

MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM MICRORREDES APLICANDO ESTRATÉGIA DE CONTROLE BASEADA EM TERMOS RESSONANTES

Vinícius Dário Bacon¹,
Luan Silverio Parro¹
Matheus Labegalini Stencil¹
Guilherme Masquetti Pelz²
Sergio Augusto Oliveira da Silva¹

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná

²Instituto Federal do Paraná - IFPR

DOI: 10.47168/rbe.v28i4.763

RESUMO

Este trabalho propõe a aplicação de termos ressonantes para suprimir as ondulações nas tensões de uma microrrede CC (corrente contínua), as quais ocorrem com o dobro da frequência da rede elétrica em consequência da atuação de conversores de interligação CC/CA conectados à rede elétrica monofásica. A utilização de tais termos ressonantes na estratégia de controle da microrrede CC permite: o alcance de uma maior eficiência na extração da máxima potência em unidades geradoras; a diminuição do stress nas baterias, levando ao aumento da vida útil; a redução dos custos e dos impactos ambientais gerados pelo descarte destes equipamentos. Para validação do estudo, resultados de simulação computacional são apresentados considerando uma microrrede de 3 kW operando tanto conectada quanto desconectada da rede elétrica.

Palavras-chave: Geração Distribuída; Eficiência Energética; Microrredes Elétricas; Baterias; Células Combustíveis.

ABSTRACT

This work proposes the application of resonant terms to suppress the ripples in the DC microgrid voltages, which occur at twice the frequency of the power grid as a result of the operation of DC/AC interconnection converters connected to the single-phase utility grid. The use of such resonant terms in the DC microgrid control strategy allows: achieving greater efficiency in extracting maximum power from generating units; the reduction of stress on the batteries leading to an increase in their useful life; the reduction of costs and environmental impacts generated

by the disposal of this equipment. In order to validate the study, simulation results are presented considering a 3 kW microgrid operating both connected and disconnected from the electrical grid.

Keywords: Distributed generation; Energy Efficiency; Electric Microgrids; Batteries; Fuel Cells.

1. INTRODUÇÃO

Com o recente aumento da integração de sistemas de geração distribuída ao sistema elétrico brasileiro, sistemas de geração de energia elétrica baseados em fontes renováveis, como a fotovoltaica e a eólica, vêm ganhando espaço (MME/EPE, 2021). Para a continuidade do avanço da geração distribuída no Brasil e no mundo, o modelo de expansão utilizando microrredes elétricas está sendo investigado.

Dentre as principais vantagens da utilização de microrredes estão o aumento da qualidade e da confiabilidade da energia fornecida ao consumidor, já que uma microrrede é capaz de manter seus clientes em operação mesmo durante a ausência de fornecimento de energia por parte da concessionária (COPEL, 2020; MME/EPE, 2022; HIRSCH et al., 2018). Para que a microrrede possa operar desconectada da rede elétrica da concessionária, as fontes consideradas intermitentes, como o caso da eólica e da fotovoltaica, cuja potência gerada depende das condições ambientais, devem operar acompanhadas de algum tipo de geração não intermitente, de modo a garantir um fornecimento continuado (HIRSCH et al., 2018).

Em conformidade com as políticas nacionais e internacionais de diminuição da emissão de carbono (MMA, 2022), microrredes utilizando células combustíveis como fonte primária de energia, atuando em conjunto com outras fontes renováveis, tornam-se uma solução baseada em geração distribuída considerada promissora e amigável com o meio ambiente (HAN et al. 2018). Em conjunto com células combustíveis, baterias também têm sido aplicadas em microrredes para suprir aumentos de carga ou absorver excedentes de energia durante o modo desconectado, enquanto a célula combustível se acomoda em um novo ponto de operação (ÁLVAREZ, 2012; SHARMA; MISHRA, 2018). Ao longo da microrrede, conversores eletrônicos de potência são necessários para processar a energia gerada pelas diferentes fontes de energia, com o intuito de alimentar as cargas locais, armazenar energia e ainda injetar o excedente da geração na rede elétrica. Além disso, visando obter o máximo aproveitamento das fontes de energia, os conversores de potência são controlados de modo a extrair a máxima potência disponível dessas fontes (HIRSCH; PARAG; GUERREIRO, 2018). Considerando que tanto as células combustíveis quanto as baterias são baseadas em tensão CC, estes recursos podem ser co-

