



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica

ANDRÉ LUIS BARBOSA RODRIGUES

**SISTEMA ELÉTRICO MONOFÁSICO COM COMPENSAÇÃO E GERAÇÃO DE
ENERGIA USANDO CONVERSOR ESTÁTICO**

Campina Grande, PB
Junho de 2024

André Luis Barbosa Rodrigues

**SISTEMA ELÉTRICO MONOFÁSICO COM COMPENSAÇÃO E GERAÇÃO DE ENERGIA USANDO
CONVERSOR ESTÁTICO**

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenadoria de Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina
Grande como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia
Elétrica.*

Área de concentração: Geração de Energia Elétrica

Orientador: Prof. Cursino Brandão Jacobina, Dr. Ing.

Campina Grande, PB

Junho de 2024

André Luis Barbosa Rodrigues

**SISTEMA ELÉTRICO MONOFÁSICO COM COMPENSAÇÃO E GERAÇÃO DE ENERGIA USANDO
CONVERSOR ESTÁTICO**

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenadoria de Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina
Grande como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia
Elétrica.*

Aprovado em 07/06/2024

Talvanes Meneses Oliveira, D. Sc.

Universidade Federal de Campina Grande

Avaliador, UFCG

Cursino Brandão Jacobina, Dr. Ing.

Universidade Federal de Campina Grande

Orientador, UFCG

Campina Grande, PB

Junho de 2024

Dedico este trabalho aos meus pais e aos meus irmãos, os quais sempre me incentivaram e apoiaram em meus estudos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me dar saúde, força e perseverança para enfrentar os desafios e concluir esta etapa tão importante da minha vida acadêmica.

Aos meus pais, Marcelino e Josélia, por todo amor, apoio incondicional e incentivo constante durante toda a minha trajetória. Vocês são minha inspiração e meu porto seguro. Este trabalho é dedicado a vocês.

Aos meus irmãos, Nathália, Raylander, Renam e Victor, que sempre deram forças e incentivos para que eu pudesse continuar e que juntos formam a base da minha família.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Cursino Brandão Jacobina, pela orientação, paciência e valiosas contribuições ao longo deste projeto. Sua expertise e dedicação foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas e amigos, que compartilharam comigo momentos de estudo, discussão e aprendizado. Agradeço, especialmente, a Francisco Maerle, Alberto Fontan e Vinicius Augusto, pelo apoio e pela parceria durante essa jornada.

Aos professores e funcionários da Universidade Federal de Campina Grande, especialmente ao Departamento de Engenharia Elétrica, por proporcionarem um ambiente de aprendizado e crescimento profissional.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste TCC. A cada um de vocês, o meu mais sincero obrigado.

RESUMO

Este trabalho apresenta a modelagem, simulação e controle de um conversor CA-CC-CA monofásico de três braços utilizando “software” de código aberto para computação numérica. O objetivo principal é verificar o funcionamento do conversor em diferentes condições operacionais e demonstrar sua eficiência e estabilidade ao controlar a energia fornecida à carga. Para isso, foram implementadas técnicas de controle preditivo e modulação por largura de pulso (PWM). Uma fonte de corrente foi adicionada ao barramento CC para simular um painel fotovoltaico ou uma carga CC, dependendo do cenário de simulação. Os resultados das simulações mostram que o conversor consegue regular a tensão e a corrente de forma eficiente, mesmo em condições variáveis de carga, confirmando a eficácia das técnicas de controle aplicadas. Este estudo contribui para o desenvolvimento de sistemas de conversão de energia mais eficientes e estáveis, com potencial para diversas aplicações industriais e domésticas.

Palavras-chave: Conversor CA-CC-CA, Controle Preditivo, Modulação por Largura de Pulso (PWM), Fonte de Corrente.

ABSTRACT

This work presents the modeling, simulation, and control of a single-phase three-leg AC-DC-AC converter using open-source software for numerical computation. The main objective is to verify the converter's performance under different operating conditions and demonstrate its efficiency and stability in controlling the power supplied to the load. Predictive control techniques and pulse width modulation (PWM) were implemented. A current source was added to the DC bus to simulate a photovoltaic panel or a DC load, depending on the simulation scenario. Simulation results show that the converter effectively regulates voltage and current even under variable load conditions, confirming the effectiveness of the applied control techniques. This study contributes to the development of more efficient and stable energy conversion systems, with potential applications in various industrial and domestic settings.

Keywords: AC-DC-AC Converter, Predictive Control, Pulse Width Modulation (PWM), Current Source.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Conversor Monofásico CA-CC-CA de três braços.....	9
Figura 2 - Conversor de três braços com fonte de corrente contínua.....	11
Figura 3 - Gráfico de tensão ($v_g/100$) e corrente ($i_g/5$) sem fonte de corrente.....	17
Figura 4 - Gráfico de tensão média ($v_{gmed}/100$) e corrente ($i_g/5$) sem fonte de corrente.	17
Figura 5 - Gráfico de tensão ($v_l/100$) e corrente ($i_l/5$) sem fonte de corrente.	18
Figura 6 - Gráfico de tensão media ($v_{lmed}/100$) e corrente ($i_l/5$) sem fonte de corrente.....	18
Figura 7 - Gráfico das potências em kW sem fonte de corrente.....	19
Figura 8 – Gráfico de tensão de referência e tensão atual do barramento CC.	19
Figura 9 - Gráfico de tensão ($v_l/100$) e corrente ($i_g/5$) com fonte de corrente positiva.	20
Figura 10 - Gráfico de tensão média ($v_{lmed}/100$) e corrente ($i_g/5$) com fonte de corrente positiva.	21
Figura 11 - Gráfico de tensão ($v_l/100$) e corrente ($i_l/5$) com fonte de corrente positiva.....	21
Figura 12 - Gráfico de tensão media ($v_{lmed}/100$) e corrente ($i_l/5$) com fonte de corrente positiva.	22
Figura 13 - Gráfico das potências em kW com fonte de corrente positiva.	22
Figura 14 - Gráfico de tensão de referência e tensão atual do barramento CC.	23
Figura 15 - Gráfico de tensão ($v_g/100$) e corrente ($i_g/5$) com fonte de corrente negativa.....	24
Figura 16 - Gráfico de tensão média ($v_{gmed}/100$) e corrente ($i_g/5$) com fonte de corrente negativa.	24
Figura 17 - Gráfico de tensão ($v_l/100$) e corrente ($i_l/5$) com fonte de corrente negativa.....	25
Figura 18 - Gráfico de tensão media ($v_{lmed}/100$) e corrente ($i_l/5$) com fonte de corrente negativa.	25
Figura 19 - Gráfico das potências em kW com fonte de corrente positiva.	26
Figura 20 - Gráfico de tensão de referência e tensão atual do barramento CC.	26

LISTA DE ABREVIATURAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada (Insulated Gate Bipolar Transistor)
PWM	Modulação por Largura de Pulso (Pulse Width Modulation)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1	Conversores CA-CC-CA Monofásicos de Três Braços	9
2.2	Controle Preditivo.....	10
2.3	Fontes de Corrente em Barramentos CC	10
2.4	Técnicas de Modulação por Largura de Pulso (PWM).....	10
3	METODOLOGIA	11
3.1	Descrição Técnica do Conversor Monofásico de Três Braços	11
3.1.1	Modelo Matemático do Conversor	12
3.1.2	Modulação por Largura de Pulso (PWM)	12
3.1.3	Ferramentas e softwares usados para simulação	14
3.2	Procedimentos para a Modelagem e Implementação.....	14
3.2.1	Modelagem do Conversor CA-CC-CA	14
3.2.2	Desenvolvimento do Controle.....	15
3.2.3	Configuração da Simulação.....	15
3.3	Coleta e Análise de Dados	15
4	RESULTADOS	16
4.1	Cenário 1: Conversor Alimentado pela Rede Elétrica	16
4.2	Cenário 2: Simulação de Painel Fotovoltaico.....	20
4.3	Resultados do Cenário 3: Simulação de carga CC.....	23
4.4	Análise de Resultado e Consideração Final.....	27
5	CONCLUSÃO	28
	Referências	29

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a crescente demanda por eficiência energética e a necessidade de melhorar a qualidade da energia fornecida aos consumidores têm impulsionado o desenvolvimento de tecnologias avançadas de conversão de energia. Entre essas tecnologias, destacam-se os conversores CA-CC-CA monofásicos de três braços, que oferecem uma solução eficaz para a regulação da tensão e corrente em sistemas de energia elétrica. Esses conversores são amplamente utilizados em diversas aplicações, incluindo sistemas de acionamento de motores, compensação reativa e fontes de alimentação ininterrupta.

