

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PEDRO HENRIQUE DE PAULA ALVES

**A INFLUÊNCIA DO SINAL DE RIPPLE CONTROL NA OPERAÇÃO DE RELÉS DE
PROTEÇÃO À DISTÂNCIA**

UBERLÂNDIA

2020

PEDRO HENRIQUE DE PAULA ALVES

A INFLUÊNCIA DO SINAL DE RIPPLE CONTROL NA OPERAÇÃO DE RELÉS DE PROTEÇÃO À DISTÂNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Uberlândia, como item obrigatório definitivo ao título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Carlos Eduardo Tavares

UBERLÂNDIA

2020

PEDRO HENRIQUE DE PAULA ALVES

A INFLUÊNCIA DO SINAL DE RIPPLE CONTROL NA OPERAÇÃO DE RELÉS DE PROTEÇÃO À DISTÂNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Uberlândia, como item obrigatório definitivo ao título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Uberlândia, 11 de dezembro de 2020.

BANCA EXAMINADORA

Carlos Eduardo Tavares (Orientador)

UFU

Luciano Coutinho Gomes

UFU

Arthur Costa Souza

UFU

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade Federal de Uberlândia, pelo curso ofertado de Engenharia Elétrica, em que pude adquirir muito conhecimento e valores essenciais para a minha vida pessoal e profissional.

Aos meus pais, Ismar e Marisa, que durante toda minha vida, sempre estiveram presentes me proporcionando muito apoio e suporte, em todos os meus objetivos e metas.

A todos meus familiares que me incentivaram e ajudaram nessa grande conquista.

Aos meus amigos e colegas de graduação, que estiverem junto comigo na minha trajetória acadêmica, compartilhando grandes momentos de aprendizado.

Aos estudantes de mestrado, Kinan e Zuzana, e ao meu gestor, Petr Toman, que foram de suma importância para o desenvolvimento desse trabalho em meu intercâmbio.

Ao professor Carlos Eduardo Tavares, pela orientação, paciência e suporte para a validação e construção de todo o projeto realizado.

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo analisar o impacto gerado pelo Ripple Control nos relés de proteção à distância, uma vez que essa técnica de remanejamento de carga vem sendo amplamente utilizada no continente europeu. A motivação desse estudo, se dá pelo fato de que esse método é responsável por promover uma distorção inter-harmônica considerável nas linhas de transmissão de energia elétrica, comprometendo os sinais de tensão e corrente do sistema, podendo desencadear falhas de operações desses dispositivos de proteção. Nesse trabalho, são simuladas situações semelhantes as enfrentadas pelas redes de energia e é realizado uma investigação em relação a localização da falta fornecida pelo relé de distância. Além disso, vale ressaltar, que todo o projeto foi desenvolvido em laboratório e as conclusões foram obtidas com base nos resultados disponibilizados pelos equipamentos e softwares utilizados.

Palavras-chave: Ripple Control. Remanejamento de Carga. Relé de Distância. Inter-Harmônicas.

ABSTRACT

This study aims to analyze the impact generated by Ripple Control on distance protection relays, since this load management technique has been widely used in European continent. The motivation for this study is due to the fact that this method is responsible for promoting a considerable interharmonic distortion in the electric power transmission lines, compromising the voltage and current signals of the system, which can trigger failures in the operation of these protection devices. In this work, situations similar to those faced by the power networks are simulated and an investigation is carried out regarding the location of the fault provided by the distance relay. In addition, it is worth mentioning that the entire project was developed in the laboratory and the conclusions were obtained based on the results made available by the equipment's and software's used.

