

Impacto da qualidade de energia na operação e proteção de linhas de transmissão

Vinicius C. de Moraes* Igor D. Melo* Jeanderson S. Mingorança*
Camile A. Moraes*,**

* Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), MG, (e-mails: vinicius.curcio@engenharia.ufjf.br, igor.delgado2008@engenharia.ufjf.br, jeanderson.mingoranca@engenharia.ufjf.br).

** Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa (UFV), MG, (e-mail: camile.moraes@ufv.br).

Abstract: This paper presents the impacts evaluation of power quality disturbances through simulations carried out using MATLAB and Simulink. In this regard, a transmission line with series compensation is modeled and subjected to short-circuit in several scenarios analyzed. The performance of the parameterized protection relay with distance function, ANSI 21, as well as the power quality impacts on the system are investigated. Research related to this topic is increasingly significant, due to the high penetration of solar and wind sources into the energy system. Verification of the protection devices' operation, when exposed to power quality disturbances, is necessary, since they lack monitoring systems capable of measuring such impacts in real-time. These disturbances can considerably affect the protection system operation, and consequently impact the electrical system as a whole, causing huge losses to network users. Industrial and commercial consumers, who need availability, quality, and reliability of energy supply to maintain their electro-intensive industrial processes are the most affected.

Resumo: Neste artigo, os impactos de distúrbios de qualidade de energia são avaliados através de simulações realizadas utilizando-se os *softwares* MATLAB e Simulink, em que uma linha de transmissão com compensação em série é modelada e submetida a curto-circuito em diversos cenários analisados. O desempenho do relé de proteção parametrizado com função de distância, ANSI 21, bem como os impactos da qualidade de energia nesse sistema são averiguados. Em razão da alta penetração de fontes de energia solar e eólica pesquisas relacionadas a esse tema são cada vez mais significativas sendo necessária a verificação da operação dos dispositivos de proteção quando expostos a distúrbios de qualidade de energia, visto que carecem de sistemas de monitoramento capazes de mensurar em tempo real esses impactos, uma vez que esses fenômenos podem afetar consideravelmente a operação do sistema de proteção, consequentemente impactando o sistema elétrico como um todo podendo ocasionar enormes prejuízos aos acessantes da rede principalmente aos consumidores industriais e comerciais que necessitam de disponibilidade, qualidade e confiabilidade de fornecimento de energia para manutenção de seus processos industriais eletrointensivos.

Keywords: protection of electric power systems; power transmission systems; transmission lines; distance relay; power quality.

Palavras-chaves: proteção de sistemas elétricos de potência; sistemas de transmissão; linhas de transmissão; relé de distância; qualidade de energia.

1. INTRODUÇÃO

As características da matriz elétrica de um país estão em constante modificação conforme Chang et al. (2021). Para o caso do Brasil, a evolução dessa matriz tem sido feita com base na transposição de um modelo predominantemente hidro-térmico para uma realidade de diversificação de fontes de geração de eletricidade, sobretudo com a penetração de fontes renováveis alternativas do tipo eólica e solar. Dessa forma, na última década houve uma redução da representatividade da fonte hidráulica na matriz elétrica brasileira, dando lugar a um maior volume de fontes re-

nováveis intermitentes em consonância com Soares et al. (2021). Em 2011, a fonte hidráulica correspondia a cerca de 72% da capacidade instalada segundo a Empresa de Pesquisa Energética EPE (2011). Já em 2021, de acordo com EPE (2021), esse valor era de 62,5%.

A implantação das Resoluções Normativas 482/2012 e 687/2015 pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), possibilitou que consumidores cativos produzissem sua própria energia elétrica advinda de fontes alternativas e reforçou essa mudança no setor elétrico, evidenciando a geração solar fotovoltaica. A nova Lei 14.300/2022 que institui o marco legal da microgeração e minigeração

distribuída pode provocar ainda maiores modificações no sistema elétrico brasileiro. Devido ao aumento significativo da inserção de fontes renováveis na matriz elétrica, são necessários que estudos sobre os impactos na proteção do Sistema Elétrico de Potência (SEP) sejam conduzidos. É possível destacar aqueles relativos à qualidade de energia, uma vez que a operação de um relé pode ser modificada quando há desvios de frequência, bem como pela presença de distorções harmônicas, segundo Pereira et al. (2020).

Um problema de qualidade de energia é descrito por Dugan et al. (2012) como alterações manifestadas por meio de desvios de tensão, de corrente ou de frequência que resulte em falha ou má operação de equipamentos. Com isso, os danos ocasionados pela qualidade de energia geram enormes prejuízos a agentes, a consumidores industriais e comerciais. Portanto, com o intuito de equilibrar os custos associados a esses danos, normas e resoluções foram criadas de forma a regulamentar e estabelecer padrões por meio dos indicadores de qualidade de energia elétrica.

Para a qualidade de serviço dos sistemas de distribuição no Brasil, tem-se a resolução normativa ANEEL Nº 956, de 7 de dezembro de 2021 que estabelece os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Em seu módulo 8, existe o tratamento da qualidade do fornecimento de energia elétrica. Neste módulo são abrangidas a qualidade do produto e a qualidade do serviço, estabelecendo metodologias para atendimentos e para ocorrências emergenciais. O foco está no detalhamento dos tipos de distúrbios de qualidade de energia incluindo variações de frequência e de tensão, bem como distorções harmônicas.

Já para os sistemas de transmissão de eletricidade, há os procedimentos de redes do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que por meio do submódulo 2.9 estabelece os requisitos mínimos de qualidade de energia elétrica para acesso ou integração à rede básica de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN).