O conversor CA-CC-CA monofásico de três braços é uma topologia que permite um controle preciso e eficiente da energia elétrica. Ele é composto por três braços de comutação, onde cada braço do conversor possui duas chaves semicondutoras (IGBTs), com diodos em antiparalelo. Essas chaves são controladas para converter a corrente alternada (CA) da rede elétrica em corrente alternada (CA) modificada para a carga. Essa configuração permite que o conversor regule a tensão e a corrente fornecidas à carga, otimizando o desempenho do sistema.

Para garantir a operação estável e eficiente do conversor, técnicas avançadas de controle são empregadas. Entre elas, destaca-se o controle preditivo, que utiliza um modelo do sistema para prever o comportamento futuro e calcular as ações de controle ótimas. Além disso, a técnica de modulação por largura de pulso (PWM) é utilizada para controlar as chaves semicondutoras, ajustando a amplitude da tensão de saída e garantindo a redução de distorções harmônicas.

Neste trabalho, são apresentados a modelagem, simulação e controle de um conversor CA-CC-CA monofásico de três braços utilizando “software” de código aberto para computação numérica (Scilab). O objetivo principal é verificar o funcionamento do conversor em diferentes condições operacionais e demonstrar sua eficiência e estabilidade ao controlar a energia fornecida à carga. Além disso, uma fonte de corrente é adicionada ao barramento CC para simular um painel fotovoltaico ou uma carga CC, dependendo do cenário de simulação.

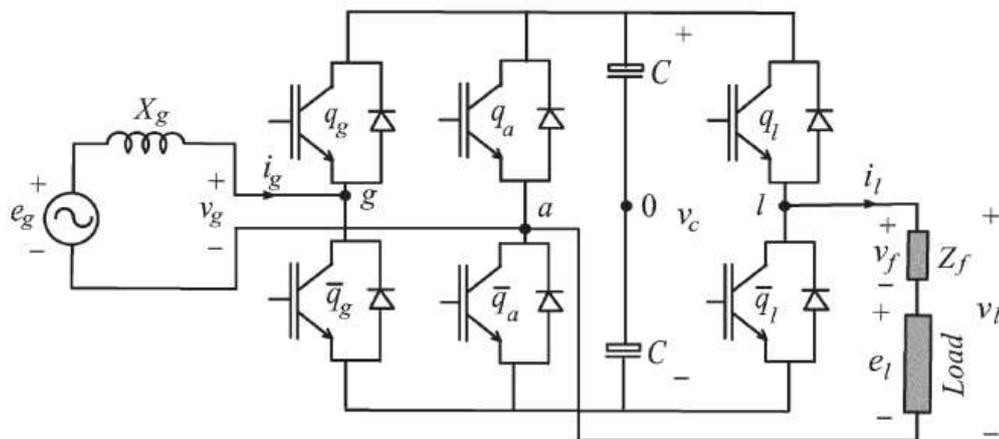
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, é apresentada uma revisão da literatura existente sobre conversores CA-CC-CA monofásicos de três braços, técnicas de controle preditivo e outras tecnologias relevantes para o desenvolvimento e operação eficiente desses sistemas.

2.1 Conversores CA-CC-CA Monofásicos de Três Braços

Conversores CA-CC-CA são amplamente utilizados em aplicações de conversão de energia, especialmente em sistemas de acionamento de motores e compensação reativa. Esses conversores primeiro convertem o sinal da fonte com amplitude de tensão e frequência fixa em um sinal contínuo, em seguida, apresentam como saída um sinal alternado com amplitude e frequência controlada que será aplicado a carga. Os conversores CA-CC-CA monofásicos de três braços são uma variante desses dispositivos, projetados para fornecer um controle mais refinado e eficiente da tensão e corrente de saída. De acordo com Blaabjerg et al. (2006), esses conversores são capazes de regular a tensão de saída com alta precisão, o que é essencial para aplicações que exigem uma qualidade de energia superior. A representação do conversor de três braços é ilustrada na Figura 1.

Figura 1 - Conversor Monofásico CA-CC-CA de três braços.



Fonte: Adaptação de (JACOBINA, 2006).

2.2 Controle Preditivo

O controle preditivo é uma técnica avançada de controle que utiliza um modelo do sistema para prever o comportamento futuro e calcular as ações de controle ótimas. Essa abordagem é especialmente útil em sistemas de potência, onde a dinâmica rápida e as incertezas podem dificultar o controle com métodos tradicionais. Segundo Rodriguez et al. (2010), o controle preditivo tem sido eficaz na redução de distorções harmônicas e na melhoria da resposta transitória em conversores de potência

No contexto dos conversores CA-CC-CA, o controle preditivo permite ajustar continuamente os parâmetros de controle para minimizar o erro na corrente fundamental e antecipar variações na carga e fornecimento de energia. Essa técnica melhora significativamente a eficiência e a estabilidade do sistema.

2.3 Fontes de Corrente em Barramentos CC

A adição de fontes de corrente em barramentos CC é uma prática comum para simular variações de carga e fontes de geração, como painéis fotovoltaicos. Essas fontes injetam corrente no barramento, permitindo que o sistema opere em diferentes condições de entrada e carga. A simulação de painéis fotovoltaicos ou cargas CC usando fontes de corrente ajuda a testar a resposta do conversor em cenários realistas e variados, melhorando a robustez e a adaptabilidade do sistema.

2.4 Técnicas de Modulação por Largura de Pulso (PWM)

A modulação por largura de pulso (PWM) é uma técnica amplamente utilizada para controlar a operação dos conversores de potência. O PWM ajusta a amplitude da tensão de saída por meio da modulação dos sinais de controle das chaves semicondutoras. Essa técnica permite uma regulação precisa da tensão de saída e a redução de distorções harmônicas. Segundo Muñoz et al. (2020), o PWM é essencial para a operação eficiente dos conversores de potência, proporcionando controle fino e resposta rápida às variações de carga.

3 METODOLOGIA

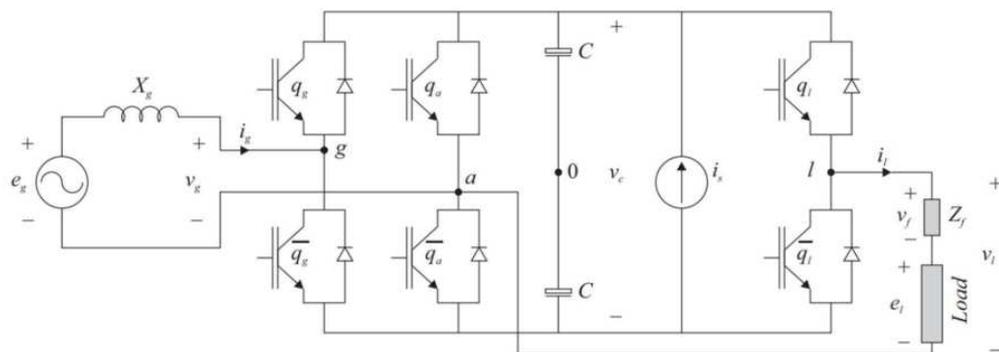
Nesta seção, detalha-se a metodologia utilizada para modelar, simular e controlar o conversor CA-CC-CA monofásico de três braços. A metodologia abrange desde a descrição técnica do conversor até a implementação prática das simulações, utilizando “software” de código aberto para computação numérica (Scilab), e a análise dos resultados.

3.1 Descrição Técnica do Conversor Monofásico de Três Braços

O conversor monofásico de três braços é composto por três braços de comutação e um capacitor no barramento CC. Cada braço do conversor possui duas chaves semicondutoras (IGBTs) com diodos em antiparalelo, que são controlados para converter o sinal de tensão alternada (CA) da rede elétrica em contínua (CC) e, em seguida, reconverter esse sinal em alternado (CA), com amplitude e frequência de acordo com a condição solicitada pela carga. Um desses braços é compartilhado entre a carga e a fonte. A fonte de tensão (rede) é conectada entre o braço da fonte e o braço compartilhado, enquanto a carga a ser alimentada é conectada entre o braço compartilhado e o braço da carga. Essa configuração permite que o conversor regule a tensão e a corrente fornecidas à carga, otimizando o desempenho do sistema.

