

Análise do impacto da qualidade de energia na operação de relés de proteção utilizando simulações digitais em tempo real

José L. R. Pereira* Igor D. Melo* Bráulio C de Oliveira*
 Abílio M. Variz* Matheus P. Antunes*
 Matheus A. de Souza* Jeanderson S. Mingorança*
 Éden L. C. Junior** Alexandre D. Fávoro**
 Luis F.N. Passos***

* Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), MG, (e-mails: jluiz@ieee.org, igor.delgado2008@engenharia.ufjf.br, braulio.oliveira@engenharia.ufjf.br, abilio.variz@ieee.org, matheus.antunes@engenharia.ufjf.br, matheusalb@gmail.com, jeanderson.mingoranca@engenharia.ufjf.br).

** TBE (Transmissoras Brasileiras de Energia) (e-mail: ejunior@tbe.com.br, adegan@tbe.com.br)

*** Idea Soft Tecnologia Ltda, Florianópolis, Santa Catarina - Brasil (e-mail: luis@documentta.com.br)

Abstract: In this paper, real-time digital simulations using Real Time Digital Simulator (RTDS) are conducted to evaluate the impact of power quality problems on the operation of a relay and its zones of protection. Frequency variations, voltage sags and harmonic distortions are considered to investigate the performance of the protection system of a Brazilian transmission line. Results obtained from power hardware in the loop simulations (PHIL) show the impact of power quality issues on the relay operation using a transmission system model and a commercial relay, parameterized with distance function. Both performance and operation of the relay in different zones of protection are evaluated by statistical analysis.

Resumo: Neste artigo, simulações digitais em tempo real usando RTDS (*Real Time Digital Simulator*) são conduzidas com o objetivo de avaliar o impacto de problemas de qualidade de energia na operação de um relé e suas zonas de proteção. Variações de frequência, afundamentos de tensão e distorções harmônicas são considerados para se averiguar atuações diferentes do sistema de proteção de uma linha de transmissão brasileira. Os resultados obtidos atestam, de maneira prática, como a qualidade de energia pode levar o sistema de proteção a atuar de maneira diferente utilizando simulações PHIL (power-hardware-in-the-loop) baseando-se no modelo do sistema de transmissão e um relé comercial, parametrizado com função de distância. O desempenho e operação do relé em diferentes zonas de proteção são avaliados através de análises estatísticas.

Keywords: power quality; real time digital simulations; protection systems; transmission lines; harmonic distortion.

Palavras-chaves: qualidade de energia; simulação digital em tempo real; sistemas de proteção; linhas de transmissão; distorções harmônicas.

1. INTRODUÇÃO

Pesquisas relacionadas à qualidade de energia elétrica e sua degradação se tornam cada dia mais relevantes devido à alta penetração de fontes renováveis de energia solar e eólica, cargas não lineares e equipamentos de eletrônica de potência. Distúrbios como distorções harmônicas, variações de tensão e frequência de longa/curta duração se tornam cada vez mais frequentes, sendo necessário avaliar os impactos gerados por esses fenômenos na operação de sistemas elétricos de potência segundo Sharma et al. (2018) e de Melo et al. (2019). Neste contexto, destacam-se conseqüências como mau funcionamento de sistemas de prote-

ção e controle; aumento de perdas elétricas e temperatura em enrolamentos de máquinas, ressonância ferromagnética e perda de vida útil de equipamentos eletrônicos de acordo com Benjamin (2018).

A fim de detectar anomalias em redes elétricas, relés de proteção são comumente usados para verificar situações de faltas que resultem em extrapolações de valores limítrofes de corrente, tensão e frequência os quais devem ser monitorados pelo sistemas de proteção existente. Dessa forma, o relé é responsável por enviar um comando para que haja a abertura dos disjuntores, resultando na interrupção de transporte de energia no circuito protegido. Tal operação

pode resultar na indisponibilidade de linhas de transmissão segundo Djuric et al. (1998) e Sidhu et al. (2004), o que acarreta em prejuízos para as empresas responsáveis pelos ativos do sistema elétrico.