No ramo da QEE (Qualidade de Energia Elétrica) existem algumas definições importantes, tais como de cargas não-lineares e distorções harmônicas. Uma carga não-linear é toda carga que provoca uma relação não constante entre tensão e corrente ou uma impedância variável com a tensão. Já a distorção harmônica é caracterizada pelo surgimento de correntes e tensões não-senoidais provocadas por cargas não-lineares conectadas à rede elétrica. O estudo dessas distorções é feito com a utilização da análise de Fourier com uma decomposição harmônica, em que a rede é estudada com um número finito de frequências harmônicas, de acordo Kagan (2009). Com a elevada presença de distorções harmônicas, alguns equipamentos podem não operar adequadamente, ou caso operem nessas condições inadequadas, sua vida útil é reduzida conforme citado em Martinez and Martin-Arnedo (2009). Posto isto, a distorção harmônica em um SEP é completamente indesejável, reforçando a ideia de que estudos desse fenômeno são de extrema importância e devem ser constantemente realizados como mencionado em Kojovic and Hassler (1997).

A transição energética no Brasil é evidente e, portanto, estudos relacionados aos impactos da qualidade de energia na proteção dos SEPs são imprescindíveis para órgãos

reguladores, concessionárias, agentes, bem como para a comunidade acadêmica. Diante do contexto previamente estabelecido, apresentam-se as seguintes motivações para a realização deste artigo de pesquisa:

- (i) A carência de sistemas de monitoramento que sejam capazes de mensurar em tempo real os impactos da qualidade de energia nos sistemas de proteção;
- (ii) A falta de estudos que relacionem a qualidade de energia com os sistemas de proteção em linhas de transmissão; e
- (iii) A importância em se modelar sistemas de potência no domínio do tempo e da frequência utilizando softwares adequados.

O objetivo geral deste trabalho é verificar o impacto na operação de dispositivos de proteção e avaliar o impacto de distúrbios de qualidade de energia como afundamentos de tensão resultantes de faltas em linhas de transmissão, distorções harmônicas e variação de frequência.

Para os estudos conduzidos, o *software* MATLAB e Simulink foram utilizados como ferramenta de modelagem e simulação.

Este artigo encontra-se estruturado em cinco seções, incluindo esta de caráter introdutório. Na seção 2, apresenta-se o *software* Simulink utilizado na condução das simulações. Na seção 3, o modelo estudado, bem como sua modelagem é apresentada. Os resultados das simulações são apresentados na seção 4 e, por fim, as conclusões serão detalhadas na última seção.

2. APRESENTAÇÃO DO SIMULINK

A disponibilidade de ferramentas de modelização e simulações computacionais atualmente é imensa e, em conformidade com esse fato, para este trabalho o desenvolvimento das atividades consiste na utilização do *software* MATLAB e Simulink para a implementação de um modelo de SEP a ser estudado.

O *software* MATLAB pode ser utilizado para analisar dados, desenvolver algoritmos e criar sistemas com uma vasta gama de modelagens. Há uma linguagem de programação de alto nível intrínseca ao MATLAB que permite que modelos matemáticos baseados em matrizes possam ser expressados de forma direta. Nesse *software* é fornecido uma enorme quantidade de bibliotecas de *toolboxes* que abrange desde processamento de sinais e de imagens, sistemas de controle, robótica, inteligência artificial até modelos para simulações de sistemas elétricos de potência, dentre outros como exibido em Mathworks (2021a).

O Simulink permite modelar e analisar sistemas complexos por meio da simulação de diagramas de blocos e, dessa forma, o sistema modelado pode ser testado exaustivamente até a implementação da planta física, com a possibilidade da realização de simulações em diversos cenários. Além disso, o *software* permite reduzir protótipos onerosos e arriscados através de testes de sistemas que seriam fisicamente inviáveis de se reproduzir, como é o caso de estudos de SEPs, uma vez que simulações reais causariam grandes impactos e prováveis prejuízos financeiros, além do alto risco à vida humana. Essa ferramenta permite ainda

empregar simulações da dinâmica do sistema, com suporte para sistemas lineares e não lineares, modelados em tempo contínuo, discreto ou ambos conforme Mathworks (2021b).

Um grande benefício na utilização do Simulink é a possibilidade de geração automática dos códigos, uma vez que a modelagem do sistema se dá através da construção de blocos representativos. Dessa forma, utilizando-se os *softwares* MATLAB e Simulink juntos, a programação textual e gráfica são combinadas para projetar o sistema em um ambiente de simulação em que conjuntos de dados de entradas podem ser criados no ambiente do MATLAB e ser utilizado para conduzir uma simulação, permitindo a visualização e análise de dados, bem como dos resultados obtidos.

A versão do MATLAB empregada é a R2018b juntamente com o *software* nativo Simulink que foi utilizado para a realização das simulações e com resultados apresentados neste trabalho. A modelagem do sistema elétrico de potência foi construída com diagramas de blocos, aumentando a praticidade e agilidade na execução do modelo, através da interface gráfica do usuário (*GUI - Graphical User Interface*) possibilitando o uso de blocos pré-definidos e personalização conforme for conveniente. Ademais, o *software* ainda permite criar blocos customizados a depender do perfil do usuário para representação do sistema a ser estudado.