A Figura 2 ilustra o sistema que é o objetivo de estudo deste trabalho, o conversor monofásico de três braços adicionado de uma fonte de corrente CC conectado ao barramento do sistema.

Figura 2 - Conversor de três braços com fonte de corrente contínua.



Fonte: Adaptação de (JACOBINA, 2006).

A tensão de entrada v_g e a tensão de saída v_l podem ser obtidas a partir do conjunto de equações que descrevem o funcionamento do conversor. As equações são apresentadas a seguir:

3.1.1 Modelo Matemático do Conversor

O modelo do sistema para uma carga indutiva sem filtro é dado por (1) e (2):

$$e_g = r_g i_g + l_g \frac{di_g}{dt} + v_g \quad (1)$$

$$v_l = r_l i_l + l_l \frac{di_l}{dt}. \quad (2)$$

Onde:

- e_g é a tensão da fonte;
- r_g e l_g são a resistência e a indutância do filtro da rede, respectivamente;
- i_g é a corrente da rede;
- v_g é a tensão entre o braço da rede (g) e o braço compartilhado (a);
- r_l e l_l são a resistência e a indutância da carga, respectivamente;
- i_l é a corrente na carga;
- v_l é a tensão entre o braço compartilhado (a) e o braço da rede (l).

As tensões v_g e v_l são definidas conforme as equações (3) e (4).

$$v_g = v_{g0} - v_{a0} \quad (3)$$

$$v_l = v_{l0} - v_{a0}. \quad (4)$$

Onde:

- v_{g0} , v_{l0} e v_{a0} são as tensões nos polos.

As tensões nos polos são dadas pelas equações (5), (6) e (7).

$$v_{g0} = (2q_g - 1) \frac{v_c}{2}, \quad (5)$$

$$v_{l0} = (2q_l - 1) \frac{v_c}{2} \quad (6)$$

$$v_{a0} = (2q_a - 1) \frac{v_c}{2}. \quad (7)$$

Onde v_c é a tensão instantânea no barramento CC e q_g , q_l , e q_a são as variáveis binárias das chaves (0 ou 1) relativo aos braços.

3.1.2 Modulação por Largura de Pulso (PWM)

A modulação por largura de pulso (PWM) é uma técnica utilizada para controlar as chaves semicondutoras no conversor. A PWM ajusta a amplitude da tensão de saída por meio

da modulação dos sinais de controle, permitindo uma regulação precisa da tensão e a redução de distorções harmônicas.

O modelo de tensão em termos dos valores de referência é dado por (8) e (9).

$$v_g^* = v_{g0}^* - v_{a0}^* \text{ e} \quad (8)$$

$$v_l^* = v_{l0}^* - v_{a0}^* \quad (9)$$

Introduzindo a variável auxiliar v_μ^* (onde $v_\mu^* = v_{a0}^*$), as tensões de polo de referência v_{g0}^* , v_{l0}^* e v_{a0}^* podem ser relacionadas com as referências v_g^* e v_l^* conforme as equações (10), (11) e (12).

$$v_{g0}^* = v_g^* + v_\mu^* , \quad (10)$$

$$v_{l0}^* = v_l^* + v_\mu^* \text{ e} \quad (11)$$

$$v_{a0}^* = v_\mu^* . \quad (12)$$

Para calcular v_{g0}^* , v_{l0}^* e v_{a0}^* a partir de v_g^* e v_l^* , é necessário determinar os valores máximo e mínimo de v_μ^* : Os valores de máximo e de mínimo são definidos conforme as equações (13) e (14).

$$v_{\mu,max}^* = \frac{v_c}{2} - \max(V) \text{ e} \quad (13)$$

$$v_{\mu,min}^* = -\frac{v_c}{2} - \min(V) . \quad (14)$$

Onde $V = \{v_g^*, v_l^*, 0\}$.

Escolhido v_μ^* no intervalo $[v_{\mu,max}^*, v_{\mu,min}^*]$, e dados v_g^* e v_l^* , determinam-se v_{g0}^* , v_{l0}^* e v_{a0}^* a partir das equações (10), (11) e (12).

Para aumentar a precisão do controle PWM é necessário realizar correção das tensões de polo de referência v_{g0}^* , v_{l0}^* e v_{a0}^* antes da comparação com a onda triangular. As tensões de polo de referência corrigidas são dadas pelas equações (15), (16) e (17):

$$v_{g0corr}^* = v_{g0}^* \times \frac{V_{cref}}{V_c} , \quad (15)$$

$$v_{l0corr}^* = v_{l0}^* \times \frac{V_{cref}}{V_c} , \quad (16)$$

$$v_{a0corr}^* = v_{a0}^* \times \frac{V_{cref}}{V_c} , \quad (17)$$

A correção das tensões de polo de referência antes da comparação com a onda triangular é essencial para garantir que o sistema de controle do conversor funcione de maneira precisa, estável e eficiente, mesmo sob variações na tensão do barramento CC. Esta prática melhora a resposta do sistema às mudanças operacionais e assegura uma melhor qualidade da energia fornecida.

A comparação entre a tensão de referência e a onda triangular é realizada para determinar o momento exato em que as chaves semicondutoras (IGBTs) devem ser ligados ou desligados. Quando a tensão de referência é maior do que a onda triangular, a chave é ligada (estado ON). Quando a tensão de referência é menor, a chave é desligada (estado OFF).

Então, a comparação de v_{g0corr}^* , v_{l0corr}^* e v_{a0corr}^* com uma onda triangular determina o estado das chaves q_g , q_l e q_a .

3.1.3 Ferramentas e softwares usados para simulação

Para a modelagem e simulação do sistema, foi utilizado “software” de código aberto para computação numérica (Scilab), que oferece um ambiente robusto para a simulação de sistemas de potência e controle.

3.2 Procedimentos para a Modelagem e Implementação

3.2.1 Modelagem do Conversor CA-CC-CA

- **Conversor CA-CC-CA:** O conversor foi implementado utilizando “software” de código aberto (Scilab), que define as características das chaves semicondutoras (IGBTs) e configurações de acordo com as especificações técnicas.
- **Simulação de Painel Fotovoltaico:** Uma fonte de corrente é conectada ao barramento CC para simular a geração de energia e analisar o comportamento do conversor sob essa condição.
- **Simulação de Carga CC:** Uma fonte de corrente conectada ao barramento é utilizada para simular a demanda de energia, desempenhando o papel de uma carga CC, permitindo a análise do comportamento do conversor sob essa condição.

3.2.2 Desenvolvimento do Controle

- **Modulação PWM:** A técnica de modulação por largura de pulso foi implementada para controlar as chaves do conversor, ajustando a amplitude da tensão de saída e garantindo a redução de distorções harmônicas.
- **Controle de Corrente Digital Preditivo:** Controladores de corrente digitais preditivos foram desenvolvidos para assegurar a precisão no controle da corrente, minimizando o erro na corrente fundamental e antecipando as variações de carga e fornecimento de energia.

3.2.3 Configuração da Simulação

Configura os parâmetros das fontes, do controlador, do barramento CC, do filtro da rede e da carga.

- **Cenários de Simulação:**
 - **Cenário 1:** O conversor é alimentado apenas pela rede elétrica para fornecer energia à carga. Este cenário serve como referência para comparação.
 - **Cenário 2:** Um painel fotovoltaico é conectado ao barramento CC, simulando a geração de energia e avaliando o desempenho do conversor.
 - **Cenário 3:** Uma carga CC é conectada ao barramento, simulando a demanda de energia e avaliando o desempenho do conversor.

3.3 Coleta e Análise de Dados

Durante as simulações, os dados de tensão, corrente e potência são coletados para análise. Ferramentas do “software” de código aberto (Scilab) foram utilizadas para processar e visualizar os resultados, permitindo uma compreensão clara do desempenho do conversor em diferentes condições operacionais.

