

Qualidade da energia elétrica em microrredes com multifontes de energia

Poliana Caldeira dos Santos
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
poliana.caldeira@ufu.br

Gustavo Brito de Lima
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
gustavo.brito.28@ufu.br

Thales Lima Oliveira
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
thales@ufu.br

Sílvia Sousa Resende
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
silviasresende@ufu.br

Jacinto Costa Damião
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
jacinto.damiao@ufu.br

Samuel Souto de Oliveira
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
samuel.souto@ufu.br

Resumo—A implementação de microrredes com multifontes de energia surge como uma solução promissora para atender a demanda energética de consumidores remotos, oferecendo vantagens significativas em termos de eficiência energética, redução de impactos ambientais e promoção do desenvolvimento sustentável. Contudo, esses sistemas apresentam desafios relacionados à qualidade da energia elétrica, especialmente devido à presença de componentes de eletrônica de potência, que podem causar distorções harmônicas e variações de frequência. Este artigo apresenta dois estudos de caso. O primeiro aborda uma microrrede implementada pela Copel e pela UFPR em Curitiba, demonstrando melhorias na confiabilidade do fornecimento de energia, redução de distorções harmônicas e estabilização da tensão. O segundo estudo investiga e compara diferentes topologias de filtros passivos (L, LC e LCL) para mitigar as distorções harmônicas introduzidas por inversores fotovoltaicos conectados à rede, evidenciando a eficácia do filtro LCL na melhoria da qualidade da energia. Os resultados destacam o potencial das microrredes e das soluções de filtragem na integração eficiente de fontes renováveis ao sistema elétrico.

Palavras-chave—microrredes, multifontes, qualidade de energia, geração distribuída

I. INTRODUÇÃO

A preocupação com o desenvolvimento sustentável e o efeito estufa tem modificado o processo de produção de energia elétrica. O crescimento da demanda por soluções energéticas sustentáveis tem acelerado a transição do modelo centralizado de geração de energia elétrica para alternativas mais descentralizadas e flexíveis. Nesse cenário, a Geração Distribuída (GD) ganha destaque por sua característica de proximidade ao ponto de consumo, eliminando a dependência de extensas redes de transmissão e incentivando o uso de fontes renováveis como, por exemplo, a energia solar. Essa estratégia não apenas melhora a eficiência energética, mas também minimiza os impactos ambientais, promovendo maior autonomia e sustentabilidade nas redes de energia [1].

O conceito de microrrede surgiu como uma solução eficiente para atender ao novo paradigma descentralizado dos sistemas de energia elétrica, permitindo o gerenciamento local de geração e demanda em seções específicas da rede. Globalmente, as microrredes têm sido implementadas para

aumentar a confiabilidade e a resiliência do sistema elétrico, facilitar a integração de fontes renováveis, postergar investimentos na expansão da infraestrutura de rede e atender às diversas demandas de comunidades, sejam elas localizadas em grandes áreas urbanas ou em regiões rurais e remotas.

Com uma estrutura altamente flexível, as microrredes possibilitam a incorporação de diferentes tecnologias, suportam uma ampla variedade de arquiteturas e podem ser adaptadas para uma vasta gama de aplicações. [2]

Dentro dessa perspectiva, as microrredes emergem como uma evolução da GD, sendo compostas por uma ou mais fontes de geração que podem operar de forma autônoma ou conectadas ao sistema elétrico principal. Sua flexibilidade e autonomia fazem das microrredes uma peça-chave na modernização do sistema elétrico, especialmente com a incorporação de tecnologias inteligentes [2].

Na Geração Distribuída (GD), a produção de energia elétrica ocorre junto ao consumidor final, o que implica em alguns benefícios como, por exemplo: redução e/ou postergação dos investimentos em expansão dos sistemas de transmissão e distribuição; redução do carregamento de transformadores e da própria rede; redução das perdas por efeito Joule; aumento da confiabilidade do sistema; redução dos impactos ambientais, dentre outros.

Entretanto, a implementação de microrredes também apresenta desafios relacionados à qualidade da energia elétrica. Fatores como o aumento das componentes harmônicas (devido à grande quantidade de dispositivos de eletrônica de potência no sistema), variações na frequência (quando há excedente de geração em relação à quantidade de cargas do sistema) e aumento do desequilíbrio de tensão entre as fases podem surgir devido ao uso intensivo de dispositivos eletrônicos de potência e às características dinâmicas dessas redes [1].

