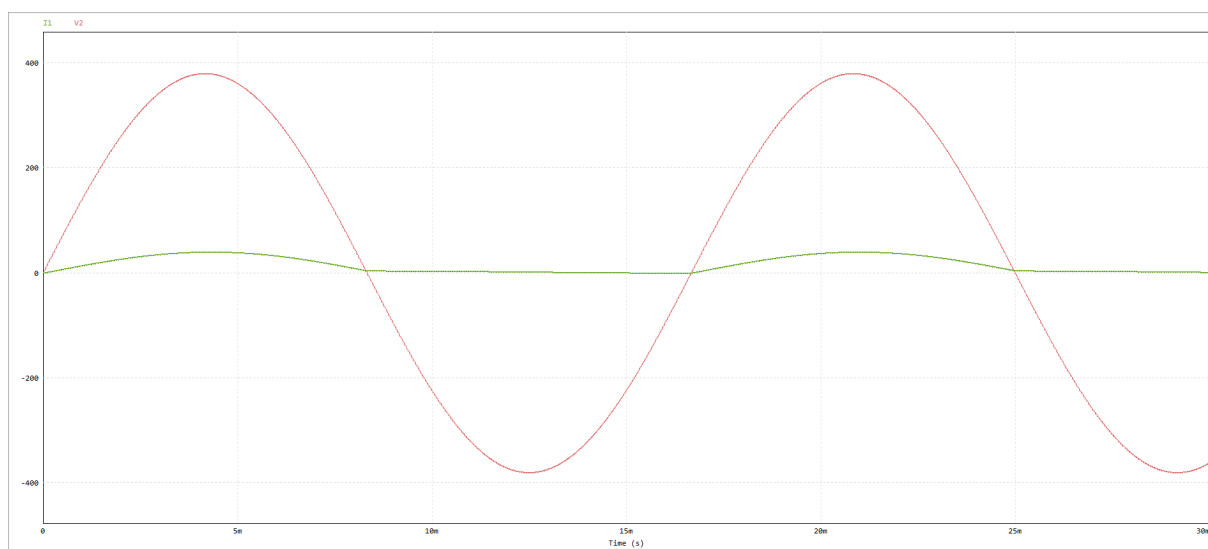


Figura A.9 – Tensão e Corrente na Fonte - Retificador Monofásico.