A tela principal da ferramenta Simulink é representada pela Figura 1, em que pode-se ter acesso ao ambiente de simulação, e a Figura 2 caracteriza a biblioteca de blocos pré-definidos do *software*, possibilitando o uso de uma vasta gama de ferramentas com finalidades distintas e maior autonomia das simulações. No navegador da biblioteca, há a possibilidade de realização de buscas, acelerando ainda mais o processo de criação dos modelos, uma vez que não é necessário buscar manualmente cada componente.

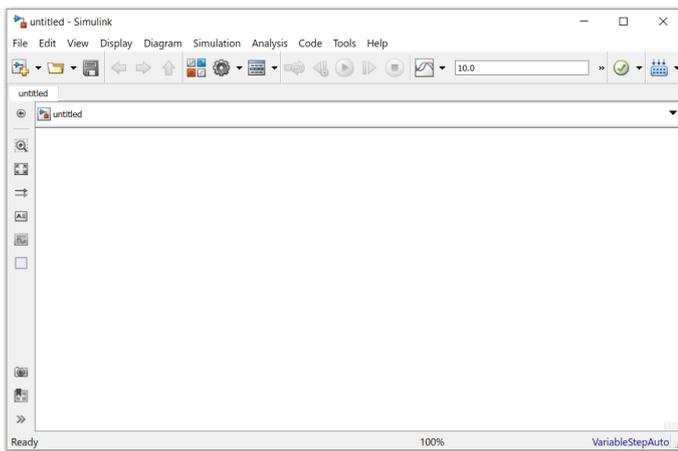


Figura 1. Ambiente de simulação do Simulink

3. APRESENTAÇÃO DO MODELO ESTUDADO

O sistema a ser estudado consiste em uma linha de transmissão com compensação em série com 300 km de comprimento, tensão igual a 400 kV e frequência fundamental considerada de 50 Hz. Para modelagem da linha de transmissão, foram utilizados blocos em série conforme Figura 3, em que cada um representa um segmento de

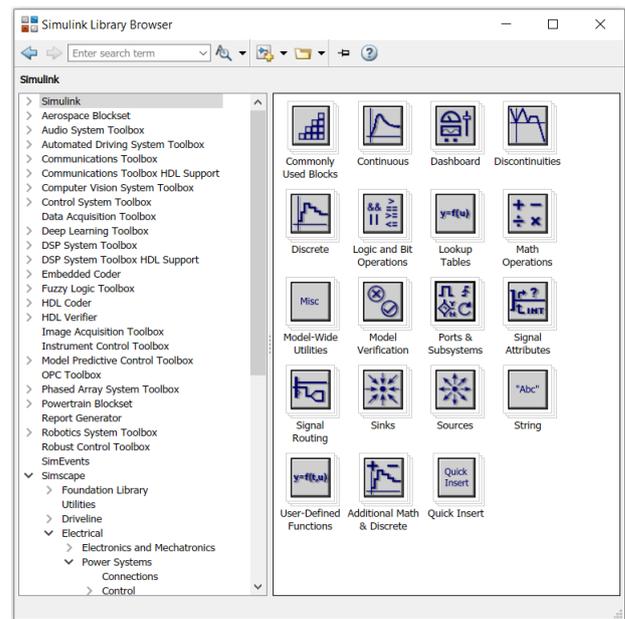


Figura 2. Navegador da biblioteca de blocos

linha modelo π de 50 km de comprimento a partir das fontes de geração, a qual cada uma foi representada por um bloco pré-definido do Simulink caracterizando uma fonte trifásica em que foi considerada a impedância de sequência positiva 15Ω e $\theta = 85^\circ$ e a impedância de sequência zero igual a $26,6 \Omega$ e $\theta = 85^\circ$. As impedâncias de linha para as sequências positiva e zero foram assumidas na modelagem como: $Z_{1L} = 0,315 \Omega/km, 85^\circ$, $Z_{0L} = 1,0265 \Omega/km, 75^\circ$. Para as capacitâncias de sequências positiva e zero foram atribuídos os respectivos valores: $13 nF/km$ e $8,5 nF/km$, conforme Saha et al. (2011) e Saha et al. (2016). Para melhor visualização, os dados da linha de transmissão, geração, compensação série e parâmetros do MOV (*Metal Oxide Varistors*) estão dispostos na Tabela 1.

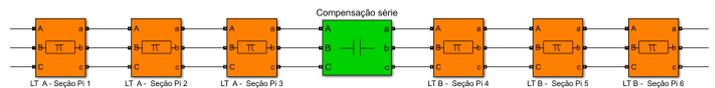


Figura 3. Representação da LT com compensação em série

Entre as linhas de transmissão e a geração, caracterizada por duas subestações, descritas por subestação (SE) A e SE B, há o sistema de proteção, composto pelo relé de distância, ANSI 21, e um disjuntor para seccionamento das linhas em cada uma das extremidades, isolando o defeito das subestações, quando ocorre atuação da proteção. O relé 21 realiza o processamento dos sinais, dos valores de corrente e tensão do sistema capturados, respectivamente, pelos Transformador de Corrente (TC) e Transformador de Potencial (TP), para que seja calculada a impedância aparente e posteriormente efetuar a comparação das impedâncias medidas com um valor ajustado para proteção. Esse procedimento viabiliza a identificação se a falta ocorreu dentro dos limites atribuídos para zona de proteção, a qual está dividida em 3 zonas com temporizações e áreas de cobertura distintas, sendo a primeira zona de atuação instantânea, e segunda e terceira com atuação em 0,5 segundos e 1 segundo, respectivamente. Uma visão geral

Tabela 1. Dados da linha de transmissão, compensação série, geração e parâmetros do MOV