4 RESULTADOS

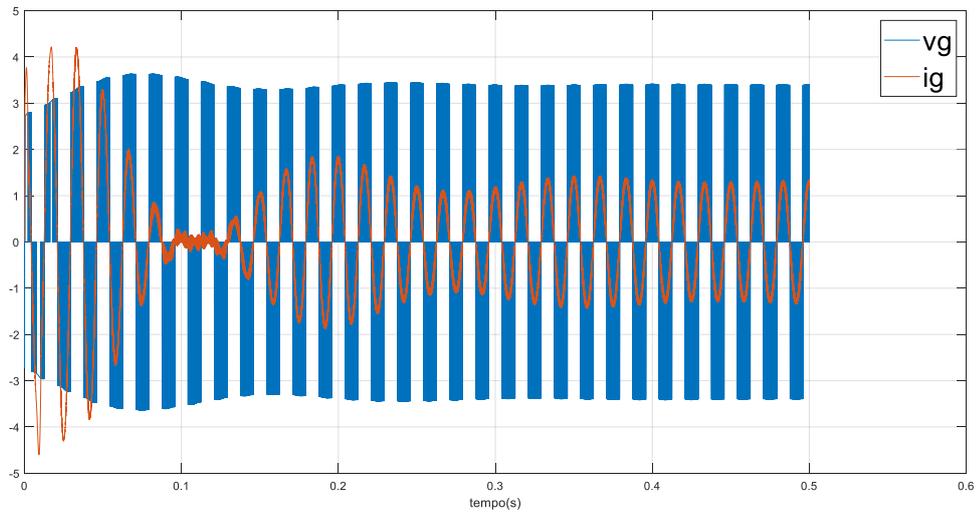
Nesta seção, são apresentados os resultados das simulações realizadas para o conversor CA-CC-CA monofásico de três braços em diferentes condições operacionais. As simulações foram realizadas utilizando software de código aberto para computação numérica (Scilab), e os dados de tensão, corrente e potência foram coletados e analisados. Para melhor visualização dos gráficos os valores de corrente, tensão e potência serão divididos por 5, 100 e 1000, respectivamente.

4.1 Cenário 1: Conversor Alimentado pela Rede Elétrica

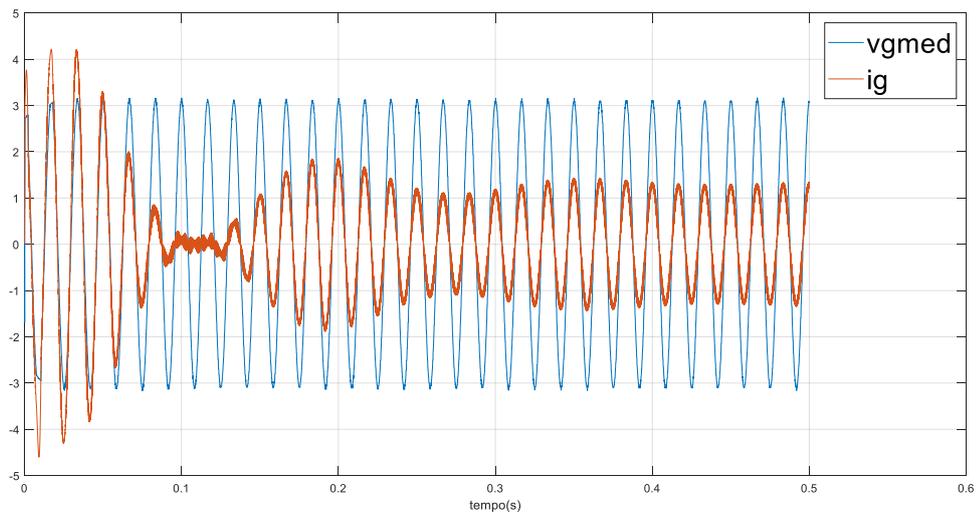
No primeiro cenário, o conversor é alimentado apenas pela rede elétrica para fornecer energia à carga. Este cenário serve como referência para comparação com os outros cenários. Os gráficos de tensão, corrente e potência para este cenário são ilustrados nas figuras 3 a 8.

- **Figura 3:** Gráfico de tensão v_g e corrente i_g na entrada do conversor.
- **Figura 4:** Gráfico de tensão média v_{gmed} e corrente i_g na entrada do conversor.
- **Figura 5:** Gráfico de tensão v_l e corrente i_l na saída do conversor.
- **Figura 6:** Gráfico de tensão média v_{lmed} e corrente i_l na saída do conversor.
- **Figura 7:** Gráfico das potências médias na entrada, saída, fonte de corrente CC e somatório destas potências.
- **Figura 8:** Gráfico da tensão de referência do barramento v_{cref} e da tensão de barramento atual v_c sem fonte de corrente.

As figuras 3 e 4, evidenciam que a tensão v_g e corrente i_g estão em fase, estabelecendo fornecimento de energia da rede para a carga, conforme esperado. As figuras 5 e 6 ilustram a corrente i_l atrasada em relação a tensão v_l , resultado esperado devido ser uma carga indutiva.

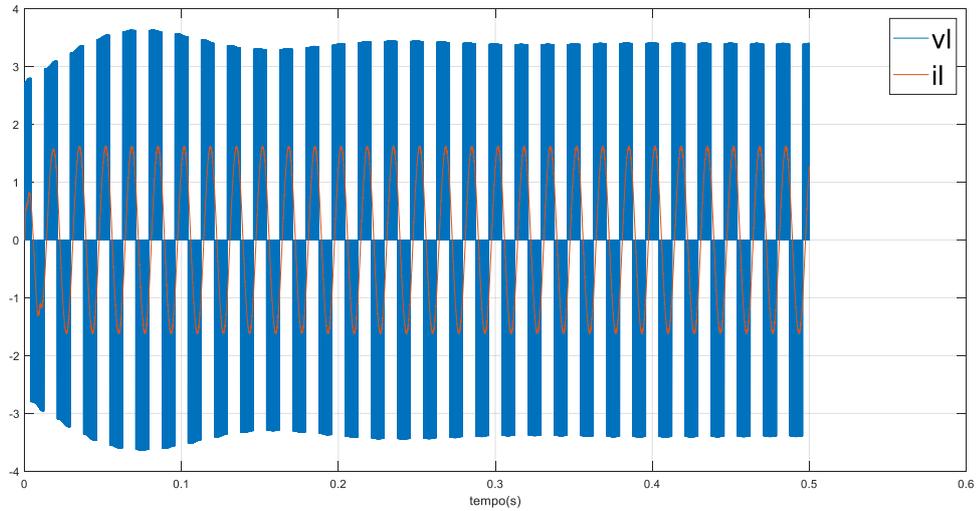
Figura 3 - Gráfico de tensão ($v_g/100$) e corrente ($i_g/5$) sem fonte de corrente.

Fonte: Autoria Própria.

Figura 4 - Gráfico de tensão média ($v_{gmed}/100$) e corrente ($i_g/5$) sem fonte de corrente.

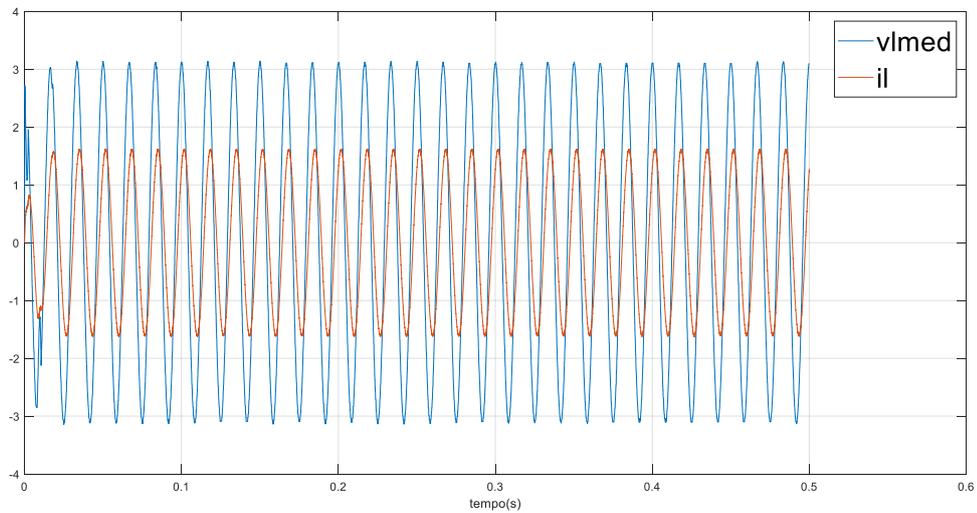
Fonte: Autoria Própria.

Figura 5 - Gráfico de tensão ($v_g/100$) e corrente ($i_l/5$) sem fonte de corrente.



Fonte: Autoria Própria.