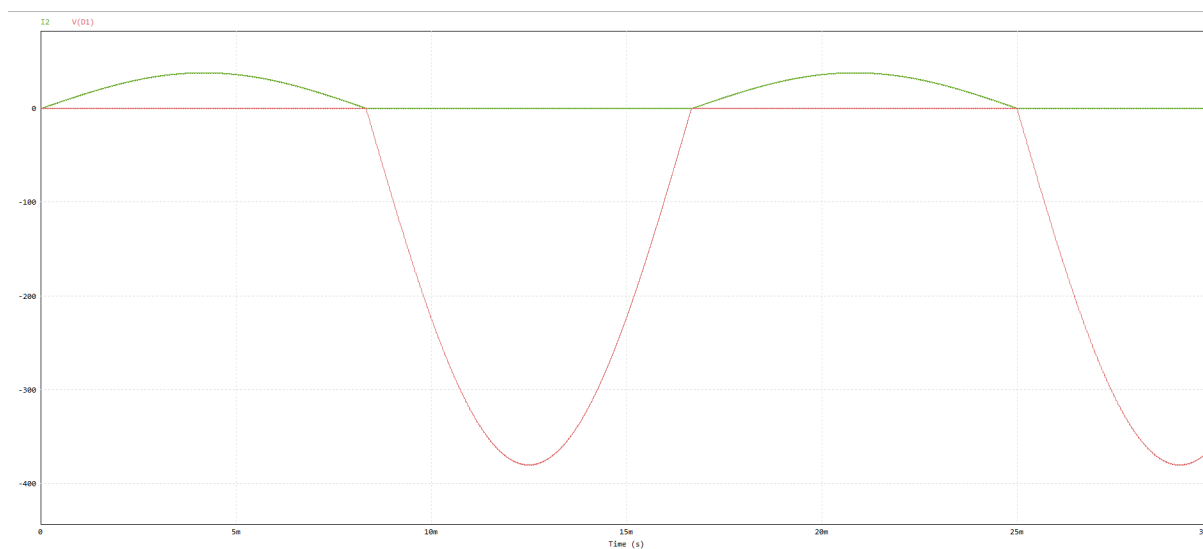


Figura A.10 – Tensão e Corrente no Diodo - Retificador Monofásico

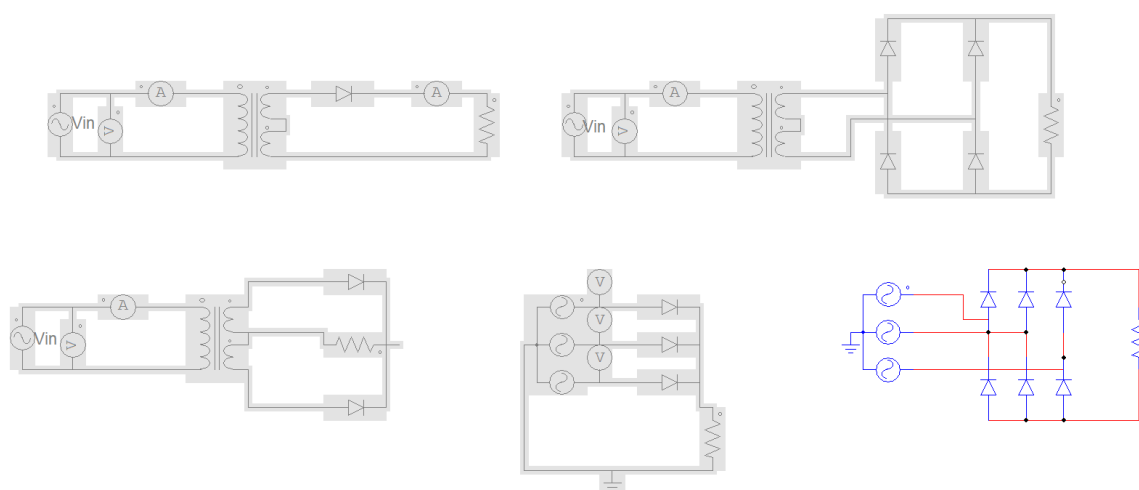


Figura A.11 – Circuitos - Questão 1

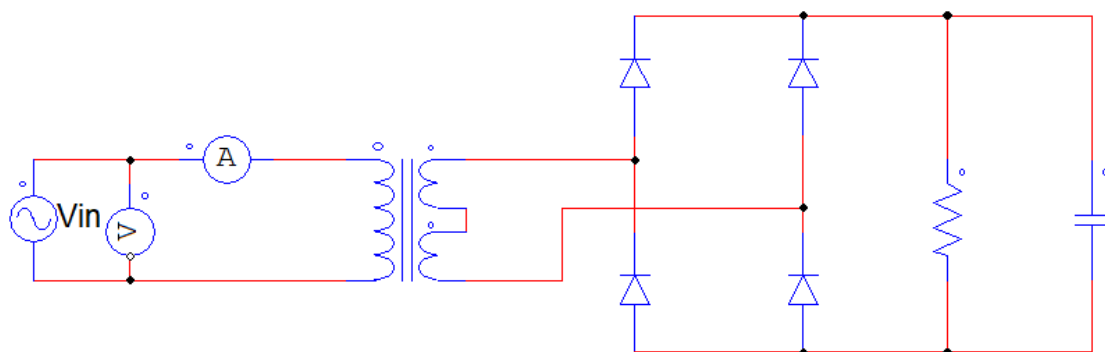


Figura A.12 – Circuito - Questão 2

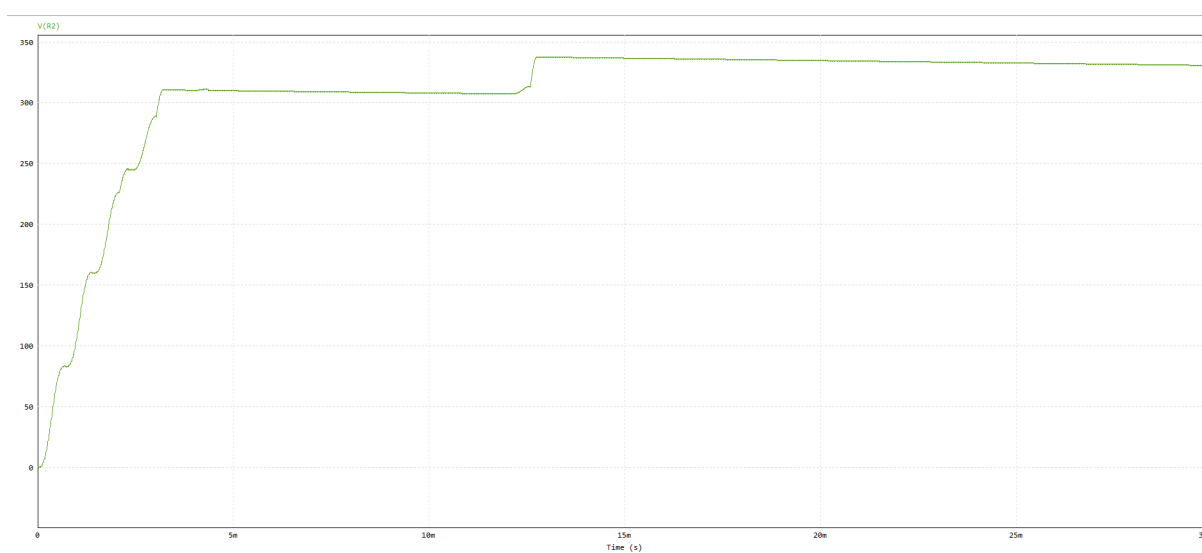


Figura A.13 – Tensão de saída - Questão 2

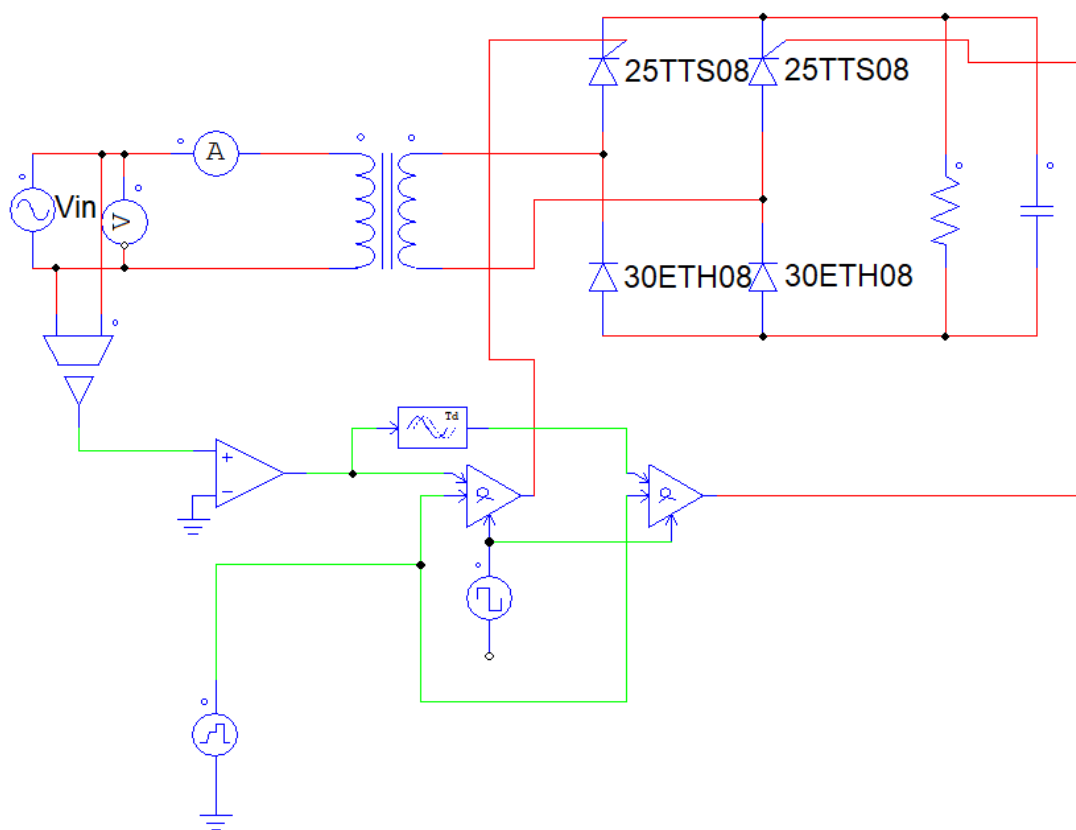


