

Emulação de Impedância Virtual através de um Simulador de Rede para Estudos de Conexão de um SAEB à Rede Elétrica *

Chrystiano Alves Galdino * Victor Flores Mendes *
Pedro de Oliveira Coelho ** Arthur Miranda do Vale Ribeiro **

* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais - Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil, (e-mail: chrystianoalves@hotmail.com, victormendes@cpdee.ufmg.br)

** Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais - Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil, (e-mail: plivera00@gmail.com, arthurmirandabh13@gmail.com)

Abstract: The paper presents an experimental study carried out using the regenerative grid simulator NHR 9410, in order to carry out studies on the integration of distributed generation systems to the electrical grids, mainly from the point of view of voltage variations. The process is carried out by implementing a virtual impedance, which emulates the impedance values of lines, where the tests are performed with the network simulator subjected to different conditions of active and reactive power. The experiment is validated by connecting a battery energy storage system (BESS) to the grid simulator.

Resumo: O artigo apresenta um estudo experimental realizado com o uso do simulador regenerativo de rede NHR 9410, com a finalidade de se realizar estudos de integração de sistemas de geração distribuída às rede elétricas, principalmente do ponto de vista de variações de tensão. O processo é realizado implementando uma impedância virtual, a qual emula os valores de impedância de linhas, onde os testes são realizados com o simulador de rede submetido a diferentes condições de potência ativa e reativa. O experimento é validado por meio da conexão de um sistema de armazenamento de energia em baterias (SAEB) ao simulador de rede.

Keywords: Virtual Impedance; grid simulator; storage; distribution network; reactive power.

Palavras-chaves: Impedância virtual; simulador de rede; armazenamento; rede de distribuição; potência reativa.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de distribuição de energia desempenham um importante papel no fornecimento de energia até o consumidor final. A constante necessidade de garantir o seu correto funcionamento, exige análises aprofundadas sobre o comportamento da rede mediante aos problemas de qualidade de energia e a variações de carga. Com o aumento da geração distribuída (GD), o estudo das redes de distribuição existentes é fundamental para se verificar possíveis pontos de falhas ou instabilidades que podem ocorrer, bem como o limite para a inclusão de novas fontes de energia.

A maneira como a geração distribuída é alocada nas redes de distribuição representa um importante fator na consideração dos impactos que ocorrem no sistema elétrico,

e devem ser levados em consideração, conforme descrito em Yukita et al. (2007). Recentemente o aumento dos diferentes tipos de geração como a fotovoltaica (PV) e eólica (WG) exigem uma maior atenção aos limites de qualidade de energia elétrica, devido à intermitência das fontes durante o dia, e ao emprego de eletrônica de potência para sua conexão à rede.

A definição dos problemas de qualidade de energia existentes, bem como os valores limites que são impostos ao produto energia elétrica são explicitados nos Procedimentos de Rede que no Brasil são definidos pela ANEEL (2012), e devem ser utilizados como referência para acessar o sistema elétrico com os inversores utilizados na geração distribuída.

Para tentar resolver esses problemas, é possível utilizar algumas estratégias para melhoria da qualidade da energia de um sistema de potência que contém geração distribuída. Uma delas conforme é apresentado em Yukita et al. (2007), consiste na utilização de um sistema de armazenamento para a regulação de frequência e a manutenção do nível de tensão. Um outro trabalho importante sobre o uso de sistema de armazenamento é descrito em Adeyemo et al. (2018), onde um sistema de controle é projetado para

* O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais através do projeto APQ-01187-18, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) através do projeto 408059/2021-4 e do projeto P&D CE-MIG/ANEEL D722.

regular a potência reativa fornecida para a rede, por meio de um sistema de armazenamento de energia, com bancos de baterias operando em paralelo. Esse sistema de controle garante que os bancos de baterias sempre operem com o maior valor do fator de potência disponível. Também em Fan and Lei (2016) é realizado um estudo sobre a alocação de sistemas de armazenamento em redes de distribuição fracas e com alta densidade de geração distribuída.

Outro aspecto importante é o controle do fluxo de potência reativa no sistema elétrico. Como exemplo, podemos ver em Gau and Wu (2020), que o controle de potência reativa e da tensão são necessários para os sistemas de geração eólica, devido as instabilidade de tensão que ocorrem, recorrentes da alta penetração de energia eólica na rede. Para que este controle seja realizado, são apresentados métodos tradicionais utilizados em turbinas eólicas, tais com controle de tensão, controle de potência reativa e o controle do fator de potência.

Para os sistema fotovoltaicos que naturalmente são de grande intermitência, os cortes de geração que ocorrem e o consumo de potência reativa são de grande importância para se observar o comportamento da tensão nas linhas de distribuição. Em Weckx et al. (2014) é descrito um método de controle centralizado e local para o controle de tensão dos inversores em uma rede de distribuição desbalanceada.

Um aspecto importante é o papel que a potência reativa desempenha, quando é analisado uma rede de distribuição contendo geração distribuída. Matvoz et al. (2017) apresenta os benefícios da regulação deste tipo de potência nas redes de distribuição de baixa tensão e os resultados obtidos na redução das perdas de energia.