Linha de Transmissão	
Comprimento	300 km
Tensão	400 kV
Frequência nominal	50 Hz
Impedância de sequência positiva	$0,315 \Omega/km, 85^\circ$
Impedância de sequência zero	$1,0265 \Omega/km, 75^\circ$
Capacitância de sequência positiva	13 nF/km
Capacitância de sequência zero	8,5 nF/km
Grau de compensação	70%
Localização da compensação série	150 km
Geração - SEA e SEB	
Impedância de sequência positiva	$15 \Omega/km, 85^\circ$
Impedância de sequência zero	$26,6 \Omega/km, 85^\circ$
Parâmetros do MOV	
Tensão de referência	150 kV
Corrente de referência	1 kA
Expoente	23

do sistema é apresentada pela Figura 4, sendo possível identificar todo sistema de proteção, ampliado na Figura 5, juntamente com geração e linha de transmissão.

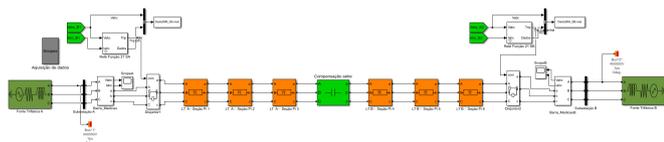


Figura 4. Modelo desenvolvido para o estudo no ambiente Simulink

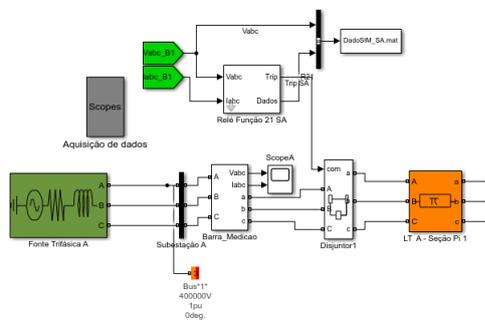


Figura 5. Representação ampliada do sistema de proteção no ambiente Simulink

Para a simulação do curto-circuito no SEP, é inserido um bloco pré-definido de falta trifásica, com impedância de falta de $0,1 \Omega$, alocada à distância de 250 km da subestação A, juntamente com um bloco de degrau para inserção externa do tempo de aplicação da falta conforme Figura 6, em que o tempo é previamente definido como $0,5$ segundos.

A definição dos parâmetros do relé de impedância é realizada observando-se os valores de impedância aparente para o sistema em funcionamento sem aplicação de curto-circuito, deste modo, consegue-se estimar a impedância correspondente à linha de transmissão completa. Durante a simulação para definição dos dados, a medição da impedância aparente na SE A afere o valor de 86Ω e na SE B o valor de 92Ω . Para o ajuste do relé ANSI 21

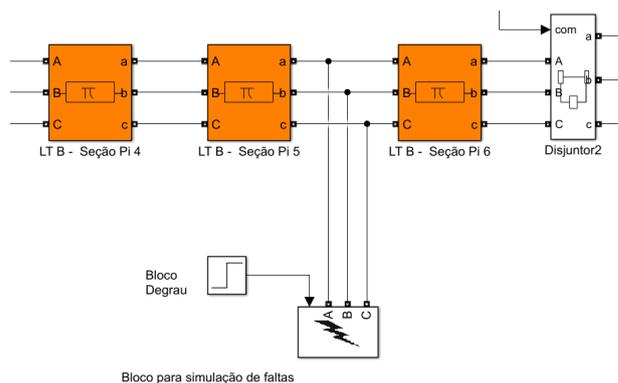


Figura 6. Bloco para aplicação de curto-circuito inserido no local da falta

os valores da impedância escolhidos para as simulações é de cerca de 85% do valor encontrado anteriormente para primeira zona de proteção, e para os setores seguintes o valor atribuído corresponde ao total da impedância para cada lado das subestações, representando dessa forma o comprimento acumulado, conferindo proteção para toda a linha de transmissão. Dessa forma, é possível examinar a impedância aparente lida pelos transformadores de instrumentação nas duas subestações, permitindo a configuração do valor da impedância de ajuste das zonas de atuação do relé de distância.

Nas simulações, será aplicado um curto-circuito trifásico-terra em todas as ocasiões utilizando-se o bloco específico para faltas. Na simulação inicial, o funcionamento do sistema juntamente com o sistema de proteção é observado e são descritas as suas características.

3.1 Avaliação da qualidade de energia

Para avaliação da qualidade de energia, o sistema será modificado com a inserção de fontes de corrente com a finalidade de acrescentar distorções harmônicas no sistema para avaliação do funcionamento dos relés de proteção quando as não-linearidades impostas pela injeção de corrente são consideradas no sistema estudado. Os parâmetros das fontes de corrente adicionais serão configurados para as seguintes frequências: 45 Hz , 250 Hz e 350 Hz com amplitude de 2 A . A Figura 7 representa a localização dessas fontes harmônicas no sistema, simbolizadas por A1, A2 e A3.

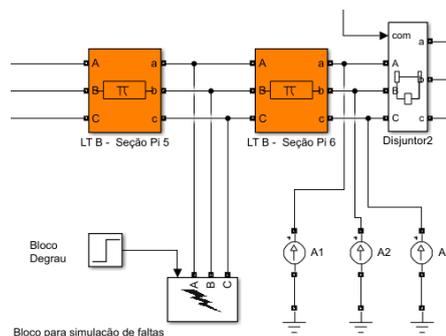


Figura 7. Localização das fontes harmônicas no ambiente Simulink

Com a inserção das fontes de corrente para distorção harmônica para os estudos, faz-se necessária a adição de uma resistência de valor desprezível para que não altere o circuito em uma das fases do sistema possibilitando a incorporação do bloco pré-definido *Impedance Measurement*, o qual é possível realizar medições específicas com a utilização do bloco *powergui - Continuous*. Esse elemento permite também a análise de fasores e do desequilíbrio entre as fases e computar alguns parâmetros de qualidade de energia.