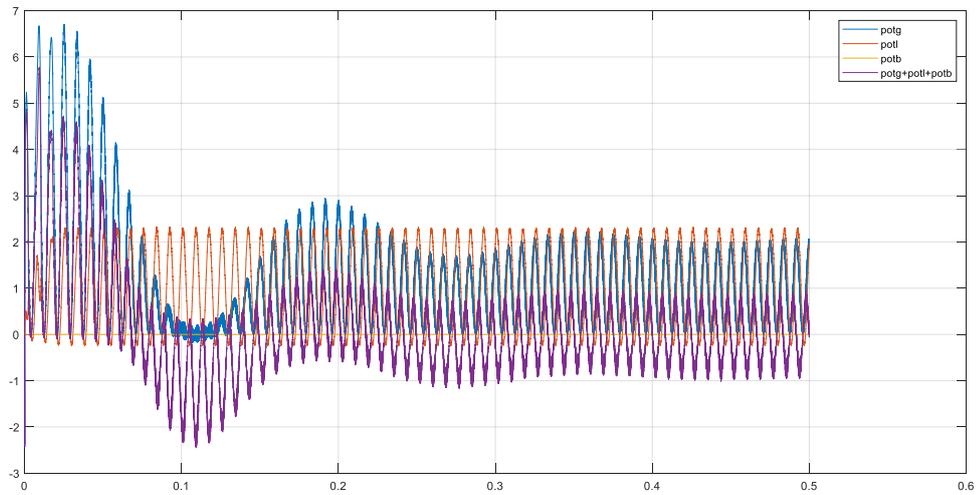
Figura 6 - Gráfico de tensão média ($v_{lmed}/100$) e corrente ($i_l/5$) sem fonte de corrente.



Fonte: Autoria Própria.

A figura 7 ilustra os gráficos de potências do sistema, onde temos a potência fornecida da rede praticamente igual a potência na carga, a potência fornecida pela fonte de corrente é nula e a soma das potências aproximadamente zero.

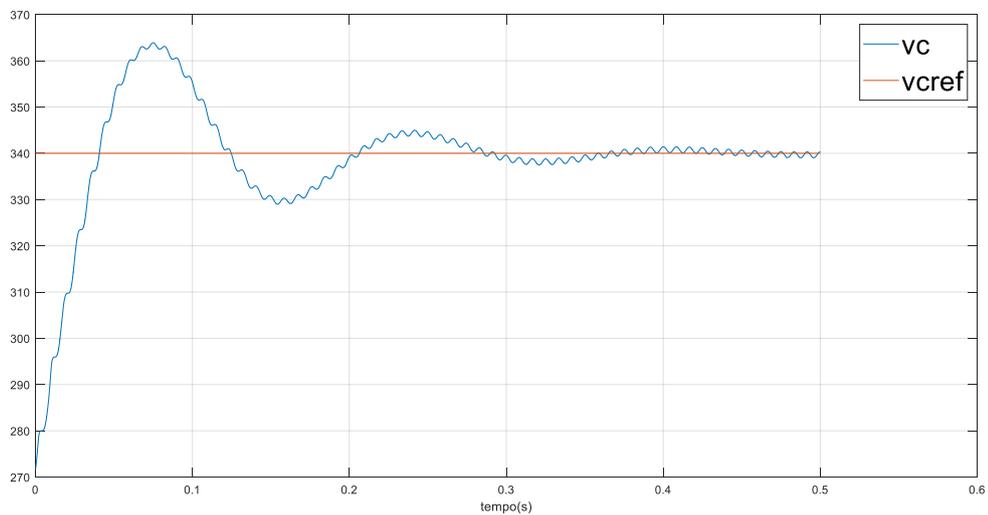
Figura 7 - Gráfico das potências em kW sem fonte de corrente.



Fonte: Autoria Própria.

A figura 8 ilustra a tensão instantânea do barramento seguindo a tensão de referência do sistema, a partir de oitenta por cento do valor nominal.

Figura 8 – Gráfico de tensão de referência e tensão atual do barramento CC.



Fonte: Autoria Própria.

Os resultados mostram que o conversor consegue regular a tensão e a corrente de forma eficiente, fornecendo energia estável à carga.

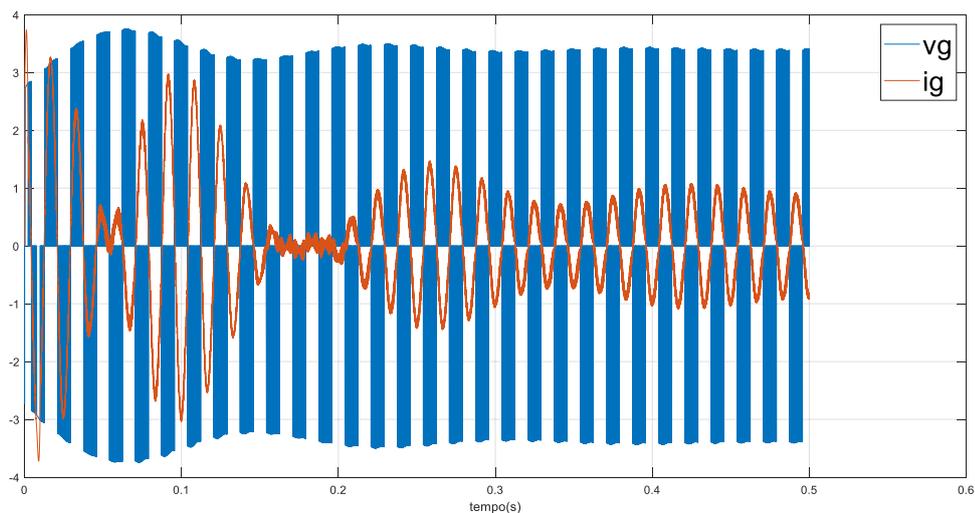
4.2 Cenário 2: Simulação de Painel Fotovoltaico

No segundo cenário, um painel fotovoltaico é conectado ao barramento CC para simular a geração de energia. Os gráficos de tensão, corrente e potência para este cenário são ilustrados nas figuras 9 a 14.

- **Figura 9:** Gráfico de tensão v_g e corrente i_g na entrada do conversor.
- **Figura 10:** Gráfico de tensão média v_{gmed} e corrente i_g na entrada do conversor.
- **Figura 11:** Gráfico de tensão v_l e corrente i_l na saída do conversor.
- **Figura 12:** Gráfico de tensão média v_{lmed} e corrente I_l na saída do conversor.
- **Figura 13:** Gráfico das potências médias na entrada, saída, fonte de corrente CC e somatório destas potências.
- **Figura 14:** Gráfico da tensão de referência do barramento v_{cref} e da tensão de barramento atual v_c com fonte de corrente (positiva).

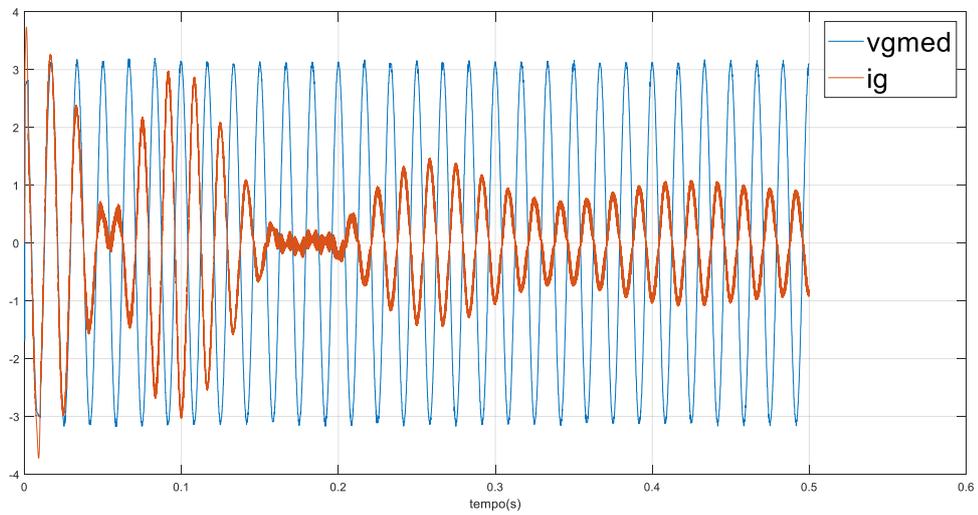
As figuras 9 e 10, evidenciam que a tensão v_g e corrente i_g estão invertidos em 180° , estabelecendo que a rede está recebendo a energia excedente do sistema. As figuras 11 e 12 ilustram a corrente i_l atrasada em relação a tensão v_l , ou seja, mesmo havendo inversão da corrente na entrada do conversor, o sistema consegue controlar a tensão e a corrente de saída do sistema.