Com a abrangência do uso da GD em microrredes, tanto em aplicações de sistemas conectados à rede elétrica convencional quanto em sistemas isolados, tem crescido o interesse de estudos na área de qualidade de energia elétrica, objetivando a investigação dos impactos causados por esse tipo de geração na rede de distribuição e a identificação de

eventuais distúrbios no sistema de suprimento ao consumidor final [3].

Este artigo aborda a operação de microrredes com múltiplas fontes de energia, explorando seus benefícios e os impactos na qualidade da energia elétrica. Com base em estudos recentes e regulamentações vigentes, serão discutidos métodos para minimizar os efeitos negativos e maximizar o potencial das microrredes como elementos transformadores do sistema elétrico de potência, promovendo eficiência, confiabilidade e sustentabilidade.

II. MICRORREDES MULTIFONTES E A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

A Geração Distribuída (GD) caracteriza-se pela produção de energia próxima ao ponto de consumo, eliminando a necessidade de longas redes de transmissão e promovendo maior independência das redes devido ao uso intensivo de fontes renováveis.

As microrredes, por sua vez, são sistemas baseados na GD que possuem a capacidade de operar de forma isolada do sistema elétrico principal. Elas integram uma ou mais unidades geradoras distribuídas, frequentemente provenientes de diferentes fontes de energia. Podem ser consideradas sistemas elétricos completos, pois englobam em uma única entidade a geração, o fornecimento e o consumo de energia elétrica. Além disso, são controláveis, com todos os seus elementos sob gestão própria, o que contribui para sua alta autonomia e confiabilidade. Essas características tornam as microrredes uma solução eficiente para a modernização do sistema elétrico, permitindo a introdução gradual de inteligência na rede [4].

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) regulamenta os procedimentos relacionados à qualidade da energia elétrica por meio do Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Essa regulamentação abrange a qualidade do produto, o serviço prestado e o tratamento de reclamações, estabelecendo indicadores, limites ou valores de referência e metodologias de medição. Para consumidores atendidos por microrredes isoladas, é essencial considerar as normas nacionais aplicáveis aos sistemas de distribuição, garantindo um atendimento equitativo para todos os tipos de usuários.

No contexto da aplicação de microrredes, a interconexão desempenha um papel fundamental na modernização do gerenciamento da geração e demanda, alinhando-se ao conceito de smart grid. As microrredes interconectadas se destacam pela capacidade de estabilizar a tensão em regime permanente, melhorar a qualidade da energia elétrica e operar de forma autônoma no direcionamento do fluxo de potência, ajustando-se às necessidades de demanda, entre outros benefícios [8].

As redes de distribuição convencionais passaram de uma configuração passiva para uma estrutura ativa em consequência do aumento significativo da geração distribuída (GD). Com um controle adequado, é possível integrar os processos de geração, distribuição e consumo de energia, formando microrredes de energia elétrica. Essas microrredes são constituídas por sistemas que combinam fontes de energia renováveis e não renováveis, sistemas de armazenamento, além de cargas fixas e variáveis, podendo operar tanto

conectadas à rede elétrica da concessionária quanto de maneira isolada [3].

Uma microrrede conectada à rede elétrica principal por meio de um ponto comum de conexão é percebida pela rede como uma única carga ou gerador. Uma de suas principais características é a capacidade de se isolar automaticamente durante uma perturbação na rede da concessionária, sem causar interrupções significativas às cargas atendidas. Além disso, ela deve ser capaz de reconectar-se à rede principal de forma automática e sincronizada, quando esta retornar à operação normal, evitando distúrbios tanto nas cargas locais quanto na rede da concessionária [9].

Outro benefício das microrredes é a possibilidade de se desconectarem da rede principal para redução de custos, especialmente durante horários de ponta, quando as tarifas de energia são mais altas para algumas classes consumidoras [10]. Na maioria dos casos, as microrredes integram sistemas de Geração Distribuída (GD), que se conectam por interfaces baseadas em eletrônica de potência. Para garantir uma operação eficiente e estável, elas utilizam equipamentos e técnicas de controle que possibilitam ajustes em suas configurações internas e externas, como modulação da energia adquirida da concessionária, controle de tensão e gestão das potências ativa e reativa. Esses modos de operação são viabilizados por sistemas de gerenciamento e dispositivos eletrônicos, como conversores acoplados às fontes de geração [3].