Relés com função de distância (código ANSI 21) são bastante empregados na proteção de linhas de transmissão. Tipicamente, o elemento instantâneo cobre 80% do valor de impedância da linha, sendo os 20% restantes cobertos por um elemento temporizado o qual é coordenado com o relé no outro terminal desta linha. Assim, determina-se ao menos duas zonas de proteção para uma determinada linha de transmissão segundo Sidhu et al. (2004).

A fim de melhorar os esquemas de proteção, é comum também serem adotados sistemas de tele-proteção. É fundamental que as vias de comunicação desse tipo de proteção tenham como características confiabilidade e velocidade. Tem-se como exemplos o fio piloto, onda portadora (*carrier*), microondas e fibra ótica. Nestes esquemas, através de canais de comunicação, há troca de informação mútua entre os relés situados nos terminais da linha com o objetivo de proteger 100% da mesma.

Fenômenos relacionados à qualidade de energia podem impactar significativamente a operação do sistema de proteção segundo Jedrzejczak et al. (2016). Isso pode comprometer a estabilidade desses sistemas resultando na indisponibilidade de linhas de transmissão. Além disso, erros de zona de proteção podem ocorrer, sendo caracterizados como *tripping* intempestivos.

Este artigo almeja avaliar o desempenho de um relé com função de proteção de distância considerando o impacto de distúrbios de qualidade de energia em sua operação em tempo real. Simulações são conduzidas baseadas em testes *power-hardware-in-the-loop* (PHIL) conduzidos no RTDS (*Real Time Digital Simulator*) utilizando um relé comercial parametrizado com função de distância.

Uma linha de transmissão com compensação série é modelada no software do RTDS denominado RSCAD, sendo a mesma localizada na região norte do Brasil, no estado do Pará. Essa conecta duas subestações: Vila do Conde e Castanhal. A operação do relé situado em Vila do Conde é verificada através de simulações em tempo real no intuito de verificar o impacto de distorções harmônicas, desvios de frequência e afundamentos de tensão nas zonas de proteção do mesmo. Análises estatísticas são utilizadas para se apresentar os resultados.

A subestação de Vila de Conde é responsável por atender siderúrgicas na região do estado do Pará. Como é discutido na literatura, os fornos a arco das indústrias siderúrgicas são usualmente causadores de afundamentos de tensão e introdução de outros problemas de qualidade de energia como discutido em Uz-Logoglu et al. (2019). Tal fato justifica as análises e o foco deste artigo.

Este artigo é dividido em cinco seções além desta de caráter introdutório. Na seção 2, discute-se sobre o RTDS e a forma de condução das simulações. Na seção 3, apresentam-se os dados da linha de transmissão utilizada no estudo. Resultados de simulação são apresentados na seção 4 e as conclusões são detalhadas na última.

2. RTDS (REAL TIME DIGITAL SIMULATOR)

O RTDS é uma ferramenta de simulação utilizada para diversas aplicações em sistemas de potência e controle, sendo a mesma composta por um *hardware* e um *software*, utilizados conjuntamente para testes PHIL (*power-hardware-in-the-loop*).

A simulação PHIL permite testes em tempo real de dispositivos como inversores, relés de proteção e dispositivos de medição em um ambiente controlado antes de serem conectados e instalados em um sistema físico, como discutido por Antunes et al. (2017) e Melo et al. (2019). É possível desenvolver um modelo usando o software RSCAD, representando o sistema real em que o dispositivo físico será conectado. Os sinais de tensão e corrente são externados para o dispositivo pelo uso do hardware RTDS, de acordo com Reis et al. (2018); Melo et al. (2019), responsável pela execução da simulação em até 50 μ s.

O RSCAD fornece uma interface gráfica avançada para o RTDS, sendo composto por vários módulos, incluindo *Draft*, *Runtime*, *T-line/Cables*, *Cbuilder* e *Multiplot*. Uma breve descrição de cada um é fornecida a seguir:

- *Draft*: Este módulo contém uma ampla biblioteca, incluindo modelos de elementos de sistemas de potência, como máquinas elétricas, sistemas de medição, linhas de transmissão/distribuição trifásicas e dispositivos de eletrônica de potência. No *Draft*, um modelo de sistema elétrico pode ser salvo como um projeto, compilado para verificar qualquer erro e, em seguida, ser avaliado por um programa de fluxo de potência incorporado. Também é possível determinar as saídas digitais e analógicas do hardware RTDS, servindo como interface durante a simulação em tempo real;
- *Runtime*: Neste módulo, é possível avaliar em tempo real os sinais de tensão e corrente relacionados ao projeto compilado no ambiente de *Draft*. Também é possível interagir com a simulação criando botões e cursores deslizantes adicionais para simular faltas temporárias e modificar as cargas do sistema, respectivamente. A resposta do sistema pode ser verificada em tempo real;
- *T – line/Cables*: Os respectivos módulos são usados para configurar as propriedades de linhas aéreas de transmissão e cabos subterrâneos, respectivamente. Seus dados são geralmente inseridos usando sua geometria e configuração físicas ou com base em valores de impedância de sequência zero e positiva;
- *Cbuilder*: Esse módulo é usado para modelar e criar novos componentes com base em códigos C escritos pelo usuário para serem integrados ao modelo do *Draft*;
- *Multiplot*: é possível realizar a análise dos resultados capturados e armazenados durante uma simulação, plotando diversos gráficos.

O *hardware* do RTDS consiste em racks nos quais as placas do processador são montadas juntamente com as placas de entrada e saída e as conexões de entrada de energia, permitindo a interface com dispositivos físicos, como equipamentos de medição e relés de proteção. Devido à sua versatilidade, é possível avaliar o comportamento de sistemas e componentes elétricos, considerando vários

tipos de eventos, como faltas, distorções harmônicas e diferentes níveis de carga e tensão, com simulações baseadas em simulações *power-hardware-in-the-loop* (PHIL).

A Figura 1 apresenta as conexões do dispositivo RTDS para as simulações PHIL realizadas neste artigo. Primeiramente, um modelo de software da linha de transmissão é criado no módulo *Draft*, permitindo executar simulações e verificar seu comportamento dinâmico. Quando a simulação é realizada, as tensões e correntes trifásicas coletados nos dois terminais da linha de transmissão são externalizados do hardware RTDS por saídas analógicas (via transdutores de 10 V de tensão de pico). Conforme apresentado na Figura 1, os sinais externalizados são enviados para uma caixa OMICRON CMS156 responsável pela amplificação do sinal analógico enviado aos relés digitais (modelo SEL411L da *Schweitzer Engineering Laboratories*), com função de proteção de distância.

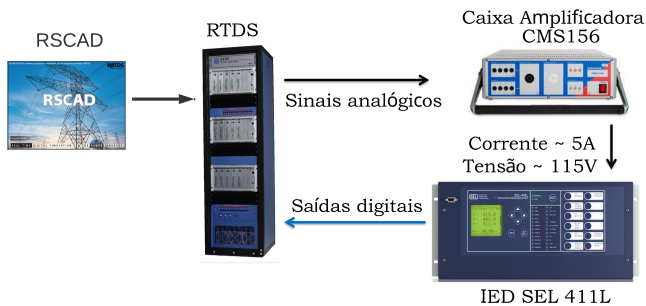


Figura 1. Simulação *Power-hardware-in-the-loop*

Os parâmetros nominais do relé são tensão de 115V, corrente de 5A e uma frequência de 60 Hz.

Quando os relés são sensibilizados, os mesmos enviam um sinal digital de volta para o RTDS, como indicado na Figura 1. Neste caso, os disjuntores incluídos no modelo de simulação são ativados, interrompendo o transporte de energia pela linha de transmissão.

3. DADOS DA LINHA DE TRANSMISSÃO

Para as simulações, é desenvolvido um modelo considerando uma linha de transmissão com compensação série que pertence à empresa TBE (Transmissoras Brasileiras de Energia). A linha de transmissão conecta duas subestações no nível de tensão de 230 kV e tem 130 Km de comprimento. No *software* RSCAD, a linha de transmissão é modelada com base em seus parâmetros reais de impedância de sequência zero e positiva, frequência nominal e resistividade do solo, conforme dados fornecidos pela empresa, apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Dados da Linha de Transmissão