Figura 9 - Gráfico de tensão ($v_l/100$) e corrente ($i_g/5$) com fonte de corrente positiva.



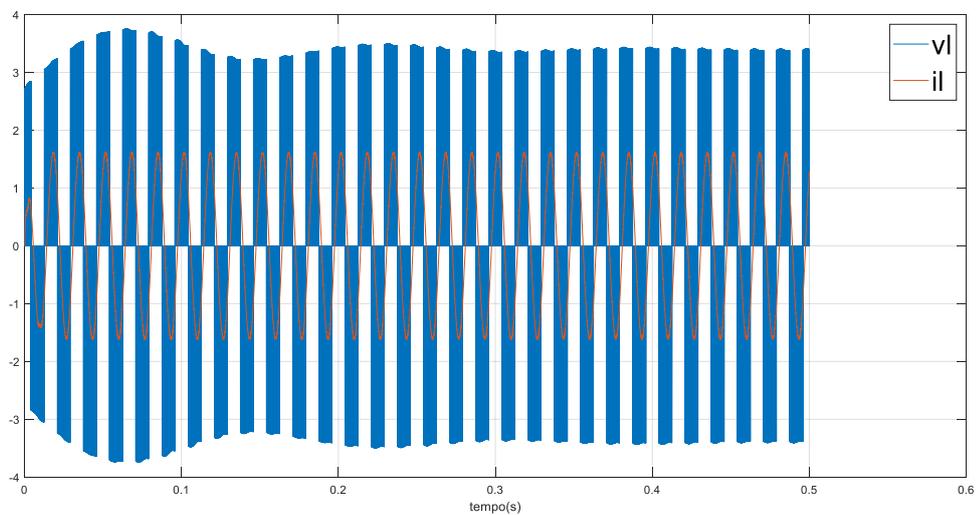
Fonte: Autoria Própria.

Figura 10 - Gráfico de tensão média ($v_{lmed}/100$) e corrente ($i_g/5$) com fonte de corrente positiva.



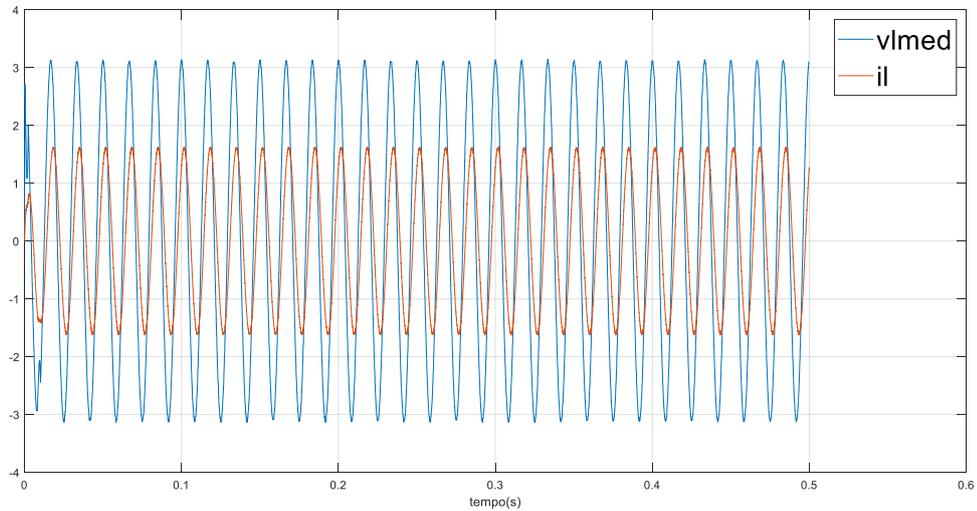
Fonte: Autoria Própria.

Figura 11 - Gráfico de tensão ($v_l/100$) e corrente ($i_l/5$) com fonte de corrente positiva.



Fonte: Autoria Própria.

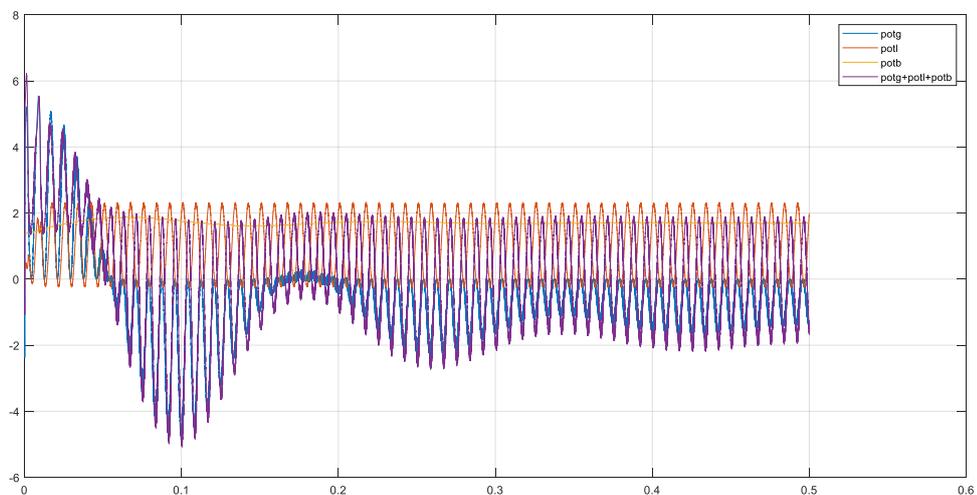
Figura 12 - Gráfico de tensão média ($v_{med}/100$) e corrente ($i_l/5$) com fonte de corrente positiva.



Fonte: Autoria Própria.

A figura 13 ilustra os gráficos de potências do sistema, onde temos a potência fornecida da rede negativa, significando está absorvendo energia do sistema. A potência da carga é a mesma e positiva, evidenciando está consumindo energia. A potência fornecida pela fonte de corrente é positiva, evidenciando está fornecendo energia a carga, e apresenta uma pequena ondulação devido a tensão no capacitor. E a soma das potências aproximadamente zero, confirmando que o sistema está operando corretamente.

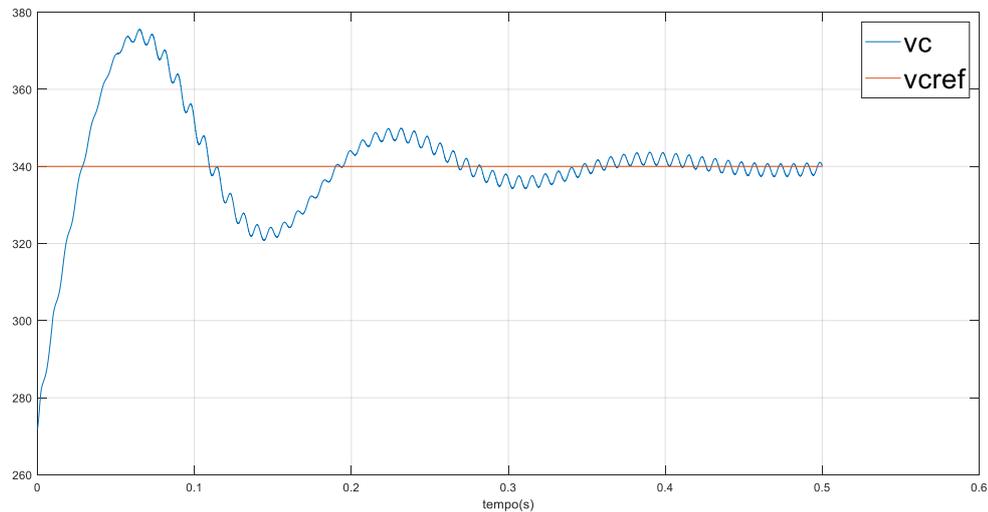
Figura 13 - Gráfico das potências médias com fonte de corrente positiva.



A figura 14 ilustra a tensão instantânea do barramento seguindo a tensão de referência do sistema, a partir de oitenta por cento do valor nominal.

Fonte: Autoria Própria.

Figura 14 - Gráfico de tensão de referência e tensão atual do barramento CC.



Fonte: Autoria Própria.

Os resultados indicam que o conversor pode integrar a energia gerada pelo painel fotovoltaico de maneira eficaz, regulando a tensão e a corrente de saída, mandando a energia excedente para a rede.