nectados a um barramento CC compartilhado por meio de conversores CC/CC individuais. Nesse caso, a conexão com a rede elétrica e com as cargas CA é realizada por meio de um conversor de interligação CC/CA conectado entre o barramento CC compartilhado e a rede elétrica. Para baixas potências, abaixo de 10kW, na busca de menores custos, podem ser aplicados conversores CC/CA monofásicos. Entretanto, uma característica inerente à operação destes conversores é a geração de uma oscilação de tensão, de frequência igual ao dobro da frequência da rede, sobreposta à tensão de seu barramento CC (DONG, D. et al., 2013). Tais ondulações podem ser propagadas pelos conversores CC/CC até as células combustível, o que leva a erros na extração da máxima potência, como também até as baterias, aumentando o stress e diminuindo a vida útil.

Neste trabalho é apresentada e analisada uma microrrede CC de 3 kW, conectada à rede monofásica, envolvendo um sistema de geração a células combustível, baterias e cargas locais. De modo a evitar a propagação das ondulações de tensão no dobro da frequência da rede elétrica até as baterias e as células combustível, é proposta uma estratégia de controle baseada na inclusão de termos ressonantes aos controladores dos conversores CC/CC. Além disso, o trabalho apresenta uma análise sobre os estados de operação conectado e ilhado da microrrede em estudo, de modo a explicar o surgimento de ondulações no barramento CC da microrrede. Para validação do estudo, são apresentados resultados de simulações por meio dos quais é possível notar a significativa diminuição das ondulações nas tensões dos recursos CC da microrrede quando utilizada a estratégia de controle proposta.

2. MICRORREDE CC EM ESTUDO

A microrrede em estudo é composta por dois barramentos, sendo um CA e o outro CC, conforme a Figura 1. No intuito de compreender a operação da microrrede deve-se considerar dois modos de operação para o sistema: conectado à rede elétrica e desconectado da rede elétrica, ou seja, ilhado.

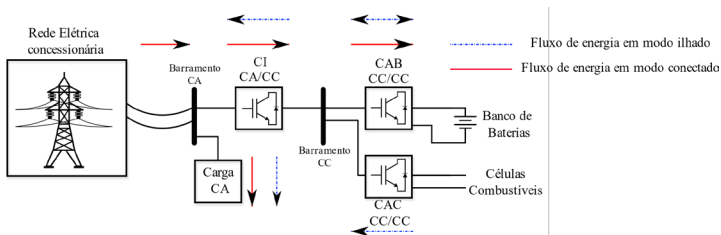
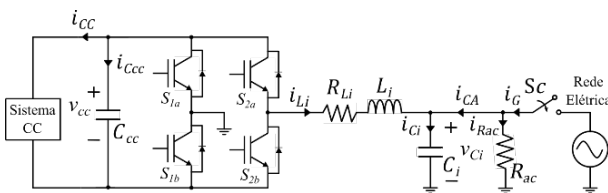