Resistividade do solo	1500 Ω -m
Frequência nominal	60 Hz
Resistência de sequência positiva	0,0436 Ω /km
Reatância ind. de sequência positiva	0,3242 Ω /km
Reatância shunt cap. de sequência positiva	0,196869 mega Ω .km
Resistência de sequência zero	0,4325 Ω km
Reatância ind. de sequência zero	1,5654 Ω /km
Reatância shunt cap. de sequência zero	0,36998 mega Ω .km

Vale ressaltar que existe uma compensação série composta por um banco de capacitores protegido por um MOV

(*Metal Oxide Varistor*) na linha de transmissão em estudo. Os bancos de capacitores em série atuam em uma linha de transmissão reduzindo sua reatância série, aumentando assim a capacidade de fluxo de potência passante nessa linha. Os benefícios desse uso incluem redução de problemas relacionados à estabilidade de tensão, redução de perdas e interrupção do fornecimento de energia como discutido em Sivov et al. (2016).

O MOV, a partir do varistor, atua contra sobretensões sobre o capacitor série segundo Sivov et al. (2016). O reator de amortecimento limita correntes de descarga do capacitor que é resultante do fechamento do *gap* de ar ou do disjuntor em derivação. Em caso do excesso de energia no varistor, o *gap* é disparado. Já o disjuntor em derivação é responsável, em casos de condução de *gap* mais estendida ou outras contingências, por operar de forma automática.

A Tabela 2 apresenta a compensação série de 151 MVar e parâmetros do MOV, calculados para a modelagem da linha de transmissão no software RSCAD.

Tabela 2. Compensação série e parâmetros do MOV

Potência nominal total	151 MVar
Impedância nominal	29,3 Ω
Máxima tensão durante faltas	124,3 kVp
Capacidade de energia nominal do MOV	45,4 MJ
Resistência de amortecimento	1,0 Ω
Indutância de amortecimento	2,0 mH
Resistência série de amortecimento	0,01 Ω

É apresentado na Figura 2 um diagrama unifilar da linha de transmissão modelada no RSCAD, incluindo a compensação série por um banco de capacitores e as subestações em ambos os terminais da linha.

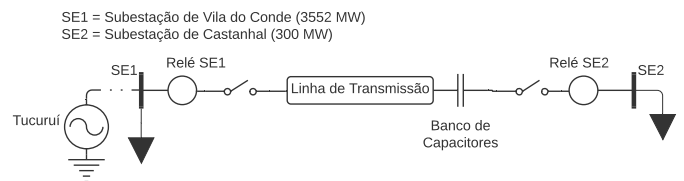


Figura 2. Esquemático da linha de transmissão.

A linha de transmissão sob estudo localiza-se no estado do Pará, na região Norte do Brasil. A usina Hidrelétrica de Tucuruí com capacidade instalada de 8535 MW é responsável pela geração de energia da rede em estudo. O valor máximo de corrente passante pela linha de transmissão é de 1400 A em estado permanente de operação. Conforme é mostrado na Figura 2, as cargas nominais são de 3852 MW em Vila do Conde e de 300 MW em Castanhal.

Através de estudos de curto circuito realizados previamente, foi calculado um valor de corrente para o nível de curto-circuito trifásico em Vila do Conde de 16 kA a partir de um equivalente de Thévenin para impedância de sequência positiva para esta subestação igual a 0,34 Ω para resistência e 8,33 Ω para reatância. A corrente de curto-circuito trifásica para subestação de Castanhal é de 7 kA, com equivalente de Thévenin da impedância de sequência positiva igual a 4,09 Ω para resistência e 19,90 Ω para reatância.

Ressalta-se que 16kA e 7 kA são os níveis de curto-circuito totais das barras. Os valores de impedâncias equivalentes referem-se ao resto sistema elétrico equivalentado nas duas barras nas extremidades da linha de transmissão.

Considerando a configuração e parametrização do relé responsável pela proteção do sistema localizado em Vila do Conde, a primeira zona de proteção, Z1, é determinada com valores de $8,15 \Omega$ para resistência e $1,63 \Omega$ para reatância vista pelo relé. A segunda zona, Z2, é determinada pelos valores de $11,75 \Omega$ para resistência e $10,67 \Omega$ para reatância. Estes dados foram fornecidos pela empresa para permitir um ajuste adequado dos relés no laboratório.