O objetivo das microrredes é atender à demanda energética das cargas locais, utilizando fontes de energia renováveis como, por exemplo, sistemas fotovoltaicos (SFV), em conjunto com sistemas de armazenamento, que auxiliam no balanceamento de energia para otimizar os ganhos econômicos, além de melhorar a qualidade e a estabilidade da energia fornecida. Embora a instalação de sistemas fotovoltaicos traga benefícios como baixo impacto ambiental, menor tempo de implementação, aumento da confiabilidade no fornecimento e redução de custos de energia elétrica, desafios relacionados à qualidade da energia suprida ainda preocupam. Isso ocorre principalmente em casos de alta penetração de sistemas fotovoltaicos, devido à intermitência na produção, ocasionada pela variação da irradiação solar, que pode levar a flutuações de potência e tensão (flicker) [3].

Adicionalmente, os inversores c.c.-c.a., que realizam a interconexão com a rede elétrica, podem eventualmente excitar ressonâncias harmônicas devido à interação com a impedância do sistema elétrico. Com o crescimento expressivo da GD e a ampliação do uso de sistemas híbridos (que combinam diferentes fontes de energia renováveis e não renováveis), seja em operação conectada à rede ou isolada, torna-se fundamental realizar estudos para avaliar os impactos na qualidade da energia elétrica. Esses estudos devem assegurar o suprimento adequado de eletricidade às cargas e minimizar distúrbios que possam comprometer os padrões de qualidade exigidos [3].

III. ESTUDOS DE CASO

A. Estudo de caso I: microrredes como ferramenta na melhoria da qualidade da energia elétrica.

Amplamente adotadas ao redor do mundo, as microrredes têm se destacado por sua capacidade de aumentar a confiabilidade e a resiliência das redes elétricas, facilitar a integração de fontes renováveis, postergar investimentos em

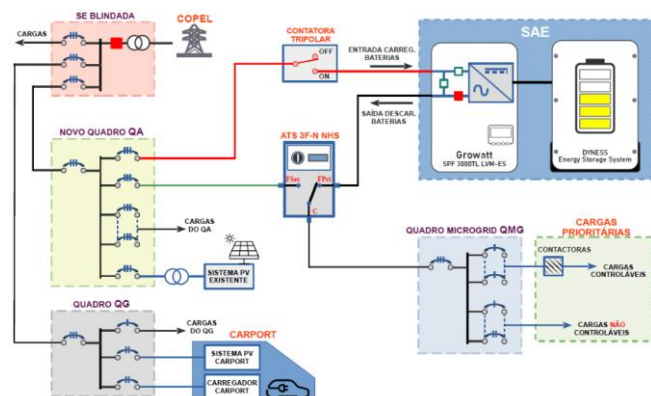
infraestrutura e atender às necessidades diversificadas de comunidades em áreas urbanas, rurais e remotas. Nesse contexto, a Copel tem desenvolvido uma série de iniciativas voltadas à exploração e integração de microrredes em sua rede elétrica, buscando maximizar os benefícios tanto para o sistema quanto para os consumidores [2].

Uma iniciativa da Copel em parceria com a Universidade Federal do Paraná (UFPR), foi o desenvolvimento do Projeto de P&D ANEEL PD-02866-0511/2019, intitulado “Programação diária de microrredes e redes ativas de distribuição considerando o gerenciamento pelo lado da demanda”. Esse projeto teve como foco principal o desenvolvimento de aplicações computacionais voltadas ao gerenciamento ativo de uma microrrede, utilizando como base o histórico de carga, dados meteorológicos e o monitoramento em tempo real dos recursos energéticos e das cargas. Além disso, o projeto também avaliou os impactos dessa operação na qualidade da energia elétrica da microrrede. [2]

O projeto piloto foi implementado nas dependências do Instituto Municipal de Administração Pública (IMAP) da Prefeitura de Curitiba, localizado no Parque Barigui, em Curitiba (PR) e está ilustrado na figura 1. Nele foram instalados diversos recursos energéticos, incluindo sistemas de geração fotovoltaica, sistemas de armazenamento em baterias (SAE) e uma plataforma computacional para o monitoramento e controle dos circuitos elétricos do edifício do IMAP. [2]

Adicionalmente, o projeto incluiu a instalação de um carport com carregador para veículos elétricos e uma estação meteorológica no local. Com o auxílio de um sistema de gerenciamento operacional, a microrrede é capaz de operar de forma “ilhada” em situações de interrupção no fornecimento de energia pela rede da Copel, permitindo que o SAE assuma o abastecimento elétrico do edifício. O sistema de gerenciamento também possibilita a conexão e desconexão seletiva de cargas, conforme o estado de carga das baterias, otimizando a utilização dos recursos disponíveis. [2]