Figura 1 – Configuração da microrrede

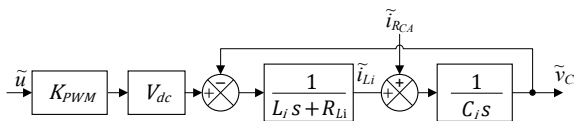
No modo conectado, a rede elétrica é responsável por alimentar a carga local e fornecer a energia para carregamento do banco de baterias. Nesse caso, o conversor CA/CC, nomeado como Conversor de Interligação (CI), drena energia ativa da rede elétrica, enquanto o conversor CC/CC conectado às baterias, nomeado como Conversor de Acoplamento das Baterias (CAB), controla o armazenamento dessa energia. Por sua vez, o conversor CC/CC conectado ao arranjo de células combustível, nomeado como Conversor de Acoplamento das Células Combustível (CAC), fica desativado, já que essa geração não necessita estar em funcionamento. Já na operação ilhada, considerando a ausência da rede elétrica, as células combustível passam a atuar como a fonte primária de energia para suprimento da carga. Nestas circunstâncias, o CAC atua na extração da energia gerada pelas células combustível, enquanto o CI promove a manutenção do fornecimento de energia para a carga CA. Considerando as variações de carga, as baterias se carregam caso a energia gerada seja maior que a energia consumida, ou então se descarregam caso a energia gerada seja menor que a energia consumida. Dessa forma, para permitir tanto o carregamento quanto o descarregamento das baterias, um fluxo bidirecional de energia flui por meio do CAB durante o modo ilhado.

2.1 Conversor de Interligação (CI)

A topologia CC/CA Ponte Completa monofásica, mostrada na Figura 2 (a), tem sido amplamente empregada como CI em aplicações envolvendo a conexão de sistemas CC com a rede elétrica CA (DONG, D. et al., 2013). Conforme o acionamento da chave de conexão (S_c), o CI pode operar tanto conectado quanto desconectado da rede elétrica.



(a)



(b)

Figura 2 – Conversor de Interligação (CI) CC/CA:
(a) Circuito; (b) Modelo Matemático

No modo conectado, o CI atua como uma fonte de corrente senoidal injetada/drenada por meio do indutor de filtragem, representado na Figura 2 pela indutância L_i e pela resistência série R_{L_i} , além de atuar como uma fonte de tensão CC conectada ao barramento CC compartilhado. Já no modo ilhado, com a ausência da rede elétrica, o CI atua como uma fonte de tensão senoidal para a carga CA, representada na Figura 2 por R_{CA} .

Durante os modos de operação citados para o CI, o fluxo de energia pode fluir bidirecionalmente através do conversor. Nesse contexto, por conta da conexão monofásica, a potência instantânea CA (p_{CA}) que flui pelo indutor L_i terá uma componente (\tilde{p}_{CA}) ondulatória no dobro da frequência fundamental, ou seja, 120 Hz, sobreposta a uma componente média (P_{CA}) que representa a parcela ativa da potência, sendo que $p_{CA} = \tilde{p}_{CA} + P_{CA}$. Quando o CI envia/absorve potência de/para o barramento CA, a potência ondulatória passa a fluir também pelo lado CC do conversor, o que resulta em ondulações na tensão no capacitor C_{cc} (v_{CC}) no dobro da frequência fundamental, ou seja, em 120 Hz. Conforme dado por (DONG, D. et al., 2013), é possível obter a equação 1, que representa a tensão v_{CC} em função do tempo e que expressa a amplitude de oscilação em 120 Hz (A).

$$v_{cc}(t) = \sqrt{V_{cc}^2 + A \text{sen}(2\omega_0 t - 2\varphi + \theta)}$$

$$A = \sqrt{P_{CA}^2 + \left(\frac{\omega_0 L_i I_{L_i}^2}{2} - P_{CA} \frac{\text{sen}(\varphi)}{\text{cos}(\varphi)}\right)^2} / \sqrt{\left(\frac{P_{CA}}{V_{cc}^2}\right)^2 + (\omega_0 C_{cc})^2}; \tag{1}$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{P_{av}}{\frac{\omega_0 L_i I_{L_i}^2}{2} - P_{av} \frac{\text{sen}(\varphi)}{\text{cos}(\varphi)}}\right) - \arctan(C_{cc} V_{cc}^2 / P_{CA}); P_{CA} = \frac{V_{C_i} I_{L_i}}{2} \text{cos}\varphi;$$

onde: V_{cc} é a tensão média no capacitor C_{cc} ; ω_0 é a frequência angular fundamental da rede elétrica, φ é a diferença angular entre a corrente na indutância L_i e a tensão no capacitor C_i ; V_{C_i} é a tensão de pico no capacitor C_i ; I_{L_i} é a amplitude de corrente na indutância L_i .