Com a finalidade de se analisar a integração de geração distribuída em redes de energia, são necessárias medições e análises as quais podem ser realizadas via simulação ou análise em tempo real. Segundo Fuchs et al. (2012b), uma importante forma para se verificar os problemas existentes nesta integração, além de poder realizar testes, é obtida por meio da recriação desses sistemas em pequena escala em laboratório, fazendo o uso de bancadas experimentais que proporcionam sistemas para a emulação e medição de uma rede. Um sistema com a finalidade de emular as propriedades de rede, tais como a impedância, frequência e tensão também é apresentado em Fuchs et al. (2012a), por meio de uma bancada de testes.

Uma maneira empregada para se realizar testes de qualidade de energia em laboratórios sem comprometer a rede de distribuição local é por meio do uso de equipamentos simuladores de rede. Existem várias possibilidades de simulação de uma rede de energia, sendo as mais comuns o uso de inversores controlados ou de equipamentos comerciais que apresentam uma maior facilidade de utilização. Dentre os equipamentos comercializados, existem algumas opções de fabricantes, como a NHR, Pacific e Regatron. Um simulador Regatron TC.ACS.50.528.4WR.S.LC de quatro quadrantes e trifásico é utilizado em Jonke et al. (2020), onde é ligado em série com um inversor de pequenos sinais, para emular características arbitrárias de rede, tais como impedância de rede, harmônicos e desvios de tensão. Para o trabalho desenvolvido neste artigo foi utilizado um simulador de rede NHR- 9410 de quatro quadrantes e trifásico, emulando uma rede através de uma impedância virtual.

A utilização de um simulador de rede além de uma estratégia de emular uma impedância virtual, pode representar uma solução viável para este problema. Estudos realizados em Ronghui et al. (2019) demonstram a eficácia de um método utilizando impedâncias virtuais para realizar o compartilhamento preciso de potência reativa em uma microrrede, que contem as impedâncias de linha desbalanceadas.

Um dos problemas existentes na utilização de valores elevados de impedância virtual, é conforme exposto em Sellamma et al. (2019), o aumento da instabilidade gerada, além dos problemas de qualidade de energia. Para resolver esses problemas, os autores utilizam pequenos valores de impedância virtual adaptativa, melhorando o problema de imprecisão no compartilhamento de potência reativa.

A precisão no compartilhamento de potência é conforme Guerrero et al. (2004) altamente sensível ao valor da impedância de saída do inversor, sendo necessário o ajuste fino desta impedância. Os autores retratam os efeitos da impedância de saída para inversores utilizados em Uninterruptible Power Supply (UPS), os quais são conectados em paralelo. Em Guerrero et al. (2005) é apresentado um projeto de impedância de saída virtual, a qual é capaz de reduzir os impactos de impedâncias de linha desbalanceadas. Essa impedância utilizada no controle de uma malha em loop fechado fornece uma estratégia adequada de compartilhamento de potência. Em Zhang et al. (2016), a precisão no compartilhamento de potência reativa entre gerações distribuídas é obtida por meio de uma impedância virtual adaptativa e uma estratégia de controle capaz de operar com impedâncias de linha desbalanceadas. Essa estratégia elimina o desbalanceamento de potência reativa fornecida pelas unidades de geração.

Assim, observando os aspectos descritos sobre o compartilhamento de potência em uma geração distribuída, o presente artigo busca comprovar por meio de metodologias experimentais que é possível verificar o comportamento de uma determinada rede de distribuição conhecendo o seu valor de impedância e tensão de operação, mediante a utilização de um simulador de rede e uma estratégia para considerar a rede de distribuição efetuando um fluxo de potência bidirecional, por meio do fornecimento de energia para um sistema de armazenamento em baterias (SAEB), tanto para a sua carga, bem como a absorção de energia fornecida durante a sua descarga.

O artigo apresenta na Seção 2 o simulador de rede, mostrando as suas principais características, e como ele foi utilizado para implementar a impedância virtual. Na Seção 3 são abordadas as estratégias utilizadas para a comunicação e programação na realização do experimento. Na Seção 4 são descritos os testes realizados com o equipamento, além da apresentação dos resultados obtidos. Na Seção 5 que finaliza o artigo, são abordados os resultados que foram obtidos além de uma análise sobre estes dados.

2. SIMULADOR DE REDE

2.1 Introdução

O simulador de rede NHR-9410 é um equipamento produzido pela NH Research, com a finalidade de simular uma

fonte bidirecional tanto em corrente alternada quanto em corrente contínua. O aparelho é capaz de representar diferentes formas de onda de tensão, trabalhar com frequências diferentes de 60 Hz, realizar medições das formas de onda por meio de um osciloscópio digital interno e simular distúrbios de qualidade da energia por meio de ferramentas de criação de formas de onda.

O modelo utilizado apresenta uma potência máxima de saída de 12 kW monofásico ou de 4 kW por fase quando em ligação trifásica. O valor de frequência que pode ser utilizado está entre 30 e 100 Hz, e por meio da combinação dos três canais de saída disponíveis, tanto em corrente alternada quanto em corrente contínua, é possível se obter 13 modos distintos de programação. Para o estudo realizado será utilizado apenas o modo de corrente alternada trifásico em estrela, onde o neutro está disponível, e as três fases estão defasadas de 120°.