Na prática, quanto mais severa for a corrente de curto, menor será a impedância calculada pelo relé de proteção, fazendo-o atuar de maneira a proteger a linha. Desta forma, para valores de impedância altos enxergados pelo relé, o mesmo tende a atuar em Z2, enquanto para valores mais baixos de impedâncias, a atuação seria em Z1.

Tal parametrização foi configurada através de dados fornecidos pela empresa responsável pela linha e o relé utilizado nas simulações foi parametrizado segundo esta configuração a fim de permitir uma simulação realista e próxima dos parâmetros encontrados em campo e na prática.

4. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

A fim de se avaliar a ocorrência de afundamentos de tensão na subestação de Vila do Conde e sua relação com o desempenho do relé, considera-se curtos-circuitos trifásicos nessa subestação. As magnitudes dos afundamentos são controladas através de valores de impedância de curto.

Em todas as situações, o objetivo é determinar o valor mínimo da magnitude do afundamento de tensão para o qual o relé começa a atuar em cada uma das zonas de proteção Z1 e Z2.

Para se avaliar a atuação na zona Z1, assume-se valores de impedância excursionando de $10,5 \Omega$ a $13,5 \Omega$, com incrementos regulares de $0,1 \Omega$. Através de testes exaustivos, estes valores foram escolhidos por resultarem na operação do relé nesta zona de proteção, uma vez que os valores de impedância calculados pelo relé considerando o curto e o resto do sistema caem dentro da faixa de valores parametrizados para esta zona.

Para se avaliar a atuação na zona Z2, considerou-se valores de impedância do curto excursionando de 17Ω a 20Ω , também com incrementos regulares de $0,1 \Omega$.

Para cada valor de impedância, é realizada a mesma simulação por dez vezes para obtenção de amostragem suficiente que permita realizar inferências estatísticas sobre os resultados. Portanto, é obtido um total de 310 amostras para cada caso de simulação.

Foram avaliadas diferentes situações envolvendo desvios de frequência de $(60 \pm 1,5)$ Hz e o impacto da distorção harmônica na operação do relé. Todos os testes pressupõem operação em regime permanente do sistema de operação. Na Tabela 3 são mostrados os valores de DFD (Desempenho da Frequência em Distúrbios) e seus respectivos tempos acumulados máximos de exposição aos desvios de frequência em segundos, segundo o submódulo 2.8 do ONS

(Gerenciamento dos indicadores de qualidade da energia elétrica da Rede Básica).

Tabela 3. Limites para avaliação do desempenho da frequência durante distúrbios.

DFD	Tempo acumulado (s)
$f > 66$ Hz	0
$63,5\text{Hz} < f \leq 66,0$ Hz	30
$62\text{Hz} < f \leq 63,5$ Hz	150
$60,5\text{Hz} < f \leq 62$ Hz	270
$58,5\text{Hz} \leq f < 59,5$ Hz	390
$57,5\text{Hz} \leq f < 58,5$ Hz	45
$56,5\text{Hz} \leq f < 57,5$ Hz	15
$f < 56,5$ Hz	0

4.1 Operação na Zona de Proteção Z1

Os resultados para os casos de operação na zona de proteção Z1 são mostrados nesta subseção. Na Figura 3, são exibidos os resultados dos valores da magnitude do afundamento de tensão para o qual o relé começa a atuar dentro desta zona, através do uso de boxplots e histogramas. Pode-se perceber uma dispersão estatística com média central e um desvio padrão a ser calculado. Além disso, percebe-se uma distribuição Gaussiana associada aos resultados de simulação evidenciada pelos histogramas.