Como pode ser notado na equação 1, o aumento da capacitância C_{cc} leva à atenuação da amplitude de oscilação A, entretanto traz maiores volume e custo para o conversor. Nesse sentido, normalmente a capacitância C_{cc} é dimensionada de forma que atenua a oscilação em dupla frequência o suficiente para permitir a operação do conversor CC/CA. Nesse caso, uma oscilação de tensão residual permanece, de forma que o sistema CC conectado a C_{cc} pode ser prejudicado pela oscilação em dupla frequência.

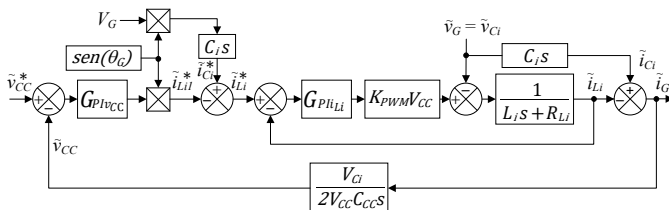
Para obtenção do modelo matemático para o lado CA do CI, considera-se o circuito dado na Figura 2(a) no modo ilhado, ou seja, S_c desligada, acionado com a técnica de modulação PWM senoidal de três níveis. Dessa forma, aplicando a técnica de modelagem por análise de pequenos sinais, e desprezando a conexão da carga local CA, é possível obter a representação matemática para o CI dado no diagrama de blocos equivalente mostrado na Figura 2(b), onde $K_{PWM}=1/V_{tri}$, sendo V_{tri} o pico da portadora triangular utilizada na modulação PWM.

Considerando agora o lado CC do CI, a equação que representa matematicamente o capacitor C_{CC} é dada pela equação 2, que descreve a relação entre a pequena variação na amplitude da parcela ativa da corrente drenada da rede elétrica (\tilde{I}_G) e a pequena variação na tensão no barramento CC (\tilde{v}_{CC}).

$$\frac{\tilde{v}_{CC}(s)}{\tilde{I}_G(s)} = \frac{V_{Ci}}{2V_{CC}C_{CC}s} \tag{2}$$

onde: V_{Ci} e V_{CC} são as tensões de pico nos capacitores C_i e C_{CC} , respectivamente.

Desprezando variações na corrente da carga CA, ou seja $\tilde{i}_{RCA}=0$, uma pequena variação na corrente do indutor L_i (\tilde{i}_{Li}) leva a uma pequena variação na corrente da rede (\tilde{i}_G), sendo $\tilde{i}_G = \tilde{i}_{Ci} - \tilde{i}_{Li}$ conforme os sentidos de corrente adotados na Figura 2(a), o que resulta em variação na tensão no barramento CC (\tilde{v}_{CC}). Dessa forma, durante o modo conectado, o CI controla a tensão no capacitor C_{CC} variando a corrente que flui pelo indutor L_i . Considerando a equação 2 em conjunto com o diagrama da Figura 2(b), é aplicada a estratégia de controle dupla malha com os controladores PI $G_{PIv_{CC}}$ e $G_{PIi_{Li}}$, a qual é representada na Figura 3(a).