O simulador apresenta um painel em LCD touch screen, o qual possibilita uma interação do usuário com as funções programáveis, além da visualização dos parâmetros utilizados em tempo real. O aparelho pode ser utilizado por meio da implementação dos comandos necessários diretamente no painel touch, via softwares compatíveis ou por meio de programação. O programa criado pelo usuário pode ser desenvolvido em qualquer linguagem de programação, onde o mesmo deve ser capaz de realizar uma conexão TCP/IP com o aparelho, onde textos com os comandos são enviados e recebidos. Na figura 1 é possível se visualizar o simulador de rede em operação:



Figura 1. Simulador de rede em operação

Foi utilizada a programação na linguagem Python para criar o programa contendo a rotina a ser utilizada na operação do simulador. O programa criado em Python envia os comandos de execução necessários em uma linguagem especial que é utilizada pelo simulador, chamada SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments). Os comandos SCPI são empregados em diversos equipamentos de teste e medição, e resultam de uma padronização realizada para facilitar a controlabilidade dos equipamentos fabricados. Dessa forma é possível reduzir o tempo de desenvolvimento de programas para testes automáticos de equipamentos, o que acarreta na redução de esforços para o tratamento de dados experimentais obtidos.

2.2 Impedância Virtual

O conceito de impedância virtual diz respeito a uma impedância fictícia composta por uma resistência (R_s) e uma indutância (L_s), capaz de desempenhar a limitação física da corrente fornecida para uma carga, apresentando a vantagem de não ocorrer a dissipação de energia ativa. Essa impedância apresenta uma queda de tensão que também é proporcional a corrente demandada pela carga.

Pelo fato de não utilizar componentes físicos, podem ser utilizados diversos valores de resistência e indutância, o que representaria uma certa dificuldade, caso fossem utilizados componentes reais. Outra vantagem implícita é a capacidade de se utilizar uma resistência virtual pura ($L_s = 0$) ou uma impedância virtual indutiva pura ($R_s = 0$) sem a necessidade de modificações de cabeamento, sistema de medição ou topologia do circuito.

O conceito de impedância virtual pode ser expandido para a realização de testes e validações de equipamentos com a rede elétrica, conforme é apresentado em Jonke et al. (2015), onde a principal vantagem de utilização deste método é a capacidade de ajuste da tensão de saída, frequência e impedância da rede.

Os valores utilizados para a resistência e para a indutância virtual são baseados em valores encontrados nas redes de distribuição de energia, e por serem muito pequenos, acarretam em uma baixa queda de tensão no circuito em análise, o que proporciona um baixo efeito de carga no sistema em estudo. Uma das formas de se determinar o valor de impedância virtual a ser utilizada em testes de uma rede, é de acordo com Jonke et al. (2015), por meio da determinação de seu valor máximo. Esse valor é definido por meio da equação 1:

$$Z_{virtual} = 3 * \frac{V_{LN}^2}{S_{min}} \quad (1)$$

Onde S_{min} é a potência mínima de curto-circuito da rede a ser simulada, V_{LN} é a tensão de linha (RMS) e $Z_{virtual}$ é o valor da impedância virtual. Como o uso da equação 1 é possível utilizar o valor da resistência (R_s), a qual aplicada na relação entre a indutância e a resistência da rede em estudo (X/R), permite a obtenção da impedância indutiva (X) e posteriormente a indutância (L_s).

Para a análise de redes de distribuição de energia, serão realizados testes com diversos valores de resistência (R_s) e indutância (L_s) com a finalidade de verificar o comportamento causado pela impedância.

2.3 Modelagem Matemática

O estudo proposto consiste em analisar o comportamento de um sistema ligado por meio de uma impedância virtual ao barramento infinito (Grid). A impedância representará uma rede de distribuição que será analisada, a qual será submetida a um fluxo de potência, onde a carga vai solicitar potência da rede, e quando for considerado um sistema de geração distribuída, o sistema irá fornecer potência ativa e reativa para rede. Para o caso de um sistema de armazenamento de energia, o fluxo de potência ativa e reativa poderá ser bidirecional, e devido a essa flexibilidade será adotado para o presente estudo.

Considerando uma rede trifásica equilibrada, um circuito trifásico pode ser analisado através de um equivalente por fase. Esse circuito equivalente que será utilizado para os estudos é apresentado na figura 2:

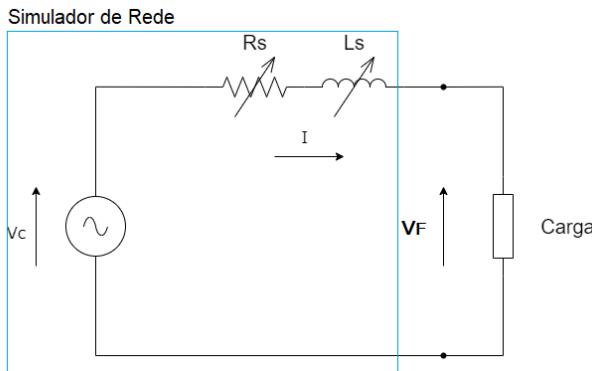


Figura 2. Circuito monofásico.