Fig. 1. Diagrama unifilar da microrrede do edifício do IMAP do Parque Barigui [2]



Durante os testes de comissionamento do sistema elétrico do edifício do IMAP, além do aumento da confiabilidade com a redução das interrupções de energia, foram identificados benefícios significativos relacionados à qualidade da energia elétrica. Entre os principais, destacam-se a estabilização da tensão em regime permanente e a redução da volatilidade de distúrbios, como distorção harmônica de tensão, flutuação de tensão e desequilíbrio de tensão.

Conforme ilustrado na figura 2, que apresenta o comportamento das tensões no quadro QMG da microrrede ao longo de 24 horas, a perda temporária do fornecimento da rede elétrica da Copel resultou no acionamento do modo ilhado da microrrede por aproximadamente duas horas. Nesse intervalo, o sistema de armazenamento em baterias (SAE) assumiu o fornecimento de energia local, mantendo a tensão fase-neutro fixa em 120 V, conforme o valor pré-programado nos inversores do SAE. Essa configuração pode ser ajustada para estabilizar a tensão em 127 V, caso necessário [2].

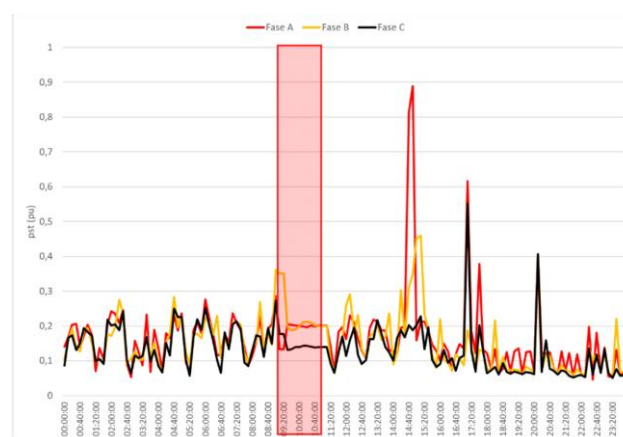
Outro ponto relevante foi a estabilização da distorção harmônica de tensão, que se manteve em torno de 2,5% durante o período de operação em modo ilhado. Comportamentos similares foram observados para o fator de desequilíbrio e a flutuação de tensão (PST), indicando uma melhoria geral nos indicadores de qualidade de energia elétrica.

Esses resultados demonstram que as microrredes não apenas contribuem para o aumento da confiabilidade e eficiência energética, mas também desempenham um papel crucial na manutenção dos indicadores de qualidade de energia elétrica dentro dos limites estabelecidos por normas regulatórias, como o Módulo 8 do Prodist.

Fig. 2. Tensão em regime permanente no QMG [2]



Fig. 3. Fator de desequilíbrio e a flutuação de tensão (PST) [2]



Em muitos aspectos as microrredes podem ser vistas como ferramenta na melhoria da qualidade da energia elétrica como é o caso do estudo anterior. Porém, acontece que os componentes de eletrônica de potência presentes nos inversores dos sistemas fotovoltaicos, por exemplo, injetam

componentes harmônicas na rede que afetam a qualidade da energia elétrica entregue por ela.

A qualidade da energia elétrica pode ser comprometida quando as formas de onda das correntes e tensões apresentam distorções em relação à onda senoidal da frequência fundamental.

Essas distorções são causadas por um inversor de baixa qualidade, introduzindo altos níveis de harmônicos, aumentando o DHT (Distorção Harmônica Total) e, consequentemente, afetando o desempenho e a confiabilidade do sistema [7].

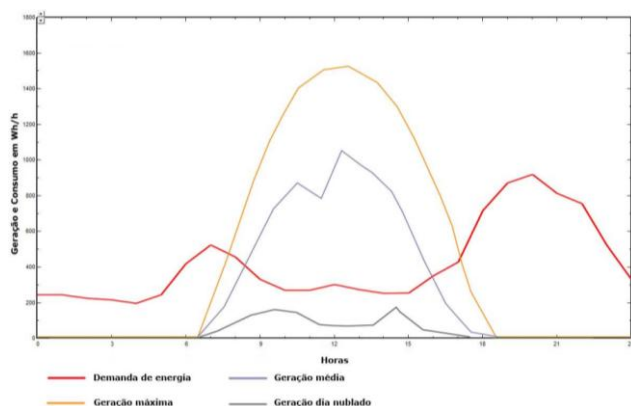
As distorções harmônicas geradas pelos inversores ocorrem tanto pelo processo de chaveamento eletrônico do sistema full-bridge quanto na baixa produção de energia do sistema, geralmente abaixo de 25% da potência máxima.