(a)

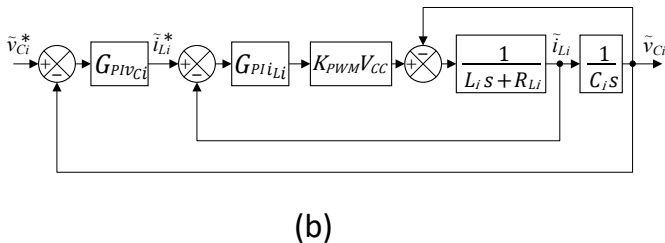


Figura 3 – Controle do Conversor de Interligação CC/CA:
a) Modo conectado; b) Modo ilhado

Considerando agora o modo de operação ilhado, o controlador $G_{P_{V_{C_i}}}$ atua na tensão do capacitor C_i (\tilde{v}_{C_i}) definindo a referência de corrente \tilde{i}_{L_i} , enquanto o controlador $G_{P_{I_{L_i}}}$ atua no controle da corrente no indutor L_i , como representado na Figura 3(b). Nessa estratégia a referência \tilde{v}_{C_i} é calculada como $V_{C_i} \text{sen}(\theta^*)$, sendo V_{C_i} e θ^* a tensão de pico e o ângulo de fase desejados.

2.2 Conversor CC/CC de acoplamento das Baterias (CAB)

A topologia utilizada para o CAB é mostrada na Figura 4(a), enquanto o modelo matemático de tal conversor, obtido a partir da técnica de modelagem por pequenos sinais e representação no domínio da frequência, é representado na Figura 4(b).

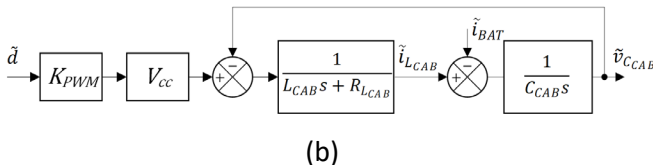
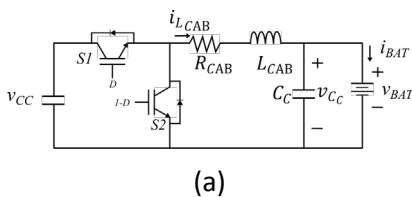


Figura 4 – Conversor de acoplamento das baterias:
a) Circuito; b) Modelo Matemático

Durante o modo conectado, o CAB controla a tensão nas baterias para promover o carregamento. Dessa forma, é possível aplicar a estratégia de controle dupla malha utilizando os controladores PI $G_{PI_{i_{CAB}}}$ e $G_{PI_{V_{CAB}}}$, dados na Figura 5, os quais atuam na corrente na indutância L_{CAB} ($i_{L_{CAB}}$) e na tensão no capacitor C_{CAB} , a mesma aplicada às baterias ($V_{C_{CAB}}=V_{Bat}$). No intuito de zerar o erro de regime estacionário em 120 Hz, de modo a mitigar as ondulações de tensão nas baterias, é aplicado um termo ressonante nessa frequência, sendo ele $G_{CR_{CAB}} = \frac{K_{RC}S}{s^2 + m\omega_2^2}$ para $\omega_2 = 2\pi 120$, em conjunto com o controlador $G_{PI_{V_{CAB}}}$, como apresentado na Figura 5 para S_R fechada. Por outro lado, durante o modo ilhado, o CAB deixa de controlar a tensão das baterias para controlar a tensão do barramento CC, de forma que não há mais a possibilidade de utilizar os termos ressonantes para mitigar as ondulações de tensão nas baterias.

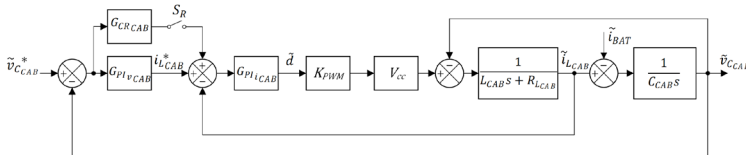
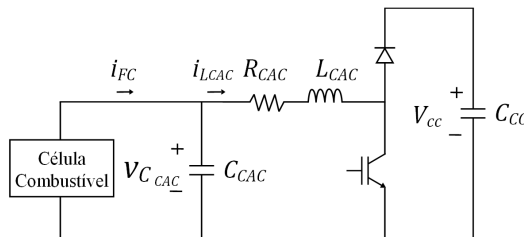