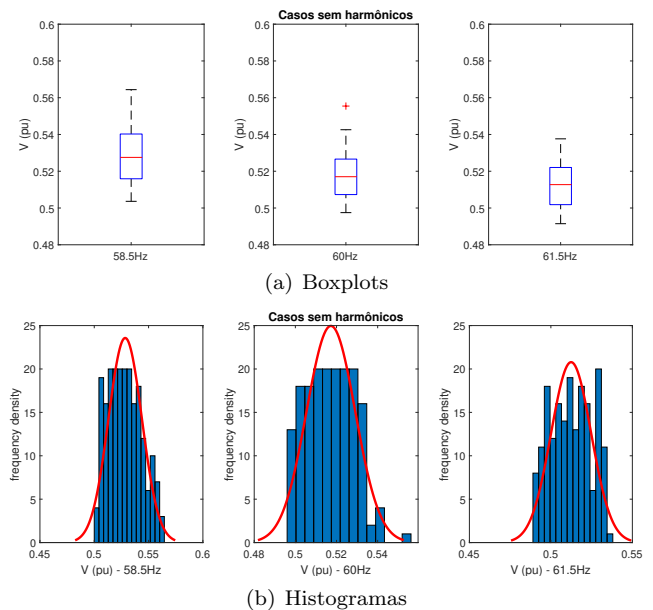


Figura 3. Boxplots e histogramas para Z1 considerando 58,5, 60 e 61,5 Hz (sem distorção harmônica).

Nota-se, ainda, que a operação do relé é modificada de acordo com o valor de frequência do sistema. Se este opera em sub-frequência (58,5 Hz) os valores de tensão para os quais o mesmo começa a atuar em Z2 estão entre os valores de $[0,5051; 0,5607]$ pu. Para o caso com sobre-frequência (61,5 Hz), no intervalo $[0,4901; 0,5387]$ pu.

Já neste primeiro caso de simulação, pode se observar uma mudança de operação e desempenho do relé dependendo da frequência de operação do sistema em regime permanente.

Na Figura 4, a mesma análise é realizada. Porém, a existência de distorção harmônica foi considerada na subestação de Vila do Conde. Tensões harmônicas de terceira, quinta e sétima ordem foram consideradas iguais a 0,04, 0,03 e 0,02 pu, resultando em um THD (*Total Harmonic Distortion*) médio de 5%. Estes valores foram adotados após inspeção de valores medidos reais na subestação correspondente fornecidos pela empresa.

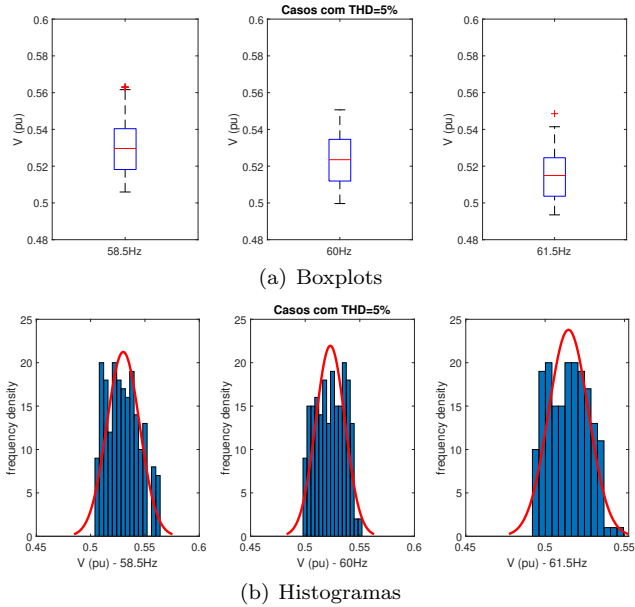


Figura 4. Boxplots e histogramas para Z1 considerando 58,5, 60 e 61,5 Hz (com distorção harmônica).

Para realizar um estudo comparativo entre os casos sem e com distorção harmônica, métricas estatísticas foram utilizadas, como mostrado respectivamente pelas Tabelas 4 e 5, em que a média, desvio padrão e mediana são calculadas para cada caso de simulação e cada frequência.

Tabela 4. Atuação em Z1 sem distorção.

Frequência (Hz)	Métricas estatísticas		
	Média (pu)	σ (%)	Mediana (pu)
58,5	0,5285	1,54	0,5275
60	0,5173	1,18	0,5170
61,5	0,5124	1,23	0,5127

Tabela 5. Atuação em Z1 com distorção.

Frequência (Hz)	Métricas estatísticas		
	Média (pu)	σ (%)	Mediana (pu)
58,5	0,5300	1,51	0,5296
60	0,5230	1,33	0,5235
61,5	0,5147	1,25	0,5149

Nota-se que, quanto maior a frequência de operação do sistema, menor o valor mínimo da tensão para o qual o relé começa a atuar em Z1. Além disso, de maneira comparativa, todos os valores eficazes de tensão calculados para ambas média e mediana nos casos com distorção harmônica são maiores em relação aos valores dos casos sem distorção.