De acordo com o Módulo 8 do PRODIST, o valor mais restrito de referência para a distorção harmônica total de tensão (DTT) é de 3% para harmônicas de ordens baixas como a terceira ordem, por exemplo. [11]

A curva de potência diária de um sistema de Geração Distribuída Fotovoltaica (GDFV) representa a variação da geração de energia ao longo do dia. Esta curva é influenciada pela radiação solar, sombreamento, dias nublados, chuva, sujidade dos módulos, presença ou ausência de tracker (estrutura metálica que por automação que orienta os módulos fotovoltaicos para o sol). A curva é também diferente entre as estações, devido ao equinócio e solstício e à temperatura ambiente [7].

A curva típica de geração de um sistema fotovoltaico ao longo de um dia ensolarado pode ser descrita da seguinte forma: no início do dia, por volta das 6 horas da manhã, o sistema fotovoltaico começa a gerar energia e começa a aumentar gradualmente à medida que o sol se posiciona mais perpendicular ao sistema, atingindo seu pico entre 11h e 14h quando a irradiância solar é teoricamente a máxima. A geração de energia decai gradualmente à medida que o sol vai se afastando novamente e diminui sendo conduzido à zero quando o sol se põe. A curva resultante geralmente tem um formato aproximado de um sino ou parábola, como apresentado na figura 4 [12].

Fig. 4. Sobreposição da curva de geração fotovoltaica em São Carlos (SP) com a curva de demanda da região sudeste [12]

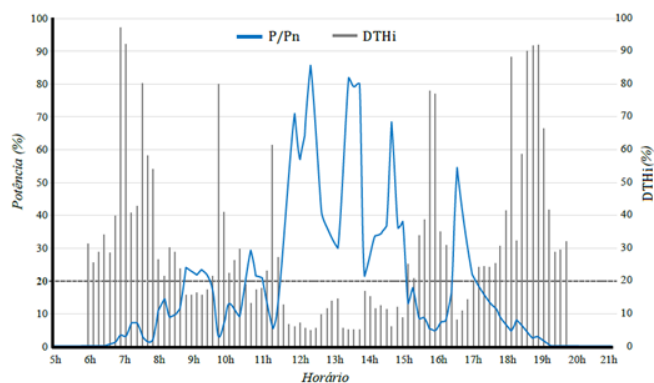


A DHT é medido usando analisadores de qualidade de energia e sua mitigação pode ser realizada através do uso de filtros harmônicos (passivos ou ativos), inversores de alta

qualidade com controle harmônico embutido e um projeto adequado do sistema elétrico.

A figura 5 ilustra a curva diária de potência de um sistema GDFV com a presença de sombreamentos, destacando os níveis de DHTi em momentos de baixa potência [13].

Fig. 5. Curva de potência de um sistema de GDFV e DHTi para um dia de inverno [13]



Para mitigar os problemas gerados tanto pelos inversores quanto pela baixa energia produzidas ao longo do dia, deverão ser utilizados filtros passivos entre o inversor solar e a rede.

Existem diversos tipos de filtros utilizados para controle de harmônicas e qualidade de energia, sendo os mais importantes em sistemas de conversão de energia os filtros L, LC e LCL. Esses filtros são amplamente aplicados em sistemas de potência, como inversores fotovoltaicos conectados à rede, para reduzir distorções harmônicas e melhorar o desempenho do sistema [5].

Esses filtros são essenciais para garantir que os conversores de energia conectados à rede elétrica operem de forma eficiente e em conformidade com os padrões de qualidade de energia elétrica exigidos pelas normas regulatórias [6].

B. Estudo de caso II: comparação dos filtros L, LC e LCL para mitigação de distorções harmônicas produzidas por inversores de geração distribuída fotovoltaica

Os filtros L, LC e LCL são amplamente aplicados em sistemas de potência como, por exemplo, inversores fotovoltaicos conectados à rede, para reduzir distorções harmônicas e melhorar o desempenho do sistema [5].