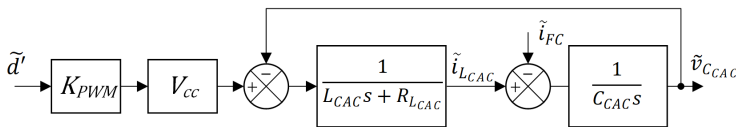
Figura 5 – Controle do conversor de acoplamento das baterias no modo conectado

2.3 Conversor de Acoplamento das Células Combustíveis (CAC)

A topologia utilizada para o CAC é mostrada na Figura 6(a), enquanto o modelo matemático de tal conversor, obtido a partir da técnica de modelagem por pequenos sinais no domínio da frequência, é representado na Figura 6(b), sendo d' o complemento da razão cíclica da chave utilizada no CAB.



(a)



(b)

Figura 6 – Conversor de acoplamento das Células Combustível:
(a) Circuito; (b) Modelo

Este conversor atua apenas no modo ilhado quando é necessário controlar a tensão nas células combustível $v_{C_{CAC}}$ para buscar a operação em máxima potência. Dessa forma, é possível aplicar a estratégia de controle dupla malha utilizando os controladores $PI_{G_{PI_{i_{CAC}}}}$ e $G_{PI_{v_{CAC}}}$ dados na Figura 7, os quais atuam na corrente na indutância ($i_{L_{CAC}}$) e na tensão no capacitor C_{CAC} , a mesma aplicada às células combustível ($v_{C_{CAC}} = v_{Bat}$). Além disso, para mitigar os distúrbios em 120 Hz, é aplicada a estratégia utilizando um termo ressonante, sendo eles $G_{CR_{CAC}} = \frac{K_{RCs}}{s^2 + m\omega_z^2}$ para $\omega_z = 2\pi 120$, em conjunto com o controlador ($G_{PI_{v_{CAC}}}$) como apresentada na Figura 7 para S_R fechada. É válido salientar que o cálculo do erro na malha externa ocorre com sinais trocados para compensar o efeito da entrada do modelo matemático \tilde{d}' .

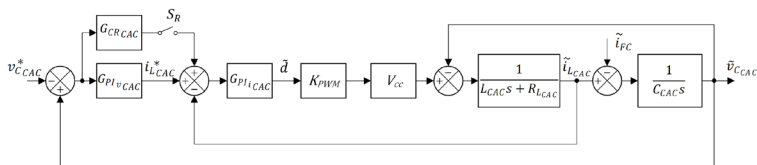


Figura 7 – Controle do conversor de acoplamento para a célula combustível no modo ilhado

3. RESULTADOS

Na Tabela 1 são apresentados os parâmetros elétricos e de controle utilizados para obtenção dos resultados de simulação, apresentados na Figura 8, os quais foram obtidos por meio do ambiente MATLAB/Simulink. O sistema mostrado na Figura 1 é analisado em modo conectado (Testes 1a e 1b) para um carregamento das baterias a 3000 W pela rede elétrica e em modo ilhado (Testes 2a e 2b), considerando uma célula combustível operando a 2500 W em conjunto

com o banco de baterias fornecendo mais 500 W para suprir a carga CA de 3000 W. Nos testes 1a e 2a, aplicou-se apenas controladores PI, enquanto nos testes 1b e 2b os termos ressonantes foram adicionados fechando as chaves S_R nas malhas de controle das Figuras 5 e 7. Verifica-se na Figura 8 (a) e (b) que o CI foi capaz de drenar energia da rede elétrica no modo conectado, bem como foi capaz de fornecer energia para a carga no modo ilhado. Na Figura 8 (c) nota-se a oscilação de tensão em 120 Hz no barramento CC (V_{CC}) em torno de 50 V pico a pico durante todos os testes realizados. A melhoria de desempenho resultante dos termos ressonantes é notada nas Figuras 8(d) e 8(e) para o modo conectado e ilhado, respectivamente. Como pode ser notado nas figuras, oscilações de 120 Hz na tensão e na corrente das baterias (V_{Bat} e i_{Bat}), bem como na tensão e na corrente das células combustível (V_{FC} e i_{FC}) são notadas apenas nos testes 1a e 2a. Dessa forma, comprava-se que as oscilações de 120 Hz são consideravelmente mitigadas quando os termos ressonantes são utilizados (testes 1b e 2b).