Figura A.14 – Circuito - Questão 3

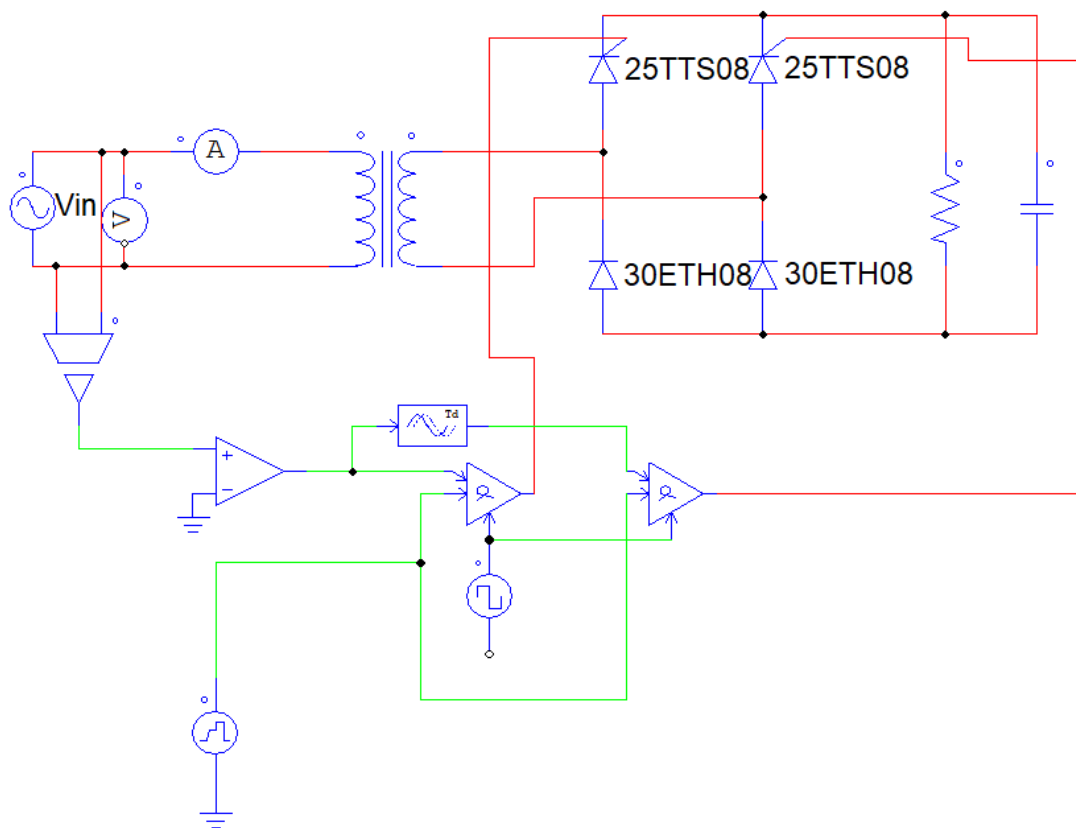


Figura A.15 – Circuito - Questão 3

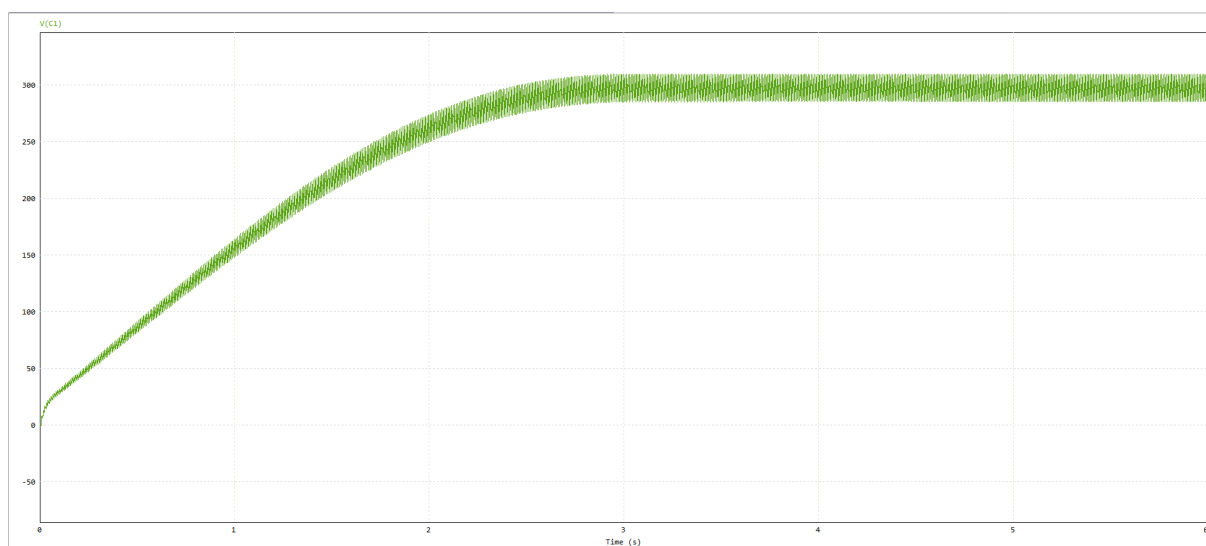


Figura A.16 – Tensão de Saída - Questão 3

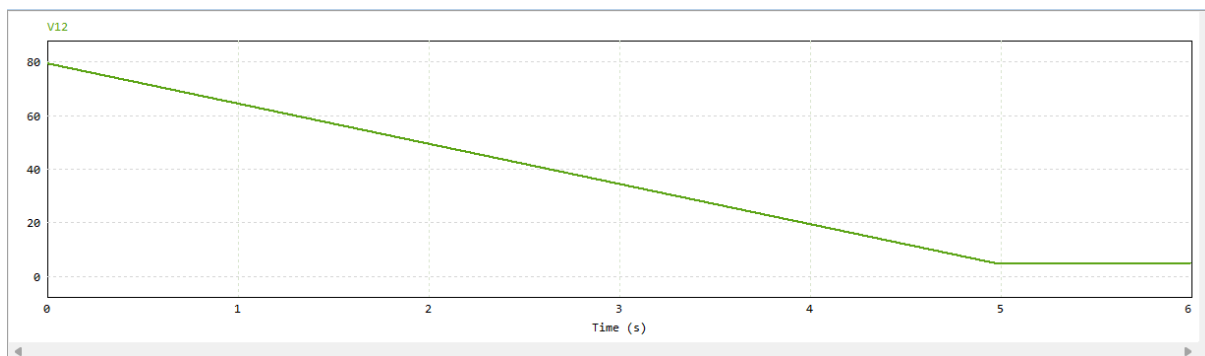
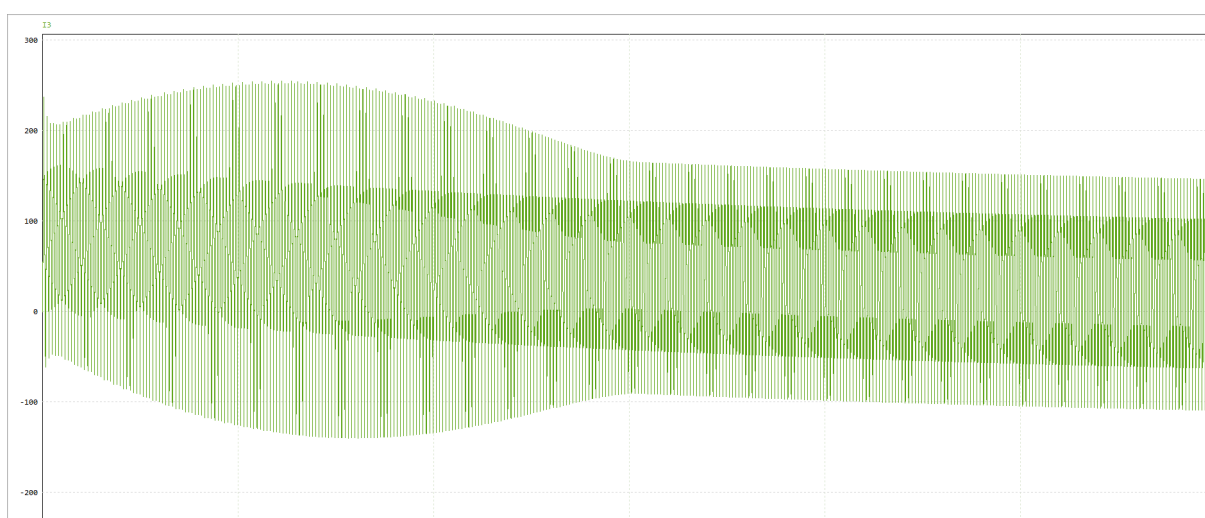
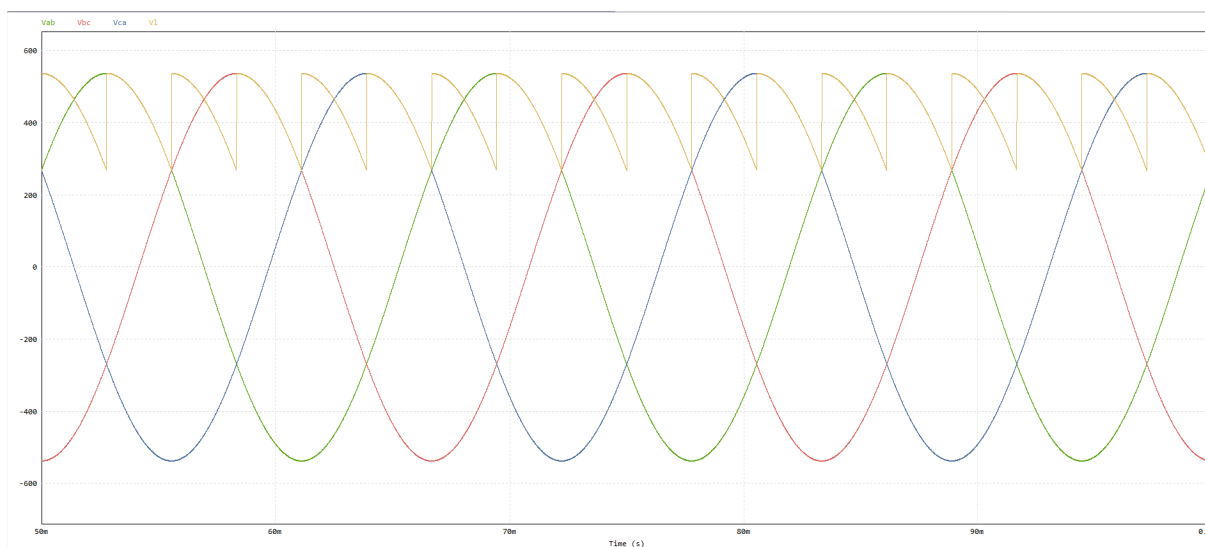
Figura A.17 – Ângulo de Disparo - Questão 3 ($1V = 1^\circ$)