O sistema completo simulado no ambiente Simulink está representado pela Figura 8.

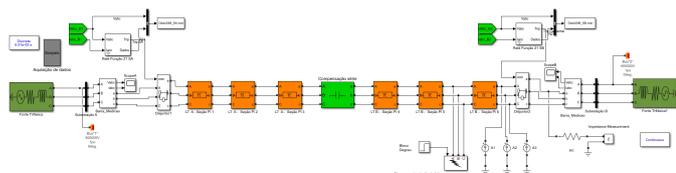


Figura 8. Sistema simulado com fontes de distorção no ambiente Simulink

4. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Após o SEP estar modelado no ambiente Simulink e com todas as alterações essenciais realizadas para o estudo efetivo da qualidade de energia e da análise da atuação dos relés de proteção, as avaliações serão divididas nos seguintes casos de estudo:

- (i) Fontes trifásicas, SE A e SE B na frequência fundamental de 50 Hz sem adição de distorção harmônica;
- (ii) Fontes trifásicas em 50 Hz com harmônicos;
- (iii) Fontes trifásicas em 53 Hz com harmônicos;
- (iv) Fontes trifásicas em 47 Hz com harmônicos;
- (v) Fontes trifásicas em 47 Hz sem harmônicos;
- (vi) Fontes trifásicas em 46 Hz com harmônicos;
- (vii) Fontes trifásicas em 46 Hz sem harmônicos;
- (viii) Fontes trifásicas em 50 Hz com alto valor de distorção harmônica;
- (ix) Fontes trifásicas em 47 Hz com alto valor de distorção harmônica;
- (x) Fontes trifásicas em 53 Hz com alto valor de distorção harmônica;
- (xi) Avaliação da medição de impedância.

Para os resultados obtidos no presente trabalho através das simulações do SEP modelado no ambiente Simulink, serão apresentados os resultados gerais para todos os casos estudados e as análises para os casos mais relevantes.

4.1 Fontes trifásicas em 46 Hz com harmônicos

A frequência da geração será alterada para uma sub-frequência de 46 Hz nessa análise e os resultados iniciais obtidos são apresentados pelas Figuras 9 e 10, representando os resultados de tensão pelo gráfico superior, e os resultados das correntes no gráfico em posição subsequente por figura para as subestações A e B, respectivamente. É possível notar que houve atuação do relé de proteção na subestação A como pode ser verificado na Figura 9, em que o gráfico localizado na parte inferior da imagem representa

a corrente na SE A, essa constatação pode ser feita uma vez que o valor de corrente atingiu abruptamente o valor zero indicando desconexão do sistema pelos disjuntores comandados pelos relés de código ANSI 21, ressalta-se que o sistema de proteção atua com envio de *trip* por parte do relé para abertura do disjuntor.

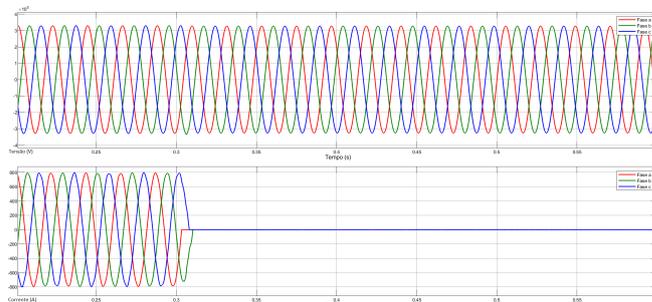


Figura 9. Tensão e corrente na SE A para 46 Hz com harmônicos

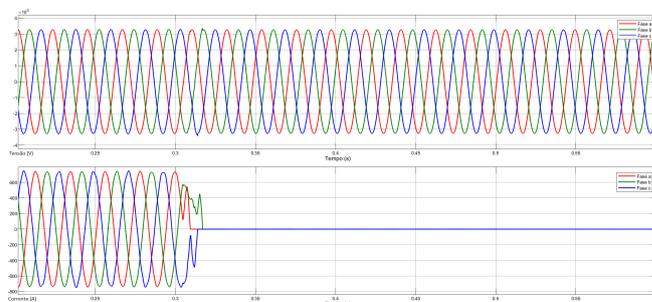


Figura 10. Tensão e corrente na SE B para 46 Hz com harmônicos

A atuação da proteção ocorre no instante igual a 0,310s para a SE A e 0,317s na SE B, entretanto a aplicação do curto-circuito nas simulações está configurada para ocorrer em 0,5s, dessa forma, o sistema de proteção atua sem a presença de uma falha, indicando funcionamento errôneo do relé de distância quando o sistema elétrico estudado é submetido à uma subfrequência de 46 Hz.

4.2 Fontes trifásicas em 46 Hz sem harmônicos

A fim de avaliar o funcionamento do sistema em sub-frequência sem a presença de fontes não-lineares, as fontes de injeção de corrente foram retiradas para o caso estudado em questão, e o curto-circuito foi aplicado no tempo igual a 0,5s. As Figuras 11 e 12 representam a tensão e corrente para as SE A e SE B, respectivamente.