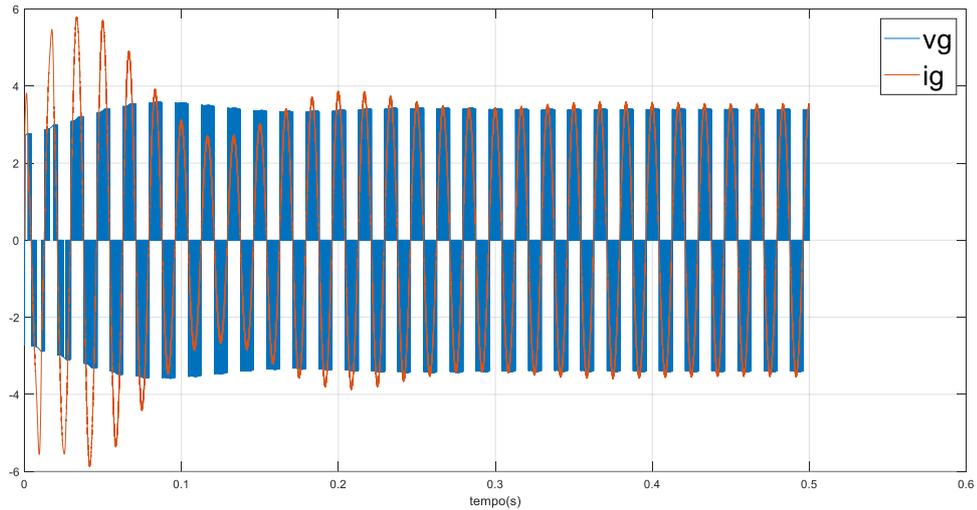
4.3 Resultados do Cenário 3: Simulação de carga CC

No terceiro cenário, uma fonte de corrente conectada ao barramento é utilizada para simular a demanda de energia, desempenhando o papel de uma carga CC, permitindo a análise do comportamento do conversor sob essa condição. Os gráficos de tensão, corrente e potência para este cenário são ilustrados nas figuras 15 a 20.

- **Figura 15:** Gráfico de tensão v_g e corrente i_g na entrada do conversor.
- **Figura 16:** Gráfico de tensão média v_{gmed} e corrente i_g na entrada do conversor.
- **Figura 17:** Gráfico de tensão v_l e corrente i_l na saída do conversor.
- **Figura 18:** Gráfico de tensão média v_{lmed} e corrente i_l na saída do conversor.
- **Figura 19:** Gráfico das potências médias na entrada, saída, fonte de corrente CC e somatório destas potências.

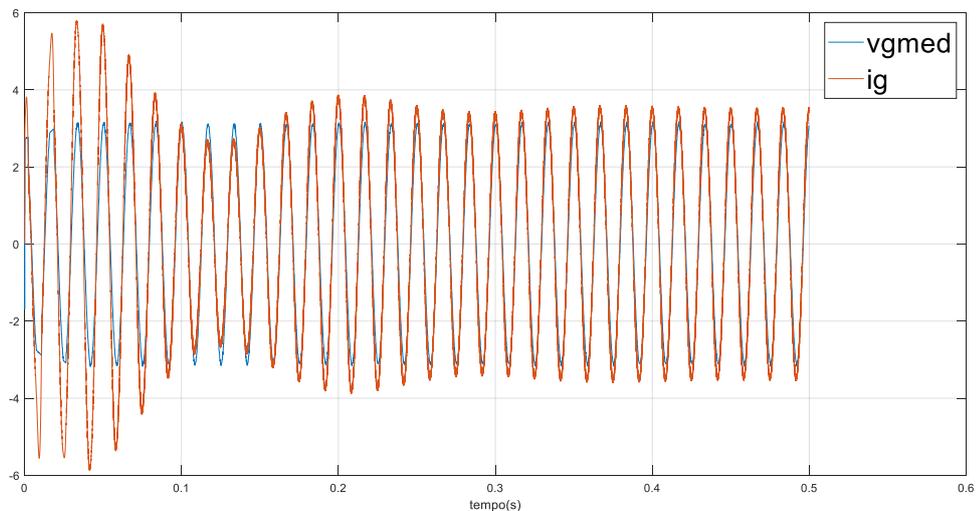
As figuras 15 e 16, evidenciam que a tensão v_g e corrente i_g estão em fase, estabelecendo fornecimento de energia da rede para a carga, porém com uma corrente maior que na Figura 4, ou seja, há uma demanda maior de energia solicitada a rede. As figuras 17 e 18 ilustram a corrente i_l atrasada em relação a tensão v_l , praticamente não houve alterações.

Figura 15 - Gráfico de tensão ($v_g/100$) e corrente ($i_g/5$) com fonte de corrente negativa.



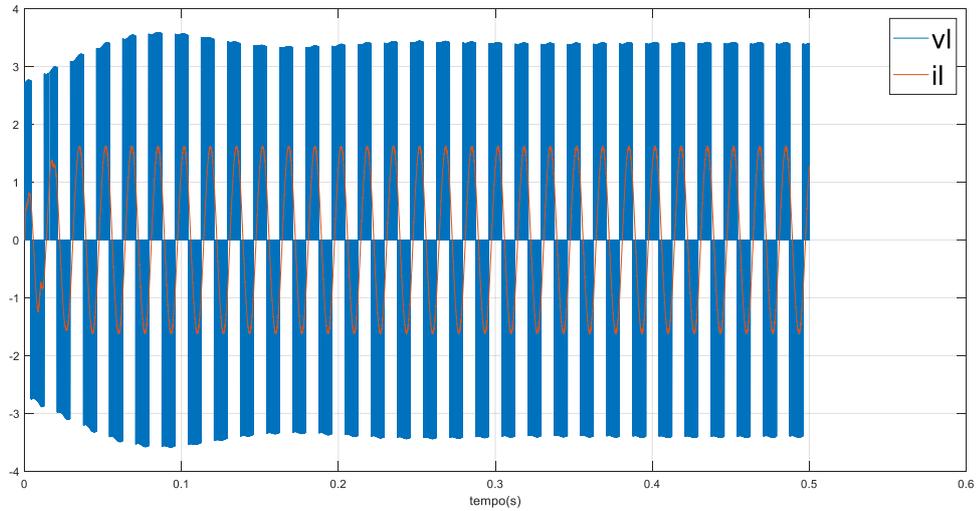
Fonte: Autoria Própria.

Figura 16 - Gráfico de tensão média ($v_{gmed}/100$) e corrente ($i_g/5$) com fonte de corrente negativa.



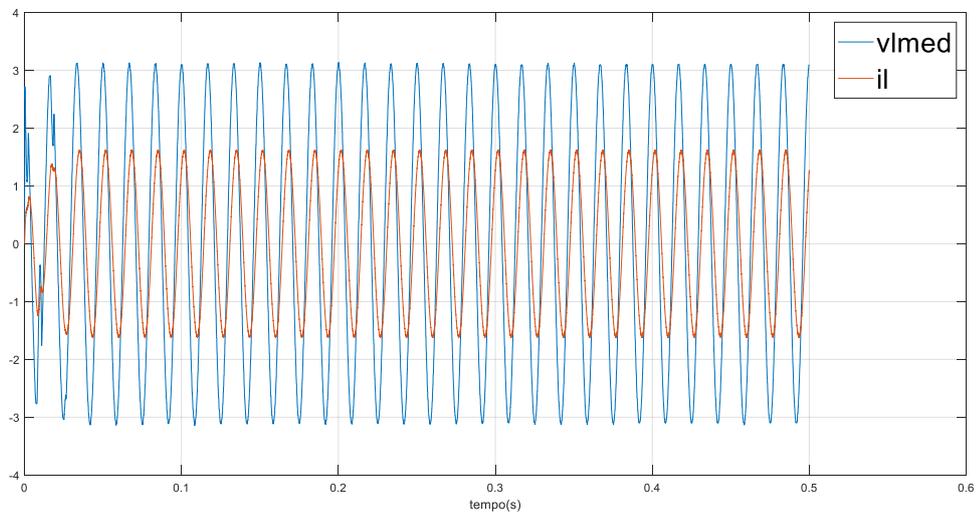
Fonte: Autoria Própria.

Figura 17 - Gráfico de tensão ($v_l/100$) e corrente ($i_l/5$) com fonte de corrente negativa.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 18 - Gráfico de tensão média ($v_{lmed}/100$) e corrente ($i_l/5$) com fonte de corrente negativa.