Os parâmetros definidos do circuito são:

V_C = Tensão do barramento infinito

V_F = Tensão na carga

I = Corrente no circuito

R_s = Resistência virtual

L_s = Indutância virtual

Carga = Carga utilizada para o teste

A carga utilizada pode ser do tipo passiva, a qual é constituída por uma combinação de resistências, indutâncias ou capacitâncias, ou do tipo ativa, constituída por um sistema de armazenamento ou um sistema de geração. A equação que representa o comportamento do circuito equivalente monofásico é:

$$V_F = V_C - I * (R_s + j * L_s * w), \quad (2)$$

Onde:

w = Frequência angular

j = Operador imaginário

A solução da equação (2) fazendo uso da tensão de referência do barramento infinito, $V_C = |V_C| / 0^\circ$, e os valores de resistência e indutância virtual (R_s e L_s), possui o seguinte formato:

$$V_F \cos(\theta_F) = V_C \cos(\theta_C) - I \cos(\theta_I) R_s + I \sin(\theta_I) w L_s \quad (3)$$

$$V_F \sin(\theta_F) = V_C \sin(\theta_C) - I w L_s \cos(\theta_F) - I \sin(\theta_I) R_s \quad (4)$$

Onde:

θ_F = Ângulo de fase da tensão V_F

θ_C = Ângulo de fase da tensão V_C

θ_I = Ângulo de fase da corrente I

A tensão V_F , calculada na carga pela equação 2, é o valor de tensão que deve ser controlada, fazendo-se uso da impedância virtual implementada. O estudo proposto tem como objetivo impor um valor de tensão na saída do simulador, o qual é calculado utilizando a corrente na carga, a tensão da rede ideal e os valores da impedância

virtual, ou seja, emulando as características de uma rede com determinada característica X/R.

Para se verificar a eficácia do método proposto foram realizados experimentos em bancada, onde foi possível testar diferentes valores de impedância virtual e de potências ativa e reativa. Os resultados obtidos serão apresentados nas próximas seções.

3. IMPLEMENTAÇÃO FÍSICA

3.1 Estrutura de Comunicação

A implementação física consiste na interligação do simulador de rede com o sistema sob teste, em especial nesse estudo com o sistema de armazenamento de energia em baterias. Para a ligação do simulador de rede com as cargas foram utilizados conexões diretas via cabo, ficando a medição dos valores por meio de osciloscópios, multímetros e do programa implementado. A parte de comunicação foi realizada com o estabelecimento de uma rede interna com o protocolo de comunicação TCP/IP. Nesta rede, tanto o simulador quanto o computador contendo a rotina de programação necessária para a simulação da impedância virtual são interligados. Com essa ligação é possível realizar o comando de disparo que habilita a impedância virtual, além de se obter os valores medidos de forma praticamente instantânea. O objetivo de utilizar um sistema ligado por meio de rede, é a redução do números de cabos de dados envolvidos, e com isso melhorar a qualidade dos resultados obtidos, os quais apresentam menores interferências eletromagnéticas e ruídos, fatores muito comuns em um ambiente laboratorial.

Os comandos que são fornecidos ao simulador são implementados em um código Python que é responsável pela tradução dos comandos necessários para a linguagem SCPI utilizada pela máquina, a captura das medições, o armazenamento e processamento dos dados obtidos. As equações 3 e 4 são utilizadas de forma interativa para o cálculo do valor da tensão V_F , com o auxílio da impedância virtual. Assim o programa atua comandando os valores de tensão a serem disponibilizados no ponto de conexão, já considerando a impedância virtual.

As rotinas utilizadas para simular a impedância virtual e os códigos utilizados para gerar os gráficos apresentados neste trabalho estão disponíveis em um site de repositórios de arquivos, onde o link para o mesmo é fornecido abaixo:
<https://github.com/ChrystianoGaldino/CBA-2022.git>

3.2 Amostragem

A medição do tempo de amostragem é importante para se verificar a quantidade de dados de medição que são capazes de serem adquiridos e processados, sem que a informação seja perdida durante a conversão do sinal de analógico para digital. O tempo de amostragem utilizado para a simulação da impedância virtual, possui uma relação direta com a velocidade que o simulador de rede recebe um comando, processa e envia a resposta. Como o modelo do Digital Signal Processor (DSP) utilizado internamente no simulador de rede não é divulgado pelo fabricante, as informações sobre a conversão analógico-digital (A/D) e a capacidade

de armazenamento são obtidos no manual do usuário, por meio dos valores divulgados para a função Waveform Digitizer, nas funções de saída de tensão e corrente. Assim o aparelho apresenta uma memória de 64 mil amostras, uma taxa de amostragem de 125 mil amostras por segundo e uma precisão de 0.05% na leitura.

Para se determinar o tempo de resposta do equipamento mediante o uso da impedância virtual, foram realizadas as aquisições de duas medições consecutivas, e realizado o cálculo desse intervalo de tempo entre as medidas. O valor obtido foi de aproximadamente 9 ms, o qual não pode ser melhorado, pois é fruto do tempo de aquisição e processamento de dados do DSP do equipamento, e do código em Python responsável por emular a impedância, realizar os cálculos e armazenar os valores processados.