O resultado obtido nesse caso de estudo foi diferente ao caso estudado na seção anterior pelo fato de não ocorrer uma falha na atuação da proteção, em que a proteção atua corretamente no tempo 0,514s para a SE A e no tempo 0,518s para a SE B. Dessa forma, conclui-se que para subfrequência de 46 Hz o sistema de proteção não possui confiabilidade apenas quando é submetido à inserção de fontes harmônicas, para o caso de estudo em questão o sistema de proteção continua íntegro.

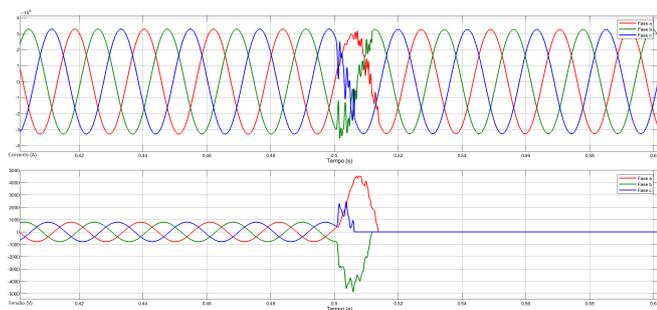


Figura 11. Tensão e corrente na SE A para 46 Hz sem harmônicos

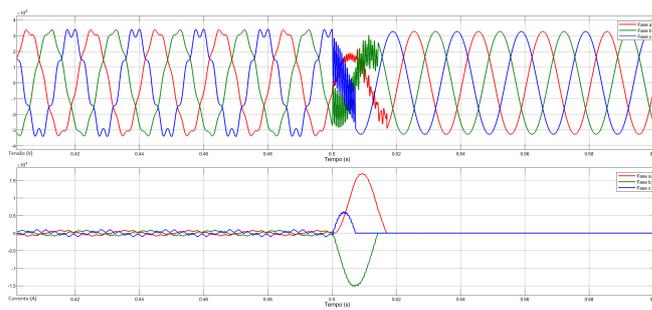


Figura 14. Tensão e corrente na SE B para 50 Hz com alto valor de distorção harmônica

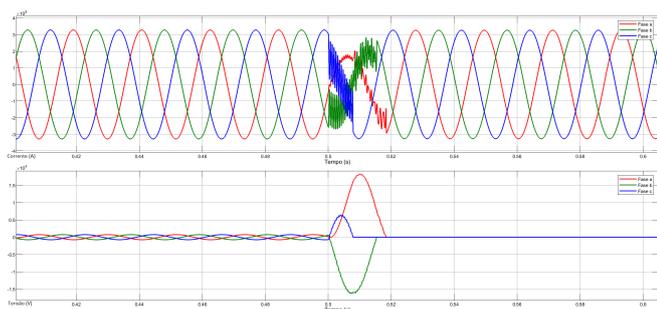


Figura 12. Tensão e corrente na SE B para 46 Hz sem harmônicos

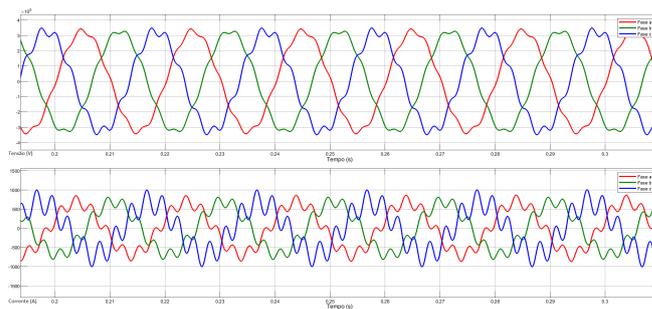


Figura 15. Detalhe da distorção na tensão e corrente da SE A para 50 Hz com alto valor de distorção harmônica

4.3 Fontes trifásicas em 50 Hz com alto valor de distorção harmônica

Com o intuito de averiguar os limites relacionados à qualidade de energia do sistema elétrico de potência estudado, por método empírico a corrente das fontes de inserção de distorções harmônicas foi alterada para 60 A e foi dado seguimento nas simulações. A Figura 13 representa a tensão e a corrente para a SE A e a Figura 14 representa esses mesmos dados para a SE B.

Utilizando o bloco *powergui* do Simulink, é possível extrair excelentes resultados que corroboram a avaliação da qualidade de energia, onde a análise de Fourier, feita pelo *software* vai esclarecer quais componentes harmônicas estão presentes no sinal. A análise da transformada de Fourier é representada pela Figura 16 para a SE A em que o resultado obtido foi o valor de distorção harmônica total (THD, do inglês *total harmonic distortion*) de 5,37% e para a SE B obteve-se o valor de THD de 5,28%. Os resultados encontrados são considerados altos valores de distorção harmônica para linhas de transmissão uma vez que são maiores que 3% conforme descrito em Melo (2022).