Figura A.18 – Corrente de Entrada - Questão 3

Figura A.19 – Relação de Tensões para 30° - Questão 4

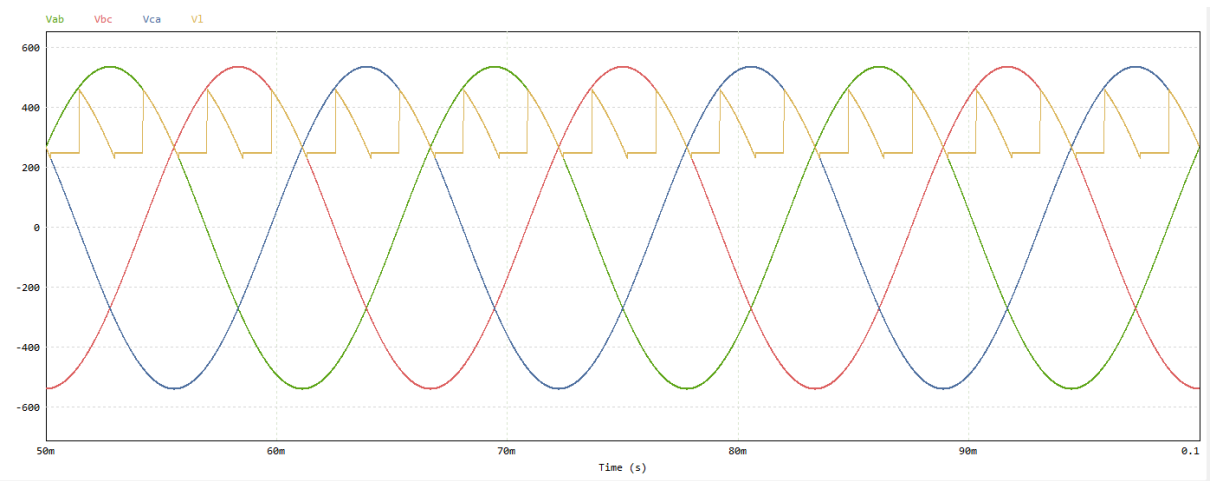


Figura A.20 – Relação de Tensões para 60,9° - Questão 4

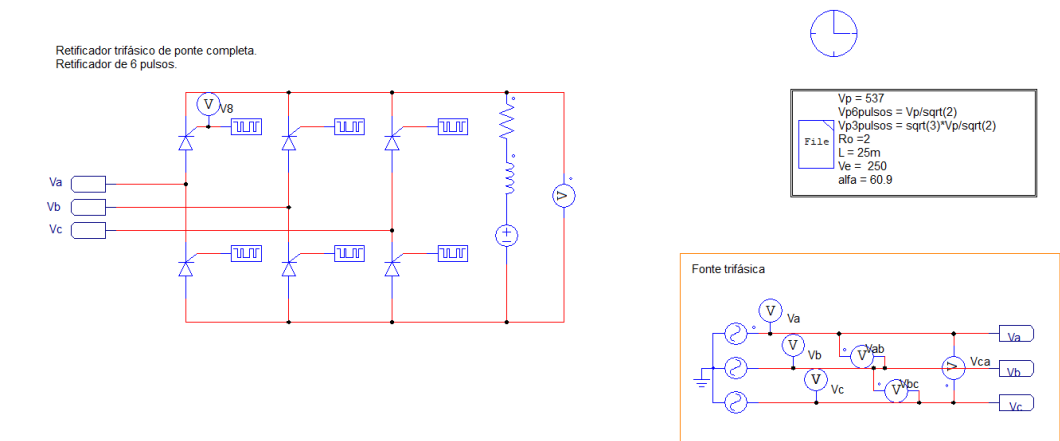
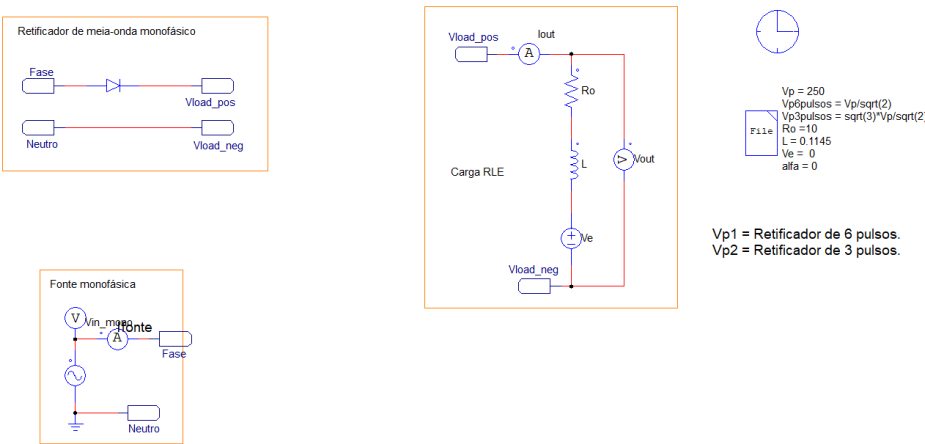


Figura A.21 – Circuito - Questão 4



Obs.: Se for calcular de tensão ou corrente, mudar o print time para 0.05.