Tabela 1 – Parâmetros da Microrrede Parâmetros Gerais

Potência nominal = 3000 W		Frequência de chaveamento =20 kHz
Frequência de amostragem = 60 kHz		$K_{P_{PWM}}=1/5000$
Rede Elétrica da Concessionária		
Tensão de fornecimento =220 V		Frequência de fornecimento =60 Hz
Barramento CC		
Tensão =400 V		Capacitor =470 μ F
Conversor CC/CA de Interligação		
$R_L = 0,18 \Omega$	$L_i = 2 \text{ mH}$	$C_i = 88 \mu\text{F}$
PI de corrente (G_{PI_i})	Ganho proporcional = 210,10	Ganho integral = $7,08 \cdot 10^5$
PI de tensão (G_{PI_v})	Ganho proporcional = 0,30	Ganho integral = 387,99
Conversor CC/CC de Acoplamento das Baterias		
Tensão nominal do banco =249,9 V		Capacidade do banco = 11 Ah
$R_{L_{CAB}} = 0,18 \Omega$	$L_{CAB} = 1 \text{ mH}$	$C_{CAB} = 270 \mu\text{F}$
PI de corrente ($G_{PI_{CAB}}$)	Ganho proporcional =73,03	Ganho integral = $1,82 \cdot 10^5$
PI de tensão ($G_{PI_{V_{CAB}}}$)	Ganho proporcional =1,16	Ganho integral = $1,06 \cdot 10^3$
Conversor CC/CC de Acoplamento das Células Combustíveis		
Potência nominal do arranjo =3000 W		Tensão nominal do arranjo =106 V
$R_{L_{CAC}} = 0,18 \Omega$	$L_{CAC} = 1 \text{ mH}$	$C_{CAC} = 270 \mu\text{F}$
PI de corrente ($G_{PI_{CAC}}$)	Ganho proporcional =73,03	Ganho integral = $1,82 \cdot 10^5$
PI de tensão ($G_{PI_{V_{CAC}}}$)	Ganho proporcional =1,16	Ganho integral = $1,06 \cdot 10^3$
Controle Ressonante		
$n=2$ (120Hz)	Ganho ressonante	$K_{CR2} = 5,58$