O estudo realizado considera apenas a análise de regime permanente para a utilização da impedância virtual. Isso decorre em um equacionamento que não considera as variações temporais de tensão e corrente, representadas pelas suas derivadas, simplificação adotada devido a limitação do tempo de amostragem obtido. No entanto, a emulação da rede em regime permanente possibilita muitos estudos de integração de GDs às redes.

3.3 Validação

A validação do sistema proposto utilizando o simulador de rede com a impedância virtual foi realizada de forma experimental com a implementação prática. A montagem em laboratório fez uso de uma bancada existente implementada com dois bancos de baterias e sistema de operação completo, capaz de realizar a carga e descarga do banco conectado na rede elétrica. Um estudo completo do funcionamento deste banco de baterias é apresentado em Xavier (2022), onde as características de implementação e controle são abordadas mais especificamente.

O simulador de rede foi conectado diretamente na entrada de energia da bancada, sendo responsável por fornecer toda a alimentação necessária para a parte de potência, bem como receber a potência descarregada pelo banco de baterias. Na figura 3 é possível visualizar o simulador de rede, osciloscópio e a bancada contendo o banco de baterias com o painel elétrico contendo os inversores, DSPs e circuitos de aquisição de dados.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 Testes Realizados

Os testes realizados consistem em operar o simulador de rede emulando uma impedância virtual conectado ao SAEB. Variações nos valores da impedância resistiva e indutiva são realizadas, onde é observado o comportamento do conjunto por meio da medição dos valores de tensão, corrente e fator de potência. Os testes utilizaram apenas um dos dois bancos de baterias existentes, o qual foi operado tanto em carga quanto em descarga. As três condições possíveis de fator de potência, sendo o fator de potência unitário, atrasado (indutivo) e adiantado (capacitivo) foram testadas.

O valor de impedância virtual do caso base (CB), $Rs = 0.1\Omega$ e $Ls = 1mH$, foi utilizado como referência para a

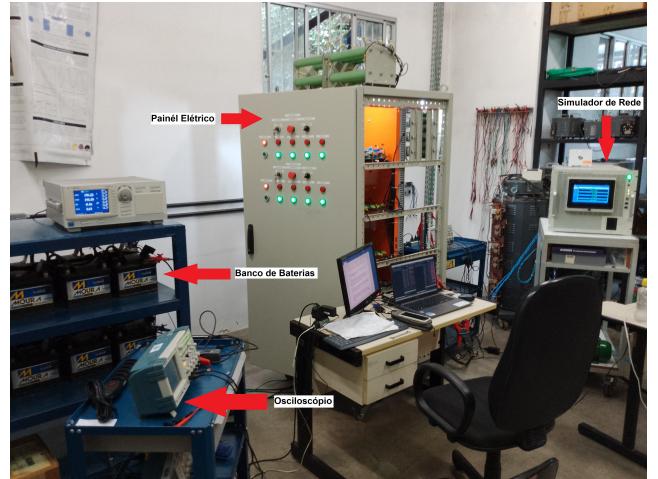


Figura 3. Banco de baterias e simulador de rede

variação dos parâmetros da impedância durante os testes. No total foram realizados cinco testes, onde por meio da variação dos parâmetros foi possível visualizar a sua contribuição para a tensão V_F no ponto de ligação entre o simulador de rede e o sistema de armazenamento. Os valores medidos pelo simulador são referentes ao comportamento da fonte de tensão interna V_C .

O primeiro teste avalia a contribuição da resistência e indutância da impedância virtual separadamente. Os demais testes utilizam apenas o valor de impedância do caso base, variando outros parâmetros. O segundo teste mantém constante o valor a potência ativa utilizada, enquanto ocorre a variação da potência reativa capacitativa. Já o terceiro teste mantém constante a potência reativa indutiva e varia a potência ativa. O quarto teste realiza a mudança do modo de operação do sistema de armazenamento de descarga para a carga, além do valor de potência ativa. A potência reativa para este teste é indutiva e possui o valor constante. Para o quinto teste, foi realizado a variação da potência reativa de indutiva para capacitativa, considerando a descarga das baterias com potência ativa constante. Os resultados obtidos são apresentados na próxima seção.

4.2 Resultados Obtidos

- **Teste 1: Influência dos parâmetros da Impedância Virtual**

Para o primeiro dos testes foram mantidas constantes a potência ativa em 1,6 kW e a potência reativa com fator de potência indutivo em 500 VAR, enquanto foram analisadas as influências dos parâmetros da impedância virtual. O teste foi realizado com os valores do CB e depois com a variação individual da resistência e indutância virtual respectivamente Rs e Ls em 10 vezes. Os resultados obtidos são apresentados na figura 4.

Conforme pode ser observado, o aumento da resistência virtual provoca uma aumento direto no valor da tensão medida no ponto de conexão, a qual saiu do valor de 155.478 V para 159.158 V.