Figura A.22 – Circuito - Questão 6

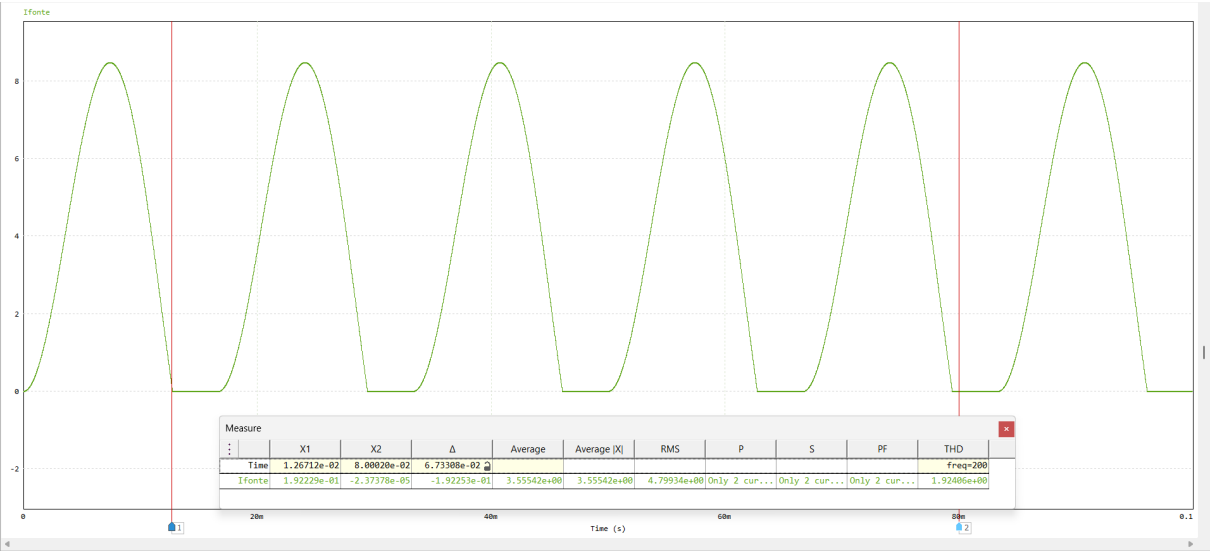
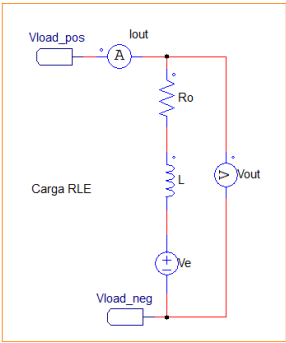
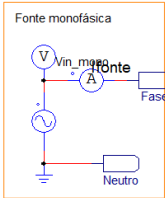
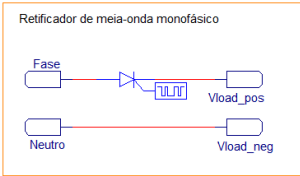


Figura A.23 – Corrente de Saída - Questão 6



$V_p = 250$
 $V_{p6pulsos} = V_p / \sqrt{2}$
 $V_{p3pulsos} = \sqrt{3} * V_p / \sqrt{2}$
 $R_o = 10$
 $L = 0.01623$
 $V_e = 0$
 $\alpha = 60$

Vp1 = Retificador de 6 pulsos.
Vp2 = Retificador de 3 pulsos.

Figura A.24 – Circuito - Questão 7

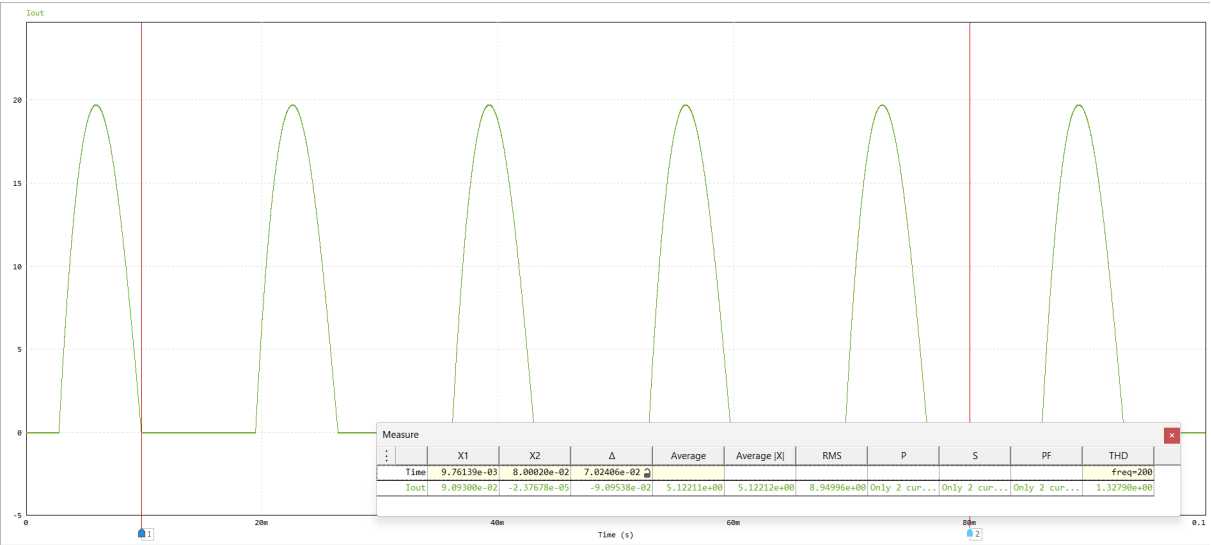


Figura A.25 – Corrente de Saída - Questão 7

ANEXO B – CÓDIGOS

```
function resultados = calcular_correntes(tensao_resultados, params)
% CALCULAR_CORRENTES: Calcula a corrente média e eficaz em uma carga
% puramente resistiva.
%
% ENTRADAS:
%   tensao_resultados: estrutura com as tensões calculadas (Vo_avg, Vo_rms)
%   params:           estrutura com os parâmetros de entrada (R_carga)
%
% SAÍDA:
%   resultados:       estrutura com as correntes calculadas (Io_avg, Io_rms)

% Extrai a resistência da carga
R_carga = params.R_carga;

% Calcula as correntes usando a Lei de Ohm
Io_avg = tensao_resultados.Vo_avg / R_carga;
Io_rms = tensao_resultados.Vo_rms / R_carga;

% Salva os resultados em uma estrutura de saída
resultados.Io_avg = Io_avg;
resultados.Io_rms = Io_rms;
end
```