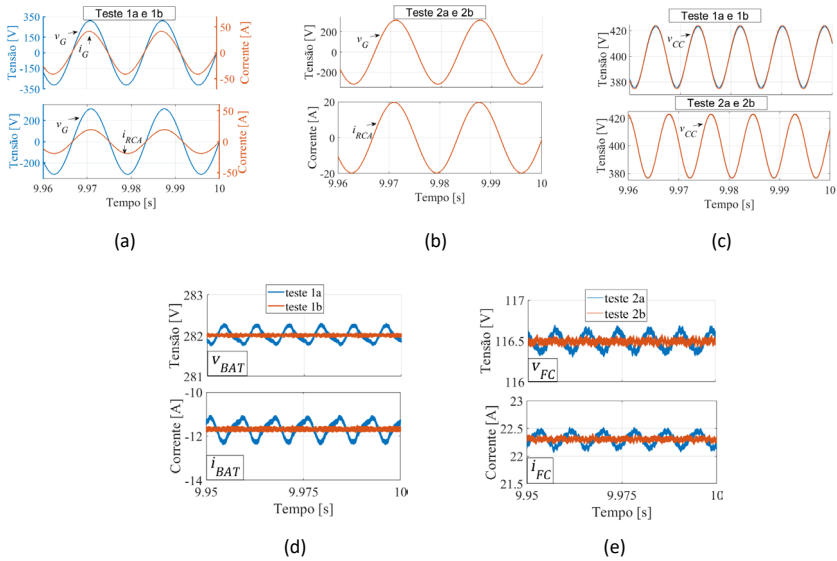


Figura 8 – Resultados de Simulação a) tensões e correntes na rede e na carga no modo conectado (teste 1a e 1b); b) tensão e corrente na carga no modo ilhado (testes 2a e 2b); c) tensão no barramento CC (testes 1a, 1b, 2a e 2b); d) tensão e corrente nas baterias (teste 1a e 1b); e) tensão e corrente na célula combustível (teste 2a e 2b)

4. CONCLUSÕES

O presente artigo apresentou a análise de uma microrrede CC e avaliou as melhorias provenientes da utilização de termos ressonantes utilizados em conjunto com controladores PI utilizados na operação de conversores CC/CC para acoplamento de baterias e células combustível. Por meio dos resultados computacionais, verificou-se que a utilização da estratégia de controle ressonante traz a mitigação da propagação das oscilações em 120 Hz para recursos da microrrede como sistemas de geração e armazenamento. Logo, a utilização de termos ressonantes é capaz de promover maior eficiência nas gerações e aumentar a vida útil dos recursos conectados à microrredes CC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁLVAREZ, V.; GARCÍA, A. F.; RAMOS-PAJA, C. A.; SAAVEDRA-MONTES, A. J.; ARANGO, E. I. Design of a Low Power System Based on Fuel Cells (Diseño de un Sistema de Baja Potencia Basado en Celdas de Combustible). *Revista EIA*, v. 9, n. 17, p. 85–103, 2013. Disponível em: <https://revistas.eia.edu.co/index.php/reveia/article/view/453> Acesso em: 25 mai. 2022.

BACON, V. D. et al. Stability analysis and performance evaluation of a single-phase phase-locked loop algorithm using a non-autonomous adaptive filter. *“IET Power Electronics”*, v. 7, n. 8, p. 2081–2092, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2013.0728>

COPEL, Companhia Paranaense de Energia. “Chamada Pública Copel DIS GD 001/2020 - Compra De Energia Elétrica De Geração Distribuída”. Curitiba: COPEL, 2020.

DONG, D. et al. Grid-Interface Bidirectional Converter for Residential DC Distribution Systems - Part One: High-Density Two-Stage Topology. *“IEEE Transactions on Power Electronics”*, v. 28, n. 4, p. 1655–1666, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2212462>

HAN, B.; BAI, C.; LEE, J. S.; Kim, M. Repetitive Controller of Capacitor-Less Current-Fed Dual-Half-Bridge Converter for Grid-Connected Fuel Cell System. *“IEEE Transactions on Industrial Electronics”*, v. 65, n. 10, p. 7841–7855, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2804898>

HIRSCH, A.; PARAG, Y.; GUERRERO, J. Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. *“Renewable and Sustainable Energy Reviews”*, v. 90, p. 402–411, 2018. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.040>

MMA, Ministério do Meio Ambiente. “Diretrizes para uma Estratégia Nacional para Neutralidade Climática”. Brasília: MMA, 2022.

MME/EPE, Ministério de Minas e Energia do Brasil. Empresa de Pesquisa Energética: “Plano Decenal de Expansão de Energia 2031”. Rio de Janeiro: EPE, 2022.

MME/EPE, Ministério de Minas e Energia do Brasil, Empresa de Pesquisa Energética: “Balanço Energético Nacional”. Rio de Janeiro: EPE, 2021.

SHARMA, R K; MISHRA, S. Dynamic Power Management and Control of a PV PEM Fuel-Cell-Based Standalone ac/dc Microgrid Using Hybrid Energy Storage. "IEEE Transactions on Industry Applications", v. 54, n. 1, p. 526–538, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2756032>

UNFCC, United Nation Framework Convention Climate Changes. "Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement". Paris, França: UNFCC, 2021.