4.2 Operação na Zona de Proteção Z2

Na Figura 5, os valores da magnitude do afundamento de tensão para o qual o relé começa a atuar em Z2, através do uso de boxplots e histogramas, são mostrados.

Simulações contendo distorções harmônicas são mostradas na Figura 6. O mesmo cenário de distorções harmônicas da seção 4.1 é considerado, resultando em um THD médio de 5%.

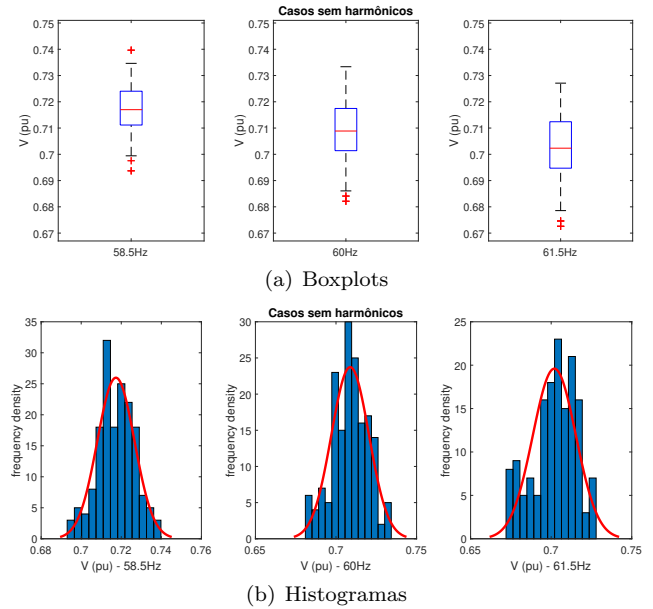


Figura 5. Boxplots e histogramas para Z2 considerando 58,5, 60 e 61,5 Hz (sem distorção harmônica).

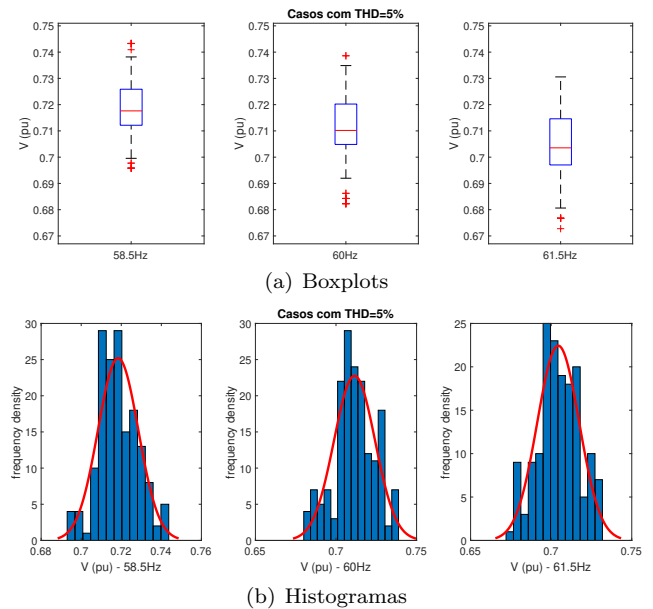


Figura 6. Boxplots e histogramas para Z2 considerando 58,5, 60 e 61,5 Hz (com distorção harmônica).

A fim de comparar os casos sem e com distorção harmônica, métricas estatísticas também foram utilizadas, como mostrado respectivamente pelas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6. Atuação em Z2 sem distorção.

Frequência (Hz)	Métricas estatísticas		
	Média (pu)	σ (%)	Mediana (pu)
58,5	0,7173	0,93	0,7170
60	0,7088	1,16	0,7089
61,5	0,7020	1,34	0,7023

Tabela 7. Atuação em Z2 com distorção.