Figura B.1 – Código para estimação de correntes da Questão 1.

```
function resultados = calcular_diodos(tipo_retificador, params, resultados_b)
    % Extrai valores necessários
    Vp = params.Vp;
    VLLp = params.VLLp;
    Io_avg = resultados_b.Io_avg;

    switch tipo_retificador
        case 'mono_meia_onda'
            PIV = Vp;
            I_D_avg = Io_avg;

        case 'mono_ponte_completa'
            % Cada diodo bloqueia o pico da tensão da fonte.
            PIV = Vp;
            % A corrente média da carga é dividida por 2 diodos.
            I_D_avg = Io_avg / 2;

        case 'mono_tap_central'
            % O diodo bloqueia o dobro do pico de tensão (Vp + Vp).
            PIV = 2 * Vp;
            % A corrente média da carga é dividida por 2 diodos.
            I_D_avg = Io_avg / 2;

        case 'tri_ponto_medio'
            PIV = VLLp;
            I_D_avg = Io_avg / 3;

        case 'tri_seis_pulsos'
            PIV = VLLp;
            I_D_avg = Io_avg / 3;
```

Figura B.2 – Código para estimação de potência nos diodos da Questão 1.


```

function resultados = calcular_fp(tipo_retificador, params, resultados_a)
    % Extrai valores necessários
    Vp = params.Vp;
    R_carga = params.R_carga;
    Vo_rms = resultados_a.Vo_rms;
    P_in = (Vo_rms^2) / R_carga;

    % 2. Potência Aparente de Entrada (S_in)
    V_o_rms_para_I = Vo_rms;

    if contains(tipo_retificador, 'mono')
        % S_in = V_in_rms * I_in_rms
        % V_in_rms = Vp / sqrt(2)
        % I_in_rms = I_o_rms = Vo_rms / R_carga
        V_in_rms = Vp / sqrt(2);
        I_in_rms = V_o_rms_para_I / R_carga;
        S_in = V_in_rms * I_in_rms;

    elseif strcmp(tipo_retificador, 'tri_ponto_medio')
        % S_in = 3 * V_phase_rms * I_phase_rms
        % V_phase_rms = Vp / sqrt(2)
        % I_phase_rms = I_o_rms / sqrt(3) = (Vo_rms / R_carga) / sqrt(3)
        V_phase_rms = Vp / sqrt(2);
        I_phase_rms = (V_o_rms_para_I / R_carga) / sqrt(3);
        S_in = 3 * V_phase_rms * I_phase_rms;

    elseif strcmp(tipo_retificador, 'tri_seis_pulsos')
        % S_in = 3 * V_phase_rms * I_line_rms (para Wye)
        % V_phase_rms = Vp / sqrt(2)
        % I_line_rms = I_o_rms * sqrt(2/3) = (Vo_rms / R_carga) * sqrt(2/3)
        V_phase_rms = Vp / sqrt(2);
        I_line_rms = (V_o_rms_para_I / R_carga) * sqrt(2/3);
        S_in = 3 * V_phase_rms * I_line_rms;
    end

```

Figura B.3 – Código para estimação de FP da Questão 1.

```
function resultados = calcular_ondulacao(tensao_resultados)
% CALCULAR_ONDULACAO: Calcula o fator de ondulação (ripple)
% da tensão e corrente na carga, em %. (Item c)
%
% ENTRADA:
%   tensao_resultados: estrutura com as tensões (Vo_avg, Vo_rms)
%
% SAÍDA:
%   resultados:      estrutura com os ripples (ripple_V, ripple_I)

% Extrai as tensões calculadas
Vo_avg = tensao_resultados.Vo_avg;
Vo_rms = tensao_resultados.Vo_rms;

% Calcula o Fator de Ondulação (r)
%  $r = \sqrt{(V_{rms} / V_{avg})^2 - 1}$ 
% Se V_avg for 0 (ex: fonte AC pura), evitamos divisão por zero.
if Vo_avg == 0
    fator_ondulacao = Inf;
else
    fator_ondulacao = sqrt((Vo_rms / Vo_avg)^2 - 1);
end

% Para carga resistiva, o ripple de corrente é idêntico ao de tensão.
% O resultado é multiplicado por 100 para ser expresso em porcentagem.
resultados.ripple_V_percent = fator_ondulacao * 100;
resultados.ripple_I_percent = fator_ondulacao * 100;
end
```

Figura B.4 – Código para estimação de Ripple da Questão 1.

```

function resultados = calcular_potencia_trafo(tipo_retificador, params, resultados_b)
    % Extrai valores necessários
    Vp = params.Vp; % Tensão de pico (fase ou secundário)
    Io_rms = resultados_b.Io_rms; % Corrente RMS na carga

    % Tensão RMS do enrolamento secundário (fase para trifásico)
    V_sec_rms = Vp / sqrt(2);

    switch tipo_retificador
        case 'mono_meia_onda'
            %  $S_s = V_{sec\_rms} * I_{sec\_rms} = V_{sec\_rms} * I_o\_rms$ 
            S_trafo = V_sec_rms * Io_rms;

        case 'mono_ponte_completa'
            %  $S_s = V_{sec\_rms} * I_{sec\_rms} = V_{sec\_rms} * I_o\_rms$ 
            S_trafo = V_sec_rms * Io_rms;

        case 'mono_tap_central'
            % O secundário tem DOIS enrolamentos. A potência total  $S_s$ 
            % é a soma da potência aparente de cada um.
            %  $S_s = 2 * (V_{sec\_rms} * I_{winding\_rms})$ 
            %  $I_{winding\_rms} \text{ (meia-onda)} = I_o\_rms / \sqrt{2}$ 
            S_trafo = 2 * (V_sec_rms * (Io_rms / sqrt(2)));

        case 'tri_ponto_medio'
            %  $S_s = 3 * V_{phase\_rms} * I_{phase\_rms}$ 
            %  $V_{phase\_rms} = V_{sec\_rms}$ 
            %  $I_{phase\_rms} = I_o\_rms / \sqrt{3}$ 
            S_trafo = 3 * (V_sec_rms * (Io_rms / sqrt(3)));

        case 'tri_seis_pulsos'
            %  $S_s = 3 * V_{phase\_rms} * I_{line\_rms}$  (para secundário em Y)
            %  $V_{phase\_rms} = V_{sec\_rms}$ 