Esses filtros desempenham um papel crucial para assegurar que os conversores de energia conectados à rede elétrica operem de maneira eficiente e em conformidade com os padrões de qualidade de energia estabelecidos pelas normas regulatórias [6].

Para comparar a aplicação desses filtros, foi simulada uma microgeração fotovoltaica com um inversor conectado à rede e adicionado um filtro passivo na saída deste inversor. O inversor considerado não possui filtro, sendo analisadas apenas os resultados da aplicação dos filtros L, LC e LCL. Nesta simulação foi considerado um sistema de 5,12kWp conectado em uma rede de baixa tensão. O barramento da concessionária foi modelado como infinito, e os parâmetros do filtro foram ajustados para otimizar a atenuação das harmônicas no sistema. Os filtros foram adicionadas por etapas e analisadas os parâmetros de qualidade de energia

São apresentados nas equações 1, 2 e 3 os cálculos das componentes dos filtros, onde V_{rms} é a tensão de saída do inversor, f_{sw} é a frequência de chaveamento, I_{ripple} é a corrente admissível, P é a potência nominal do inversor. O valor de r foi considerado 20%.

$$L_1 = \frac{V_{rms}}{2\sqrt{6}f_{sw}I_{ripple}} \quad (1)$$

$$C \leq \frac{0,05P}{120\pi f_{rede} v_0^2} \quad (2)$$

$$L_2 = rL_1 \quad (3)$$

Capacidade de potência de pico	5,12KWp
Tensão no ponto de máxima potência	292,4V
Corrente no ponto de máxima potência	8,69A

Na figura 6 é apresentado o circuito de potência de um inversor ponte completa monofásico conectado à rede elétrica por meio de um filtro L.

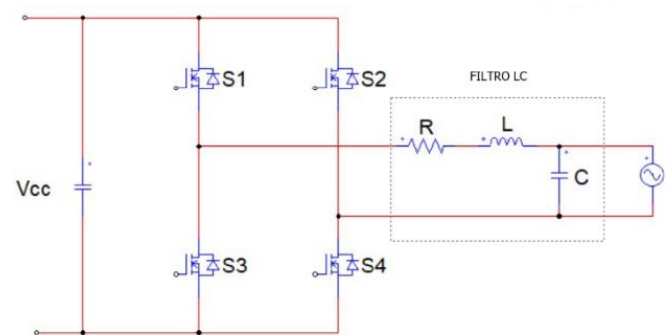
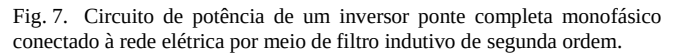
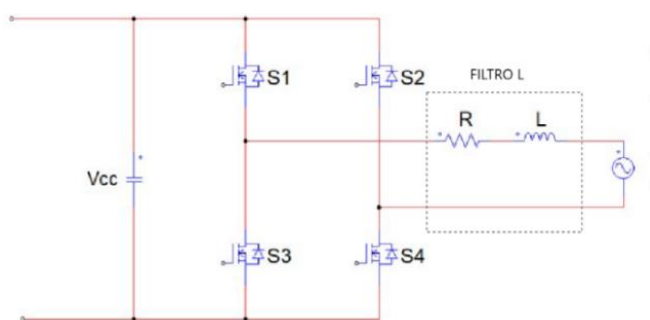


Fig. 8. Circuito de potência de um inversor ponte completa monofásico conectado à rede elétrica por meio de filtro indutivo de terceira ordem

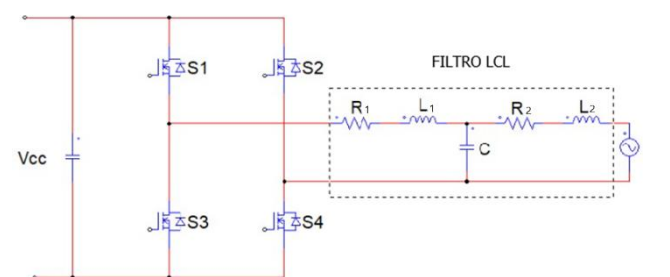
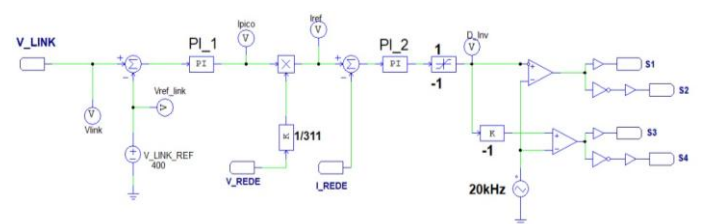


Fig. 9. Modelo de Controle para o conversor CC-CA full-bridge ongrid



Na tabela II são apresentados os indicadores de qualidade com a aplicação dos três tipos de filtros (L, LC e LCL) mostrando seus desempenhos em termos de Distorção Harmônica de Tensão (DTT), Fator de Potência (FP) e as ordens harmônicas presentes na corrente após a filtragem. Os dados foram obtidos a partir da simulação no software de simulação PSIM.