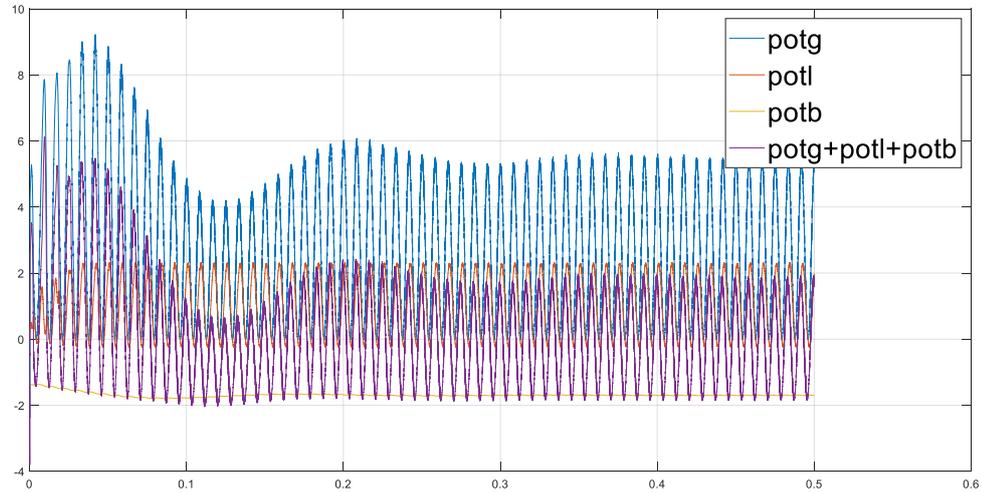


Fonte: Autoria Própria.

A figura 19 ilustra os gráficos de potências do sistema, onde temos a potência fornecida da rede positiva e maior que na Figura 7, significando está fornecendo mais energia ao sistema. A potência da carga é a mesma e positiva, evidenciando está consumindo energia. A potência fornecida pela fonte de corrente é negativa, evidenciando está absorvendo energia do sistema.

E a soma das potências aproximadamente zero, confirmando que o sistema está operando corretamente.

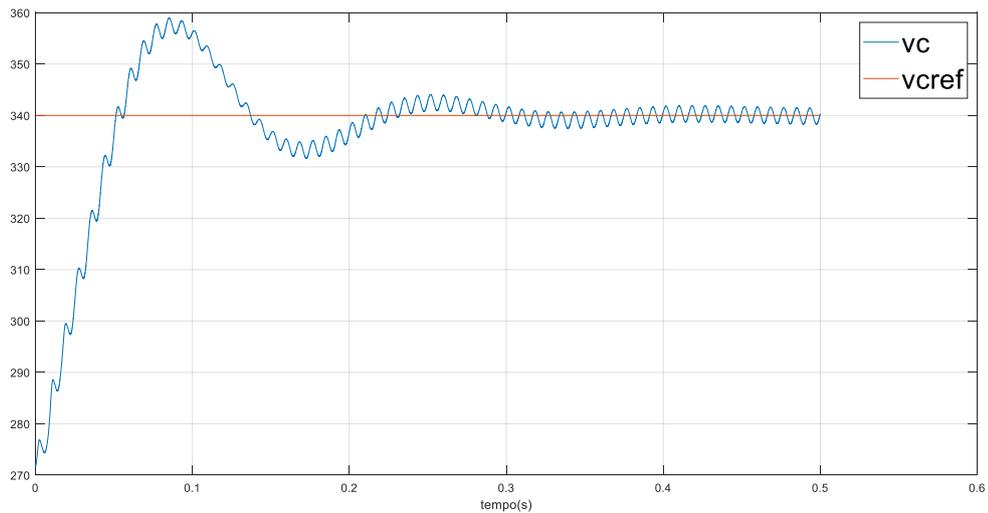
Figura 19 - Gráfico das potências em kW com fonte de corrente positiva.



Fonte: Autoria Própria.

A figura 20 ilustra a tensão instantânea do barramento seguindo a tensão de referência do sistema, a partir de oitenta por cento do valor nominal.

Figura 20 - Gráfico de tensão de referência e tensão atual do barramento CC.



Fonte: Autoria Própria.

Os resultados mostram que:

- Quando a energia gerada pelos painéis solares excede o consumo da carga, a corrente fornecida pela rede é ajustada para manter a estabilidade do sistema.
- O conversor é capaz de manejar o excedente de energia sem comprometer a qualidade da energia fornecida à rede.
- A tensão de saída e a corrente permanece estável, indicando a eficiência do controle implementado.

4.4 Análise de Resultado e Consideração Final

Os gráficos ilustrados nas figuras 3 a 20 permitem considerar que o conversor CA-CC-CA monofásico de três braços, utilizando controle preditivo e modulação por largura de pulso (PWM), é capaz de regular a tensão e a corrente de saída de forma eficiente em diferentes condições operacionais. A integração de uma fonte de corrente, seja para simular um painel fotovoltaico ou uma carga CC, pressupõe que o conversor pode operar de maneira estável e eficaz, atendendo a diferentes demandas de energia.

Os resultados obtidos das simulações indicam que as técnicas de controle implementadas são eficazes e que o conversor CA-CC-CA monofásico de três braços pode ser utilizado em diversas aplicações industriais e domésticas, proporcionando uma solução eficiente para a conversão e controle de energia elétrica.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a modelagem, simulação e controle de um conversor CA-CC-CA monofásico de três braços utilizando “software” de código aberto para computação numérica (Scilab). O objetivo principal foi verificar o funcionamento do conversor em diferentes condições operacionais e demonstrar sua eficiência e estabilidade ao controlar a energia fornecida à carga.

As simulações realizadas cobriram três cenários distintos: o conversor alimentado apenas pela rede elétrica; o painel fotovoltaico conectado ao sistema simulado pelo conversor integrado com uma fonte de corrente CC; e o conversor integrado com uma fonte de corrente CC simulando uma carga de corrente contínua. Os resultados das simulações indicaram que as técnicas de controle preditivo e modulação por largura de pulso (PWM) são eficazes para regular a tensão e a corrente de saída do conversor de maneira eficiente.

Nos três cenários, o conversor demonstrou capacidade de manter a estabilidade e a qualidade da energia fornecida à carga, ajustando-se adequadamente às variações de entrada e demanda. A integração de uma fonte de corrente, seja para simular um painel fotovoltaico ou uma carga CC, mostrou que o conversor pode operar de forma eficaz em diferentes condições de energia.

A análise dos dados coletados revelou que o controle preditivo desempenha um papel crucial na minimização do erro na corrente fundamental, enquanto a modulação PWM garante uma regulação precisa da tensão de saída, reduzindo distorções harmônicas.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a inclusão de baterias no sistema para armazenar energia e fornecer suporte durante períodos de baixa geração ou alta demanda. Além disso, explorar a aplicação de outras técnicas de controle, como controle adaptativo e controle robusto, pode proporcionar melhorias adicionais na performance do conversor.

Em resumo, o conversor CA-CC-CA monofásico de três braços, com o uso de técnicas avançadas de controle, provou ser uma solução eficiente e estável para diversas aplicações industriais e domésticas, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas de conversão de energia mais eficientes e confiáveis.

REFERÊNCIAS

JACOBINA, C. B.; OLIVEIRA, T. M.; SILVA, E. R. C. da. Control of the Single-Phase Three-Leg AC/AC Converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 2, pp. 467-476, April 2006.

KOURO, S.; LEON, J. I.; VINNIKOV, D.; FRANQUELO, L. G. Grid-Connected Photovoltaic Systems: An Overview of Recent Research and Emerging PV Converter Technology. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 9, no. 1, pp. 47-61, March 2015.

BLAABJERG, F., TEODORESCU, R., LISERRE, M., & TIMBUS, A. V. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(5), 1398-1409, 2006.

RODRIGUEZ, P., LUNA, A., CANDELA, I., MUÑOZ-AGUILAR, R. S., TEODORESCU, R., & BLAABJERG, F. Grid synchronization of power converters using multiple second-order generalized integrators. In: 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2010, Atlanta. Anais... Atlanta: IEEE, 2010. p. 2341-2348.

Muñoz, J., Baier, C., & Wheeler, P. "Control Techniques for a Single-Phase Matrix Converter." *Energies*, 13(23), 6337, 2020. DOI: 10.3390/en13236337.

Cardoso, J. T., & Jacobina, C. B. "Compensador universal com conversor de três braços (3L)." Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, 2023.