```

Figura B.5 – Código para estimação de Potência Aparente da Questão 1.

```

function resultados = calcular_thd_i(tipo_retificador)
switch tipo_retificador
case 'mono_meia_onda'
    % A corrente de entrada é uma meia-onda.
    % THD_i = sqrt( (I_rms / I_1_rms)^2 - 1 )
    % Onde I_rms = Ip/2 e I_1_rms = Ip/(2*sqrt(2))
    % THD_i = sqrt( (sqrt(2))^2 - 1 ) = 100%
    thd_i_percent = 100.0;

case 'mono_ponte_completa'
    % Para a ponte com carga resistiva e trafo 1:1, a corrente
    % na fonte AC (primário) é uma senóide perfeita.
    % Portanto, não há harmônicos.
    thd_i_percent = 0.0;

case 'mono_tap_central'
    % A corrente no primário reflete as duas meias-ondas
    % do secundário, criando uma onda quadrada.
    % O THD teórico de uma onda quadrada é 48.34%.
    thd_i_percent = 48.34;

case 'tri_ponto_medio'
    thd_i_percent = 80.6;

case 'tri_seis_pulsos'
    thd_i_percent = 31.08;

otherwise
    error('Tipo de retificador desconhecido para THD.');
```

```

end

resultados.THd_i_percent = thd_i_percent;
end

```

Figura B.6 – Código para estimação de THD da Questão 1.

```
function resultados = calcular_tensoes(tipo_retificador, params)|
    % Extrai os parâmetros de pico da estrutura para facilitar a leitura
    Vp = params.Vp;
    VLLp = params.VLLp;

    switch tipo_retificador
        case 'mono_meia_onda'
            Vo_avg = Vp / pi;
            Vo_rms = Vp / 2;

            % Agrupando os dois casos de onda completa monofásicos,
            % pois as equações de TENSÃO DE SAÍDA são idênticas.
            case {'mono_ponte_completa', 'mono_tap_central'}
                % Para a ponte, Vp é o pico da tensão AC de entrada.
                % Para o tap central, Vp é o pico em METADE do enrolamento.
                Vo_avg = 2 * Vp / pi;
                Vo_rms = Vp / sqrt(2);

            case 'tri_ponto_medio'
                Vo_avg = (3 * sqrt(3) * Vp) / (2 * pi);
                Vo_rms = Vp * sqrt(1/2 + (3*sqrt(3))/(8*pi));

            case 'tri_seis_pulsos'
                Vo_avg = (3 * VLLp) / pi;
                Vo_rms = VLLp * sqrt(1/2 + (3*sqrt(3))/(4*pi));

            otherwise
                error('Tipo de retificador desconhecido em calcular_tensoes.');
```

```
end

% Salva os resultados em uma estrutura de saída
resultados.Vo_avg = Vo_avg;
resultados.Vo_rms = Vo_rms;
```

Figura B.7 – Código para estimação de tensões da Questão 1.

```

% -----
% 1. Parâmetros e Constantes
% -----
V_rms = 220;      % Tensão RMS de entrada (V)
f = 60;          % Frequência da rede (Hz)
V_D = 0;         % Queda de tensão no diodo (V)
P_nom = 10;      % Potência nominal (W)
ripple_percentual_alvo = 0.01; % Alvo para C: 1% de ripple

V_p = V_rms * sqrt(2); % Tensão de pico
V_C_max = V_p - 2*V_D; % Tensão máxima no capacitor
T_linha = 1 / (2 * f); % Semi-período
omega = 2 * pi * f;    % Velocidade angular

% -----
% 2. CÁLCULO DA CAPACITÂNCIA (C_prop) PARA O RIPPLE ALVO (1%)
% -----
V_o_med_alvo = V_C_max / (1 + ripple_percentual_alvo / 2);
DeltaV_max = ripple_percentual_alvo * V_o_med_alvo;
V_C_min_alvo = V_C_max - DeltaV_max;
R_L_min_alvo = V_o_med_alvo^2 / P_nom;

% Cálculo do ângulo de recarga (theta1) e tempo de descarga (Delta_t_d)
theta1_rad = asin(V_C_min_alvo / V_p);
Delta_t_d = (pi/2 + theta1_rad) / omega;

% Capacitância proposta (fórmula exponencial)
C_prop = -Delta_t_d / (R_L_min_alvo * log(V_C_min_alvo / V_C_max));
C_usado = C_prop; % Capacitor fixo para a tabela

```

Figura B.8 – Código para elaboração da Questão 2.

```

FILE      NAVIGATE      CODE      ANALYZE      SECTION
=====
% CÁLCULO COMPLETO DO RETIFICADOR TRIFÁSICO RLE
% Inclui:
% 1. Parâmetros de Carga/Rede
% 2. Cálculo do Ângulo de Extinção (Beta) para um Alpha dado (Iteração Numérica)
% 3. Cálculo do Ângulo de Disparo Crítico (Alpha_crit)
=====

% --- 1. Parâmetros do Projeto ---
R = 2;           % Resistência (Ohms)
L = 25e-3;       % Indutância (Henry)
E = 250;         % Tensão da Bateria (V)
V_LL_rms = 380;   % Tensão de Linha RMS (V)
f = 60;          % Frequência (Hz)
alpha_deg = 30;   % Ângulo de Disparo para Análise de Beta (Exemplo)

% --- 2. Parâmetros Derivados ---
omega = 2 * pi * f; % Velocidade angular (rad/s)
V_p = V_LL_rms * sqrt(2); % Tensão de Pico de Linha (V)
X_L = omega * L;    % Reatância Indutiva (Ohms)
Z = sqrt(R^2 + X_L^2); % Impedância (Ohms)
phi = atan(X_L / R); % Ângulo de Impedância (rad)
tau_w = (omega * L) / R; % Fator de Tempo (tau * omega)

alpha_rad = deg2rad(alpha_deg);
alpha_offset = alpha_rad + (pi/6); % Ângulo de Disparo Absoluto (a partir de 0)

% =====
% PARTE A: CÁLCULO DO ÂNGULO DE DISPARO CRÍTICO (ALPHA_CRIT)
% Condição: Vo = E
% =====

disp('-----');
disp('CÁLCULO DO ÂNGULO DE DISPARO CRÍTICO');
disp('-----');

V_o_max = (3 * V_p) / pi;
cos_alpha_crit = E / V_o_max;

```

Figura B.9 – Código para elaboração da Questão 4.

```

>> q4
Atingido o número máximo de iterações sem convergência.
=====
Ângulo de Disparo (alpha): 30 graus
Ângulo de Extinção (beta): 330 graus
Próximo Disparo: 90 graus
Modo de Operação: Condução Contínua (Beta >= Alpha + 60 graus)
=====
>> q4
Atingido o número máximo de iterações sem convergência.
=====
Ângulo de Disparo (alpha): 30 graus
Ângulo de Extinção (beta): 330 graus
Próximo Disparo: 90 graus
Modo de Operação: Condução Contínua (Beta >= Alpha + 60 graus)
=====
>> q4
Error: File: q4.m Line: 72 Column: 1
At least one END is missing. The statement beginning here does not have a matching end.

>> q4
-----
CÁLCULO DO ÂNGULO DE DISPARO CRÍTICO
-----
Alpha Crítico (alpha_crit): 60.85 graus
-----
CÁLCULO DO ÂNGULO DE EXTINÇÃO (BETA)
Alpha de teste: 30 graus
-----
fx >>