TABELA II. INDICADORES DE QUALIDADE DE ENERGIA INJETADA NA REDE COM FILTRO L, LC E LCL

Filtro	DTT	FP
L	0,0196%	0,9988
LC	0,0155%	0,9998
LCL	0,0146%	0,9999

A partir da transformada de Fourier (FFT) foram extraídas as amplitudes das frequências harmônicas depois da aplicação de cada filtro. Nas figuras 10, 11 e 12 são apresentados os resultados da transformada de Fourier com o filtro L, LC e LCL, respectivamente.

Fig. 10. FFT com filtro L

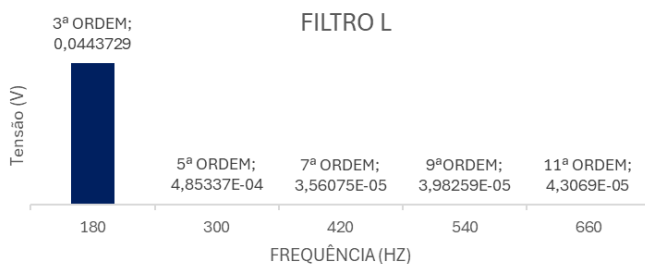


Fig. 11. FFT com filtro LC

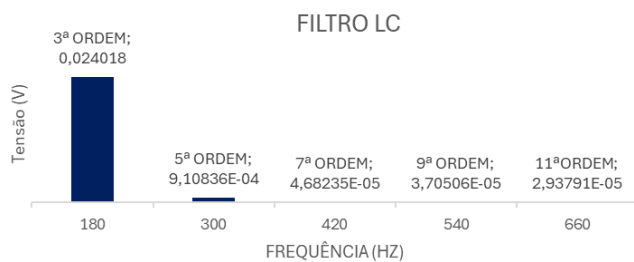
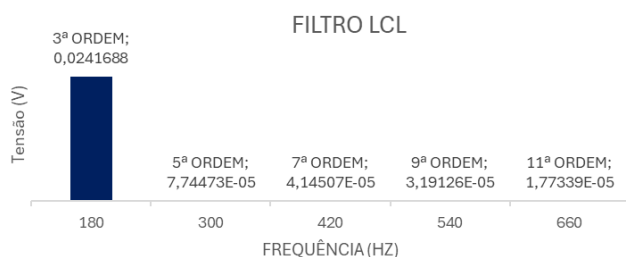


Fig. 12. FFT com filtro LCL



IV. CONCLUSÃO

A crescente adoção de microrredes com múltiplas fontes de energia destaca seu papel fundamental na modernização do sistema elétrico, promovendo eficiência, sustentabilidade e resiliência. Como discutido, essas estruturas permitem a integração de tecnologias renováveis e armazenamento, além de oferecerem flexibilidade operacional tanto em sistemas conectados quanto isolados. No entanto, os desafios relacionados à qualidade da energia elétrica, como distorções harmônicas, flutuações de tensão e desequilíbrios, ainda demandam atenção para garantir conformidade com os padrões regulatórios.

Os estudos de caso apresentados demonstram que as microrredes, quando bem projetadas e gerenciadas, são capazes de minimizar os impactos adversos na qualidade da energia elétrica, assegurando estabilidade e confiabilidade. Em particular, o uso de filtros passivos e ativos, como os filtros L, LC e LCL, se mostrou eficaz na mitigação das distorções harmônicas causadas por inversores de geração fotovoltaica, evidenciando a importância de selecionar e projetar adequadamente essas soluções.

Apesar dos avanços, a complexidade inerente à operação de microrredes multifontes aponta para a necessidade de estudos contínuos sobre o impacto de novas tecnologias e estratégias de controle. Futuras investigações podem explorar o uso de filtros híbridos, técnicas de inteligência artificial para gerenciamento de energia, e a integração de microrredes em sistemas mais amplos e dinâmicos, como redes elétricas inteligentes (smart grids).