Na variação da indutância virtual, é percebido um efeito contrário, observado pela redução do valor de tensão para 151.312 V. Isso é resultado da direção do fluxo de potência reativa, a qual flui para o sistemas de armazenamento causando uma redução

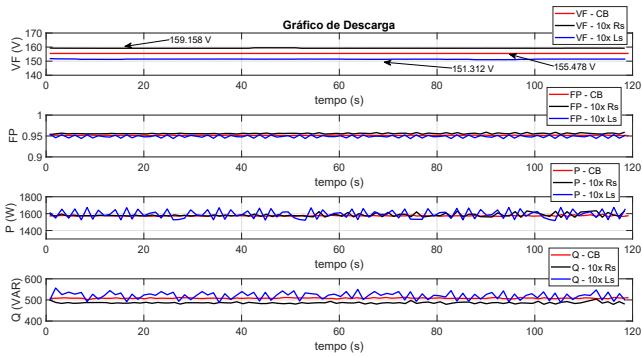


Figura 4. Análise dos parâmetros da impedância virtual

do valor da tensão, enquanto que a potência ativa vai em direção ao simulador de rede, provocando um aumento da tensão. Assim como no teste com a resistência virtual dez vezes maior, com o aumento do valor da indutância, o fator de potência exibe um comportamento mais oscilatório em relação ao CB. A variação da indutância apresenta uma influência maior no comportamento do fator de potência e potência ativa, quando comparado com a variação da resistência. Isso ocorre pois a variação na resistência apresenta um menor impacto na corrente do circuito, na potência reativa, e no fator de potência.

Assim fica evidente a contribuição da resistência e da indutância no valor da tensão obtida, e dessa forma, pode ser verificado se esta tensão vai atender os requisitos especificados para a interligação do sistema de armazenamento no ponto de ligação. É importante também observar que a variação dos valores da impedância virtual devem ser realizados em pequenas quantidades, pois com valores mais altos percebe-se uma maior tendência a instabilidades ocasionadas pelas rápidas dinâmicas de corrente envolvidas.

- **Teste 2: Influência da Potência Reativa** Neste segundo teste a potência reativa aplicada foi variada mediante um fator de potência capacitivo e considerando a impedância do CB. Inicialmente configurada em aproximadamente 1.5 kVAR ela teve o seu valor dobrado para 3.0 kVAR, enquanto a potência ativa foi mantida constante em 1.5 kW. Foram observadas as variações apresentadas na figura 5:

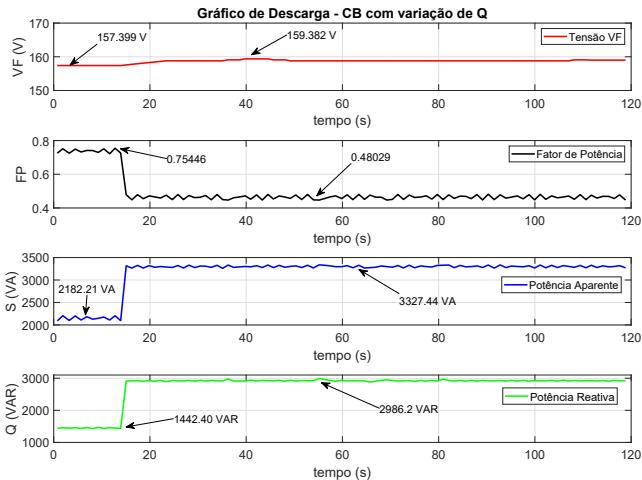


Figura 5. Análise da influência da potência reativa

No teste 2 é possível perceber que a variação da potência reativa provoca alterações proporcionais no fator de potência, onde dobrando o valor da potência reativa utilizada, foi verificada a redução de aproximadamente metade do fator de potência. A potência aparente também aumenta indicando a variação de potência reativa no circuito, e ocorre um pequeno aumento no valor da tensão obtida, a qual passa de 157.399 V para 159.382 V.

Conforme esperado a injeção de mais reativos contribui para a diminuição do fator de potência, o qual reduz de 0.75446 para 0.48029, mas não impacta significativamente o módulo da tensão. Aumentando a potência reativa ocorre um aumento de corrente a qual gera uma queda de tensão na impedância virtual. Como essa potência tem o sentido do simulador para o sistema de armazenamento, essa queda de tensão é somada ao valor de tensão medido, ocasionando o aumento obtido na tensão no ponto de ligação.

- **Teste 3: Influência da Potência Ativa** No terceiro teste foi realizada a variação da potência ativa de 1.6 kW para aproximadamente 700 W, mantendo a potência reativa constante em 500 VAR. A impedância utilizada também foi a do CB, e o fator de potência escolhido foi o indutivo. Foram observados os resultados presentes na figura 6:

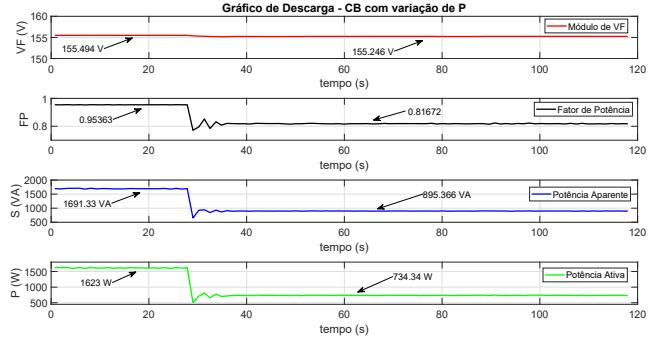


Figura 6. Análise da influência da potência ativa

Os resultados demonstram que após a redução da potência ativa, ocorre uma mudança no fator de potência, que sai de 0.95363 e vai para 0.81672, além de uma mínima queda no módulo da tensão, de 248 mV. A redução da potência causa um comportamento oscilatório de curta duração no fator de potência e potência aparente, o qual se justifica pela variação instantânea na corrente em um circuito de características indutivas, e da atuação do sistema de controle do sistema de armazenamento.