Frequência (Hz)	Métricas estatísticas		
	Média (pu)	σ (%)	Mediana (pu)
58,5	0,7184	1,01	0,7176
60	0,7115	1,27	0,7102
61,5	0,7044	1,30	0,7035

Os resultados obtidos nesta seção estão em conformidade com os obtidos na seção 4.1. Logo, quanto maior a frequência, menor o valor mínimo da tensão para o qual o relé começa a atuar em Z2. Já no cenário com distorções harmônicas também ocorreu o esperado, assim todos os valores eficazes de tensão calculados para ambas média e mediana nos casos com distorção harmônica são maiores em relação aos valores dos casos sem distorção.

Os desvios padrões das amostragens serem todos menores que 2% indica que a dispersão estatística foi pequena e os resultados encontrados foram mantidos sob a mesma condição de simulação para todos os casos de estudo.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou análises sobre o impacto de fenômenos de qualidade de energia na operação de um relé digital e suas zonas de proteção parametrizadas de acordo com valores reais estabelecidos em campo.

Mediante testes PHIL, afundamentos controlados por valores de impedância de falta foram simulados a fim de avaliar o valor mínimo de tensão para o qual o relé começa a atuar nas suas zonas de proteção.

Conforme esperado, a operação do relé é modificada dependendo de desvios de frequência bem como a presença de distorções harmônicas.

Métricas estatísticas foram utilizadas para comprovar a validade dos testes de simulação e para comparar os estudos de caso realizados de maneira prática.

6. AGRADECIMENTOS

Este projeto é financiado pelo grupo Transmissoras Brasileiras de Energia (TBE) através do projeto de P&D ANEEL “PD-02651-0016/2018 - Desenvolvimento de um sistema de monitoramento de qualidade de energia e tomada de decisões em linhas de transmissão”. Os autores gostariam de agradecer também a CAPES, CNPq, FAPEMIG, INERGE e INESC Brasil.

REFERÊNCIAS

Antunes, M.P., de Melo, I.D., Pereira, J.L.R., de Souza, M.A., and de Lima Silva, N. (2017). Voltage sag detection methods based on synchronized phasor measurements using rtds. In *Industrial Electronics (ISIE)*,

2017 IEEE 26th International Symposium on, 180–185. IEEE.

Benjamin, Ankita, J.S.K. (2018). A review of literature on effects of harmonics on protective relays. In *2018 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia)*, 407–412. IEEE.

de Melo, I.D., Pereira, J.L.R., Duque, C.A., Antunes, M.P., Silva, L.R.M., and de Souza, M.A. (2019). Power quality monitoring using synchronized phasor measurements: An approach based on hardware-in-the-loop simulations. In *2019 IEEE Milan PowerTech*, 1–6. IEEE.

Djuric, M., Radojevic, Z., and Terzija, V. (1998). Distance protection and fault location utilizing only phase current phasors. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 13(4), 1020–1026.

Jedrzejczak, J., Anders, G., Fotuhi-Firuzabad, M., Farzin, H., and Aminifar, F. (2016). Reliability assessment of protective relays in harmonic-polluted power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(1), 556–564.

Melo, I.D., Pereira, J.L., Ribeiro, P.F., Variz, A.M., and Oliveira, B.C. (2019). Harmonic state estimation for distribution systems based on optimization models considering daily load profiles. *Electric Power Systems Research*, 170, 303–316.

Reis, R., Nascimento, J., Costa, C., Barros, D., Lopes, F., Neves, W., Brito, N., and Moraes, S. (2018). Hardware-in-the-loop validation of a protection performance analysis platform. In *2018 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition-Latin America (T&D-LA)*, 1–5. IEEE.

Sharma, A., Rajpurohit, B., and Singh, S. (2018). A review on economics of power quality: Impact, assessment and mitigation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 88, 363–372.

Sidhu, T.S., Baltazar, D.S., Palomino, R.M., and Sachdev, M.S. (2004). A new approach for calculating zone-2 setting of distance relays and its use in an adaptive protection system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(1), 70–77.

Sivov, O., Abdelsalam, H., and Makram, E. (2016). Adaptive setting of distance relay for mov-protected series compensated line considering wind power. *Electric Power Systems Research*, 137, 142–154.

Uz-Logoglu, E., Salor, O., and Ermis, M. (2019). Real-time detection of interharmonics and harmonics of ac electric arc furnaces on gpu framework. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(6), 6613–6623.