Portanto, as microrredes representam não apenas uma resposta aos desafios atuais, mas também uma oportunidade para transformar o setor elétrico, contribuindo para um futuro mais sustentável e eficiente. A evolução contínua de tecnologias e regulamentações será essencial para maximizar seus benefícios e minimizar os desafios associados.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado em parte pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e em parte pelas seguintes agências brasileiras de fomento à pesquisa: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig) - Bolsa APQ-04929-22, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código Financeiro 001, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Bolsa 406881/2022-7.

REFERÊNCIAS

- [1] L. O. Albuquerque, T. V. P. Silva, C. F. O. Barbosa, W. N. Macêdo, J. T. Pinho e M. A. B. Galhardo. "Avaliação da qualidade da energia elétrica na interconexão de microrredes isoladas experimentais". Revista Brasileira de Energia Solar - Ano 12 - Volume XII - Número 1 - Julho de 2021 - p. 39 - 48. Disponível em: <https://rbens.emnuvens.com.br/rbens/article/view/336/249>, acesso em janeiro de 2025.
- [2] M. Teixeira, A. Aoki e C. U. Vila, "Microrredes como ferramenta na melhoria da qualidade da energia elétrica". O setor elétrico, Janeiro 2023. Disponível em: <https://www.osetoelettrico.com.br/microrredes-como-ferramenta-na-melhoria-da-qualidade-da-energia-eletrica/>. Acesso em janeiro de 2025.
- [3] U. C. P. Junior, L. O. Albuquerque, C. F. O. Barbosa, J. P. A. Veríssimo, J. T. Pinho e M. A. B. Galhardo. "Qualidade do Suprimento de Energia Elétrica no Laboratório de Sistemas Híbridos e Microrredes do GEDAE/UFPA", VII CBENS, Congresso Brasileiro de Energia Solar -Gramado, 17 a 20 de abril de 2018 Disponível em:

- <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/221/221>, acesso em janeiro de 2025.
- [4] M. E. T. S. Junior e L. C. G. Freitas. “Microrredes: Estado da arte, desafios e tendências para geração, distribuição e uso sustentável de energia elétrica”. Braz. Ap. Sci. Rev, Curitiba, v. 4, n. 6, p. 3888-3906 nov./dez.2020. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BASR/article/view/21535/18435> acesso em janeiro de 2025.
- [5] S. Bhattacharya, A. Veltman, D.M Divan, and B. Banerjee, “Active filter system implementation”, IEEE Trans. Ind. Applications, vol. 4, no.5, p. 47-63, 1998.
- [6] T. P. Guedes. “Análise Comparativa de Estruturas de Conexão com a Rede Elétrica em Sistemas Fotovoltaicos”. João Pessoa, 2019.
- [7] S.S. Resende, J. C. Damião, P. C. Santos, T.L. Oliveira, I. Santos, L. P. Pires. “Comparação dos filtros L, LC e LCL para mitigação de distorções harmônicas produzidas por inversores de geração distribuída fotovoltaica”. XXII CEEL, Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, Uberlândia, 16 a 20 de dezembro de 2024.
- [8] D. I. Brandao, J. A. Pomilio, F. P. Marafão, A. M. S. Alonso. “Validação experimental de uma microrrede com controle centralizado e despachável.” Eletrônica de Potência, vol. 23, no. 3, pp. 281–291, setembro 2018. Disponível em : <https://journal.sobraep.org.br/index.php/rep/article/view/128/112> acesso em janeiro de 2025.
- [9] IEC, 2014. “Microgrids for disaster preparedness and recovery”. Genebra, Suíça. Disponível em: <https://www.iec.ch/basecamp/microgrids-disaster-preparedness-and-recovery-electricity-continuity-plans-and-systems> acesso em janeiro de 2025.
- [10] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Resolução Normativa Nº 1.000, de 07 de Dezembro de 2021. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf> acesso em janeiro de 2025.
- [11] Procedimentos de distribuição. “Módulo 8–qualidade da energia elétrica.” Agência Nacional de Energia Elétrica–ANEEL (2020).
- [12] R. C. Torres. Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais. 2012. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012
- [13] B. Burguer, R. Rüther. “Inverter sizing of grid-connected photovoltaic systems in the light of local solar resource distribution characteristics and temperature”. Solar Energy, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X05003099> acesso em janeiro de 2025.