O módulo de tensão apresentado não é muito afetado pela redução de potência, pois nesse caso a variação da tensão provém da queda de tensão na resistência virtual, a qual é pequena. Comparando com o caso anterior, observa-se que a variação de tensão é maior ao se variar a potência reativa, já que a impedância indutiva é relativamente maior.

- **Teste 4: Influência do modo de operação do SAEB (carga ou descarga)** Para o quarto teste foi realizada a mudança de operação do sistema de armazenamento entre descarga e carga. Inicialmente em descarga foi utilizado um valor de potência ativa de 1.6 kW, e para a carga uma potência de 1.2 kW. O fator de potência

utilizado foi indutivo, e a potência reativa ajustada para 500 VAR. Com a finalidade de se verificar os impactos da resistência virtual neste processo, foi realizado o mesmo teste com a resistência dez vezes maior que a do CB. Os valores observados para esses dois testes são apresentados na figura 7:

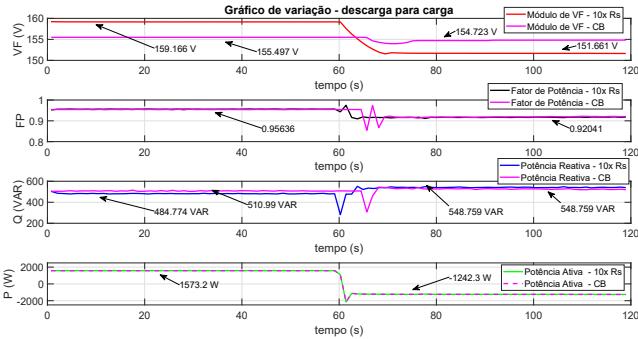


Figura 7. Análise da influência do modo de operação

Na mudança do modo de operação entre descarga e carga, ocorre a troca do sentido da corrente no circuito. Assim como no teste 3, qualquer variação da corrente, tanto em módulo quanto em sentido, provoca comportamentos transitórios, os quais podem ser observados nas formas de onda. Ocorrem pequenas alterações no fator de potência, saindo de aproximadamente 0.95 para 0.92 nos dois casos, e a potência reativa, que apresenta um pequeno aumento após o sistema de armazenamento ser modificado para carga. O módulo da tensão apresenta uma redução no seu valor. Para o CB a tensão sai de 155.497 V para 154.723 V, e para o caso dez vezes maior vai de 159.166 V para 151.661 V, evidenciando o comportamento da impedância virtual. O perfil de potência ativa é semelhante nos dois testes.

Apesar dos comportamentos transitórios ocorridos, a impedância virtual não provoca demais distúrbios na conexão entre o sistema de armazenamento e o simulador de rede.

- **Teste 5: Influência do Fator de Potência** Para o último teste foi realizada uma variação do fator de potência de indutivo para capacitivo, além de um aumento do valor da potência reativa, a qual foi alterada de 500 VAR para 1.5 kVAR. A potência ativa mantida constante em 1.2 kW, e o modo de operação do sistema de armazenamento foi o de carga. Os valores obtidos para o teste são descritos na figura 8.

Ao se realizar o aumento da potência reativa aplicada percebe-se uma redução do fator de potência, resultante de um excesso de reativos aplicados, passando de 0.92258 para 0.65095. Pelo fato do fator de potência passar de indutivo para capacitivo, ocorre um pequeno aumento no módulo da tensão no ponto de conexão, a qual sai de 155.76 V para 156.68 V, devido ao suprimento de potência reativa capacitativa. Esse resultado demonstra que poderia ser factível a realização de um controle de tensão na rede através do suprimento/consumo de potência reativa pelo sistema. A potência aparente aumenta para aproximadamente 1.9 kVA, indicando a variação ocorrida por meio do aumento da potência reativa circulando no circuito.

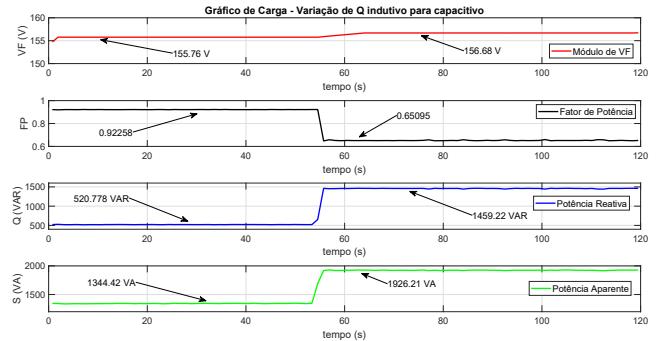


Figura 8. Análise da influência do fator de potência

5. CONCLUSÕES

O estudo do uso de uma impedância virtual para simular uma rede de distribuição foi analisado por meio de uma implementação física, fazendo uso de um simulador de rede conectado a um sistema de armazenamento de baterias. Os resultados obtidos comprovam a capacidade de se emular uma impedância virtual com o equipamento, sem a necessidade de utilizar resistores e indutores reais, e sem a dissipação de energia.