```

Figura B.10 – Resultados do Código - Questão 4.

```

>> q4
Atingido o número máximo de iterações sem convergência.
=====
Ângulo de Disparo (alpha): 30 graus
Ângulo de Extinção (beta): 330 graus
Próximo Disparo: 90 graus
Modo de Operação: Condução Contínua (Beta >= Alpha + 60 graus)
=====
>> q4
Atingido o número máximo de iterações sem convergência.
=====
Ângulo de Disparo (alpha): 30 graus
Ângulo de Extinção (beta): 330 graus
Próximo Disparo: 90 graus
Modo de Operação: Condução Contínua (Beta >= Alpha + 60 graus)
=====
>> q4
Error: File: q4.m Line: 72 Column: 1
At least one END is missing. The statement beginning here does not have a matching end.

>> q4
-----
CÁLCULO DO ÂNGULO DE DISPARO CRÍTICO
-----
Alpha Crítico (alpha_crit): 60.85 graus
-----
CÁLCULO DO ÂNGULO DE EXTINÇÃO (BETA)
Alpha de teste: 30 graus
-----
fx >>

```

Figura B.11 – Resultados do Código - Questão 4.


```
% Dados do Problema
R = 10; % Resistência em Ohms
f = 60; % Frequência em Hz
Vp = 250; % Tensão de pico em Volts (não usada no cálculo de L)
beta = 270 * pi/180; % Ângulo de extinção em radianos (3*pi/2)
omega = 2 * pi * f; % Frequência angular

% --- 1. Resolução da Equação Transcendental para X = tan(phi) ---

% Definir a função f(X) = ln(X) - (3*pi / (2*X))
% A solução para f(X) = 0 nos dá X = tan(phi)
fun = @(X) log(X) - (beta ./ (X));

% Chute inicial (e.g., perto do valor esperado 4.7)
X0 = 4;

% Usar fsolve para encontrar a raiz (X)
% (fsolve precisa do Optimization Toolbox, ou use fzero no Octave)
% No Octave, pode-se usar fsolve, ou reescrever para fzero:
% X = fzero(fun, X0);
% Assumindo fsolve ou um solucionador está disponível:
X_tan_phi = fsolve(fun, X0);

% Exibição do valor de tan(phi)
disp(['Valor de X = tan(phi): ' num2str(X_tan_phi)]);

% --- 2. Cálculo da Indutância L ---

% Formula: L = (R * tan(phi)) / omega
L = (R * X_tan_phi) / omega;

% Exibição do resultado
disp(['Indutância L: ' num2str(L) ' H']);
```

Figura B.12 – Código - Questão 6.

```
clear; clc;

% Dados
Vm = 250; % V de pico
f = 60; % Hz
w = 2*pi*f; % rad/s
R = 10; % Ohms
L = 0.0162; % H
alpha = pi/3; % 60 graus

% Período de 0 a 2pi
theta = linspace(0, 2*pi, 2000);

% Inicializa corrente
i_theta = zeros(size(theta));

% Calcula corrente apenas na condução (de alpha até beta)
phi = atan(w*L/R);
beta = alpha + 2*pi/3; % 120° de condução

idx = theta >= alpha & theta <= beta;
i_theta(idx) = (Vm/sqrt(R^2 + (w*L)^2)) * ...
    ( sin(theta(idx) - phi) - sin(alpha - phi) .* exp(-(R/L/w)*(theta(idx) - alpha)) );

% Plot
figure
plot(theta*180/pi, i_theta, 'b', 'LineWidth', 2)
grid on
xlabel('\theta (graus)')
ylabel('Corrente i(\theta) [A]')
title('Corrente de Retificador Controlado RL (Onda Completa)')
xline(alpha*180/pi, 'r--', '\alpha = 60°')
xline(beta*180/pi, 'k--', '\beta = 180°')
ylim([0 max(i_theta)*1.1])
legend('i(\theta)', '\alpha', '\beta')
```

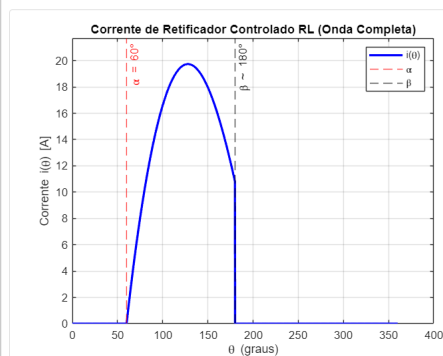


Figura B.13 – Código - Questão 7.

```

1 %-----
2 % Problema 5: Análise Térmica de Diodo
3 %-----
4
5 % --- 1. Dados e Parâmetros (Unidades padrão: C, W, C/W) ---
6
7 PD = 12;           % Potência Dissipada [W]
8 RT_JC_max = 1.3;   % Resistência Térmica Junção-Caixa (Max) [C/W]
9 RT_CS_typ = 0.5;   % Resistência Térmica Caixa-Dissipador (Typ) [C/W]
10 TJ_limite = 130;   % Limite de Temperatura de Junção a ser considerado [C]
11 TJ_max_tabela = 175; % Máximo absoluto da tabela [C]
12
13
14 % --- 2. Item A: Temperatura Ambiente Máxima (TA_max) ---
15 disp('-----');
16 disp(' Item A: Calculo da Temperatura Ambiente Máxima');
17 disp('-----');
18
19 RT_SA_a = 7;       % Resistência Térmica Dissipador-Ambiente [C/W]
20
21 % Resistência Térmica Total entre Junção e Ambiente:
22 RT_Total_a = RT_JC_max + RT_CS_typ + RT_SA_a;
23
24 % Formula: TA_max = TJ_limite - PD * RT_Total
25 TA_max = TJ_limite - (PD * RT_Total_a);
26
27 disp(['Resistência Térmica Total (RT_JC + RT_CS + RT_SA): ' num2str(RT_Total_a) ' C/W']);
28 disp(['Queda de Temperatura (PD * RT_Total): ' num2str(PD * RT_Total_a) ' C']);
29 disp(['Temperatura Ambiente Máxima (TA_max): ' num2str(TA_max) ' C']);
30 disp(' ');
31
32
33 % --- 3. Item B: Resistência Térmica do Dissipador Necessária (RT_SA_b) ---
34 disp('-----');
35 disp(' Item B: Calculo da Resistência do Dissipador Necessária (RT_SA_b)');
36 disp('-----');

```

Item A: Calculo da Temperatura Ambiente Máxima

Resistência Térmica Total (RT_JC + RT_CS + RT_SA): 8.8 C/W
Queda de Temperatura (PD * RT_Total): 105.6 C
Temperatura Ambiente Máxima (TA_max): 24.4 C

Item B: Calculo da Resistência do Dissipador Necessária (RT_SA)

Diferença de Temperatura (TJ_limite - TA): 80 C
Resistência Térmica Total Máxima Permitida: 6.6667 C/W
Resistência do Dissipador Necessária (RT_SA_b): 4.8667 C/W

Zoom: 100% UTF-8 LF script Ln 51 Col 16

Figura B.14 – Código - Questão 5.