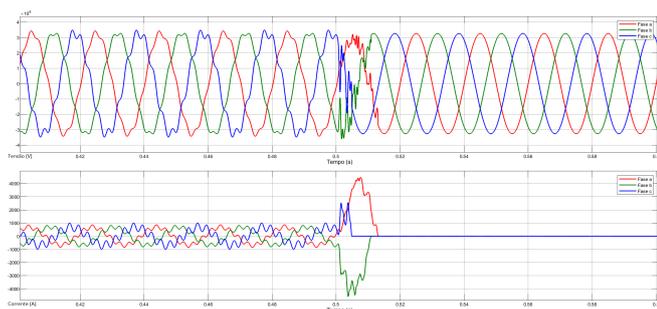


Figura 13. Tensão e corrente na SE A para 50 Hz com alto valor de distorção harmônica

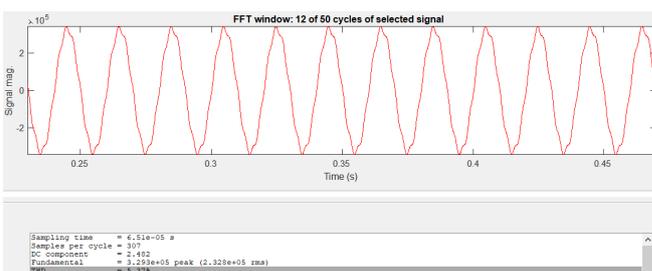


Figura 16. Análise da transformada de Fourier para 50 Hz com alto valor de distorção harmônica

Analisando as Figuras 13 e 14 é possível notar uma distorção bem evidente tanto na tensão quanto na corrente para ambas subestações, em que as formas de onda apresentam deformidades não representando uma senoide perfeita. Mais detalhes são apresentados pela Figura 15, em que uma faixa de tempo da operação do sistema foi ampliada para que o detalhamento da distorção seja compreensível. Apesar das distorções, o sistema de proteção se manteve íntegro para esse caso de estudo.

4.4 Avaliação da medição de impedância

Para esse estudo, a frequência nominal do sistema será configurada para 50 Hz. Com o bloco pré-definido *Impedance Measurement*, apresentado na Figura 7 é possível realizar medições específicas com a utilização do bloco *powergui - Continuous*. Uma análise possível de ser realizada é a avaliação do comportamento da impedância do sistema no domínio da frequência. A Figura 17 representa o gráfico

Impedância x Frequência, em que é possível notar dois pontos destacados; um na frequência de 354 Hz e o outro na frequência de 722 Hz, os quais a impedância tem seu valor muito elevado indicado por pontos de ressonância proeminentes no sistema elétrico de potência. Então, se o sistema for excitado com valores de frequência próximos à esses valores destacados pode-se ocasionar um ponto de ressonância que aumente demasiadamente a distorção harmônica do sistema.

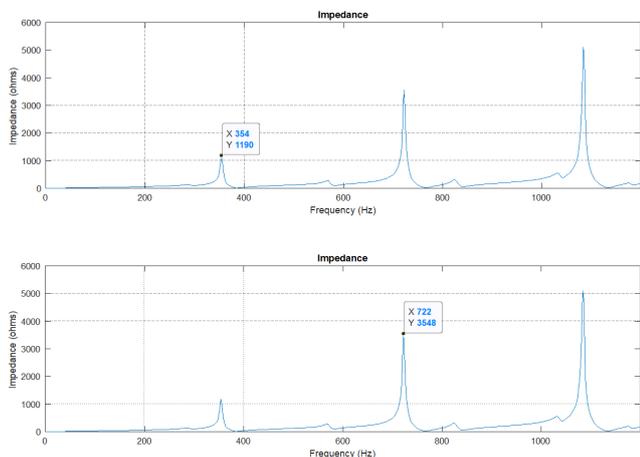


Figura 17. Pontos de ressonância da impedância

Para análise dessas condições, as fontes de injeção de corrente serão configuradas com as seguintes frequências: 45 Hz, 360 Hz e 720 Hz, sendo próximos dos valores destacados na Figura 17 e para a amplitude, o valor de 15 A, sendo muito inferior ao valor de 60 A para o caso apresentado na seção anterior.

O valor de THD para a SE A é igual a 5,12% e para a SE B, o valor encontrado é de 5,29%. Sendo assim, devido à excitação em frequências específicas na fonte de injeção de corrente foi ocasionada uma alta distorção no sistema para ambas subestações, mesmo para menores valores de corrente.

4.5 Representação geral dos resultados

Todos resultados obtidos nos casos de estudo apresentados anteriormente, relativos ao tempo de atuação de proteção para as subestações A e B foram agrupados na Tabela 2 para melhor visualização.

Tabela 2. Tempo de atuação da proteção

Caso estudado	Subestação	
	SE A	SE B
(i) 50Hz sem harmônicos	0,513 s	0,517 s
(ii) 50Hz com harmônicos	0,513 s	0,517 s
(iii) 53Hz com harmônicos	0,513 s	0,517 s
(iv) 47Hz com harmônicos	0,513 s	0,518 s
(v) 47Hz sem harmônicos	0,513 s	0,518 s
(vi) 46Hz com harmônicos	0,310 s	0,317 s
(vii) 46Hz sem harmônicos	0,514 s	0,518 s
(viii) 50Hz com injeção de 60A	0,513 s	0,517 s
(ix) 47Hz com injeção de 60A	0,513 s	0,476 s
(x) 53Hz com injeção de 60A	0,513 s	0,516 s
(xi) 50Hz com injeção de 15A	0,513 s	0,517 s

Com a análise do tempo de atuação dos relés de proteção, é possível observar que houve uma inconformidade do sistema de proteção para frequências mais baixas em relação à frequência nominal do sistema. Para outros valores de frequência, o sistema teve o comportamento conforme esperado para atuação dos relés, ANSI 21, mesmo quando submetidos à distorções harmônicas.