Com diferentes valores de impedância simulados, foram verificadas as alterações nos valores de tensão e fator de potência, que ocorreram durante os testes de operação em carga e descarga do banco de baterias. Cada uma dessas situações exerceu um comportamento diferente sobre a impedância virtual, resultantes da variação do valor e sentido da corrente aplicada no circuito. Esse estudo abre novas temáticas para a análise das redes de distribuição, em relação aos seus parâmetros de impedância e resistência, além dos problemas existentes de regulação de tensão. Possibilidades de correção do fator de potência e mitigação dos problemas de qualidade da energia podem ser estudados com o auxílio de um simulador de rede regenerativo, o que demonstra a importância deste equipamento em estudos técnicos de qualidade da energia face as regulamentações vigentes na distribuição de energia no Brasil.

O experimento mostrou-se promissor no estudo das redes de distribuição de energia e dos sistemas de armazenamento, apresentando resultados factíveis, precisos e com baixos níveis de ruídos. O uso da impedância virtual emulando uma linha de distribuição possibilita o estudo de estratégias de controle e monitoramento em laboratório, visando solucionar problemas reais, sem a necessidade de intervenção no sistema elétrico real. Dessa forma a confiabilidade do fornecimento de energia não é impactada, permitindo a realização de pesquisas para uma determinada rede em um ambiente controlado de laboratório. Trabalhos futuros devem envolver novas estratégias de medição e controle, para o estudo de fenômenos da qualidade de energia elétrica, os quais não foram abordados durante neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Adeyemo, O., Idowu, P., Asrari, A., and Khazaei, J. (2018). Reactive power control for multiple batteries connected in parallel using modified power factor method. In *2018 North American Power Symposium (NAPS)*, 1–6. IEEE.

- ANEEL, P.d.D.d.E. (2012). no sistema elétrico nacional (prodist): Módulo 8-qualidade da energia elétrica. *ANEEL Resolução Normativa*, 469.
- Fan, Z. and Lei, Z. (2016). Study on power energy storage allocation of weak power distribution grid with high-density distributed generation integration. In *2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, 1–5. IEEE.
- Fuchs, F., Gebhardt, F., Hoffmann, N., Knop, A., Lohde, R., Reese, J., and Wessels, C. (2012a). Research laboratory for grid integration of distributed renewable energy resources-design and realization. In *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 1974–1981. IEEE.
- Fuchs, F., Hoffmann, N., Reese, J., Wessels, C., Lohde, R., Grunau, S., and Gebhardt, F. (2012b). Research laboratory for grid-integration of distributed renewable energy resources-integration analysis of ders. In *2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)*, LS7a–4. IEEE.
- Gau, D.Y. and Wu, Y.K. (2020). Overview of reactive power and voltage control of offshore wind farms. In *2020 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C)*, 276–279. IEEE.
- Guerrero, J.M., de Vicuna, L.G., Matas, J., Miret, J., and Castilla, M. (2004). Output impedance design of parallel-connected ups inverters. In *2004 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, volume 2, 1123–1128. IEEE.
- Guerrero, J.M., De Vicuna, L.G., Matas, J., Castilla, M., and Miret, J. (2005). Output impedance design of parallel-connected ups inverters with wireless load-sharing control. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 52(4), 1126–1135.
- Jonke, P., Makoschitz, M., Biswas, S., Stöckl, J., and Ertl, H. (2020). Output impedance compensation of a cascaded advanced ac-simulator. In *2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 761–766. IEEE.
- Jonke, P., Stöckl, J., and Ertl, H. (2015). Concept of a three phase ac power source with virtual output impedance for tests of grid connected components. In *2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST)*, 399–404. IEEE.
- Matvoz, D., Maksić, M., et al. (2017). Optimized reactive power characteristics for distributed generation sources in the low voltage network. In *2017 IEEE Manchester PowerTech*, 1–6. IEEE.
- Ronghui, A., Zeng, L., and Jinjun, L. (2019). Modified adaptive virtual impedance method to compensate mismatched line impedances in microgrids. In *2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 1109–1114. IEEE.
- Sellamma, H., Mellit, A., Rabhi, A., Hajji, B., and Oral, B. (2019). Micro-grid reactive power sharing using an adaptive virtual impedance technique. In *2019 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS)*, 1–5. IEEE.
- Weckx, S., Gonzalez, C., and Driesen, J. (2014). Combined central and local active and reactive power control of pv inverters. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 5(3), 776–784.
- Xavier, L.S. (2022). A comprehensive analysis of design and performance of power converters for battery energy storage systems. In *2022 Doctoral Thesis*, 1–114. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.
- Yukita, K., Ichiyanagi, K., Goto, Y., and Hirose, K. (2007). A study of electric power quality using storage system in distributed generation. In *2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, 1–4. IEEE.
- Zhang, H., Kim, S., Sun, Q., and Zhou, J. (2016). Distributed adaptive virtual impedance control for accurate reactive power sharing based on consensus control in microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(4), 1749–1761.