A Tabela 3 representa os valores da THD em porcentagem, obtidos nas simulações de todos os casos estudados, dispostos em ordem de execução de acordo com este presente trabalho. Nota-se valores de THD baixos para as diferentes situações as quais os sistemas foram submetidos, nos casos de 1 a 7. Para os casos de 8 a 10, devido a inserção de fontes harmônicas com um alto valor de corrente, o sistema apresentou valores elevados de distorção harmônica total, para o caso de estudo 11, devido à sensibilização em frequências específicas, o sistema respondeu com um elevado valor de THD para um valor mais baixo de corrente aplicado pelas fontes harmônicas em relação aos casos de imediatamente anteriores.

Tabela 3. Distorção harmônica total (THD)

Descrição simplificada	THD	
	SE A	SE B
(i) 50Hz sem harmônicos	0,17%	0,17%
(ii) 50Hz com harmônicos	0,17%	0,17%
(iii) 53Hz com harmônicos	0,05%	0,05%
(iv) 47Hz com harmônicos	0,18%	0,18%
(v) 47Hz sem harmônicos	0,02%	0,02%
(vi) 46Hz com harmônicos	0,46%	0,80%
(vii) 46Hz sem harmônicos	0,09%	0,09%
(viii) 50Hz com injeção de 60A	5,37%	5,28%
(ix) 47Hz com injeção de 60A	5,40%	5,31%
(x) 53Hz com injeção de 60A	5,36%	5,28%
(xi) 50Hz com injeção de 15A	5,12%	5,29%

5. CONCLUSÕES

Apesar da variação de frequência no sistema e a presença de distorções harmônicas, representados pelo THD, afetarem pouco a atuação do relé, é possível notar diferenças entre os tempos de atuação dos relés de proteção.

O sistema simulado foi afetado com a presença de distúrbios harmônicos uma vez que ocorreu a atuação da proteção e houve um elevado valor de distorção harmônica total. Para a subfrequência de 46 Hz esse sistema de proteção possui baixa confiabilidade devido ao fato de que quando foi submetido à distorções harmônicas há atuação indevida dos relés de proteção em razão de se esperar que o relé atue apenas quando solicitado. Já em condições normais de operação nessa frequência, sem adição de harmônicos, a proteção atua de forma correta. Tal comportamento reforça a desarmonia entre os tempos de atuação do sistema de proteção para o SEP estudado para a condição de subfrequência.

Com a inserção das fontes de corrente, as quais adicionam não-linearidades ao sistema, fica evidente a diferença da sensibilidade da rede elétrica quando as correntes são injetadas em uma frequência específica. Tal desproporção ressalta a importância da avaliação da impedância do sistema uma vez que um valor muito menor de corrente,

representando cerca de 25% do valor a qual o sistema foi submetido nos casos 8,9 e 10, foi possível encontrar valores próximos de THD no caso 11. Dessa forma, é necessário analisar a condição de ressonância a que o sistema será submetido.

Como existe uma escassez de artigos que abordem o tema, este trabalho se torna extremamente essencial para o entendimento do impacto das distorções harmônicas e qualidade de energia no funcionamento de linhas de transmissão e sua proteção. Apesar de poucos estudos serem efetuados sobre o mesmo, é extremamente urgente averiguar a temática devido à introdução de novas cargas e fontes alternativas de energia que certamente culminam no aparecimento de distúrbios de qualidade de energia.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o apoio financeiro à CAPES, CNPq e UFJF (Universidade Federal de Juiz de Fora).

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

REFERÊNCIAS

- Chang, M., Thellufsen, J.Z., Zakeri, B., Pickering, B., Pfenninger, S., Lund, H., and Østergaard, P.A. (2021). Trends in tools and approaches for modelling the energy transition. *Applied Energy*, 290, 116731.
- Dugan, R.C., McGranaghan, M.F., Santoso, S., and Beaty, H.W. (2012). *Electrical Power Systems Quality*. McGraw-Hill.
- EPE (2011). Balanço energético nacional 2011. Empresa de Pesquisa Energética.
- EPE (2021). Balanço energético nacional 2021. Empresa de Pesquisa Energética.
- Kagan, N. (2009). *Estimação de indicadores de qualidade da energia elétrica*. Blucher.
- Kojovic, L. and Hassler, S. (1997). Application of current limiting fuses in distribution systems for improved power quality and protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 12(2), 791–800.
- Martinez, J.A. and Martin-Arnedo, J. (2009). Impact of distributed generation on distribution protection and power quality. In 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 1–6. IEEE.
- Mathworks (2021a). Matlab. <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
- Mathworks (2021b). Simulink. <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>.
- Melo, I.D.d. (2022). *Estimação de estados: uma abordagem sistêmica sobre qualidade de energia*. Blucher.
- Pereira, J., Melo, I., de Oliveira, B., Variz, A., Antunes, M., de Souza, M., Mingorança, J., Junior, E., Fávares, A., and Passos, L. (2020). Análise do impacto da qualidade de energia na operação de relés de proteção utilizando simulações digitais em tempo real. In 2020 Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE). Sociedade Brasileira de Automática (SBA).
- Saha, M.M., Kasztenny, B., Rosolowski, E., and Izykowski, J. (2011). First zone algorithm for protection of series compensated lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 16(2), 200–207.
- Saha, M.M., Rosolowski, E., Izykowski, J., and Pierz, P. (2016). Evaluation of relaying impedance algorithms for series-compensated line. *Electric Power Systems Research*, 138, 106–112.
- Soares, Í.N., Gava, R., and de Oliveira, J.A.P. (2021). Political strategies in energy transitions: Exploring power dynamics, repertoires of interest groups and wind energy pathways in Brazil. *Energy Research & Social Science*, 76, 102076.