Key-words: Ripple Control. Load Management. Distance Protection Relay. Interharmonic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Remanejamento de Carga	13
Figura 2 – Espectro de frequência de um sinal com frequência de 60 Hz	15
Figura 3 – Relé de proteção a distância instalado em uma linha de proteção	17
Figura 4 – Montagem Experimental	19
Figura 5 – Simulação Computacional PSCAD	20
Figura 6 – Comparação da tensão na fase de ocorrência da falta com/sem RC	23
Figura 7 – Valores rms das componentes harmônicas da tensão sem RC	24
Figura 8 – Valores rms das componentes harmônicas da tensão com RC de 216,66 Hz	25

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros PSCAD	21
Tabela 2 – Fatores de compensações residuais	22
Tabela 3 – Distâncias obtidas com uma janela de tempo de 20 períodos	26
Tabela 4 – Distâncias obtidas com uma janela de tempo de 3 períodos	27
Tabela 5 – Distâncias obtidas variando a resistência de falta	27
Tabela 6 – Distâncias obtidas pelo relé para uma falta na posição de 10 km	28
Tabela 7 – Distâncias obtidas pelo relé para uma falta na posição de 20 km	29
Tabela 8 – Distâncias obtidas pelo relé para uma falta na posição de 30 km	29
Tabela 9 – Distâncias obtidas pelo relé para uma falta na posição de 40 km	29

LISTA DE SIGLAS

DSM	<i>Demand-Side Management</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
PSCAD	<i>Power System Computer-Aided Design</i>
IEDs	<i>Intelligent Electronic Devices</i>
rms	<i>Root Mean Square</i>

LISTA DE ABREVIATURAS

Hz	Hertz
Tc	Transformador de corrente
Tp	Transformador de potencial
DJ	Disjuntor
kV	Quilovolts
km	Quilômetros
MW	Megawatt
MVA	Mega Volt Ampere
Ω	Ohm
RC	<i>Ripple Control</i>
ms	Milissegundos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 Remanejamento de Carga	12
1.2 Inter-Harmônicas	13
1.3 Ripple Control (RC)	15
1.4 Relé de Proteção a Distância	16
2. OBJETIVO	18
3. MONTAGEM EXPERIMENTAL	19
3.1 Procedimentos Experimentais	20
4. RESULTADOS	23
4.1 Análise da Tensão	23
4.2 Distância da falta	25
4.3 Relé de proteção a distância	28
5. CONCLUSÃO	30
REFERÊNCIAS	31

1. INTRODUÇÃO

O sistema elétrico de potência tem a função de disponibilizar energia elétrica aos seus consumidores, com uma boa qualidade e eficiência, assim que for solicitada [1]. Para que essa atribuição seja garantida, é necessário um grande planejamento de todo o processo energético, desde suas fases iniciais produtivas até as finais de utilização.

De forma breve, o fornecimento de energia elétrica pode ser dividido em três principais etapas, geração, transmissão e distribuição. Respectivamente, são responsáveis por sua produção, pelo seu transporte das usinas até os centros de consumo e pela sua distribuição das linhas de transmissão até os consumidores finais [1].

Todo sistema elétrico de potência, em sua fase inicial de projeto, foi planejado para uma determinada demanda de carga que o mesmo consegue atender, ininterruptamente. No entanto, nos últimos anos, é notável que os centros urbanos têm crescido rapidamente e, conseqüentemente, a necessidade de energia elétrica também aumentou.

Com o intuito de garantir a qualidade do serviço energético prestado, o ideal seria que a capacidade de geração fosse sempre capaz de suprir a demanda de energia elétrica. Entretanto, é evidente que em determinados horários do dia, devido a picos de consumo, há uma carência de produção e usinas ineficientes, como as termelétricas e as nucleares, são obrigadas a entrarem em operação para compensar a escassez desse recurso.

Dessa forma, é nesse cenário que técnicas de remanejamento de carga se tornam atrativas ao sistema elétrico de potência.

1.1 Remanejamento de Carga

O remanejamento de carga, também conhecido como *Demand-Side Management* (DSM), pode ser definido como o processo adotado para controlar e ajustar a carga que está conectada à rede de energia elétrica, com o intuito de estabelecer um equilíbrio entre a sua geração e o consumo.

O objetivo dessa prática não é reduzir o fornecimento de energia elétrica, mas, sim, promover mudanças de hábitos da população, visando distribuir melhor a utilização desse recurso ao longo do dia. Dessa forma, os picos de energia diminuirão e, conseqüentemente, as usinas operantes conseguirão atender as demandas.

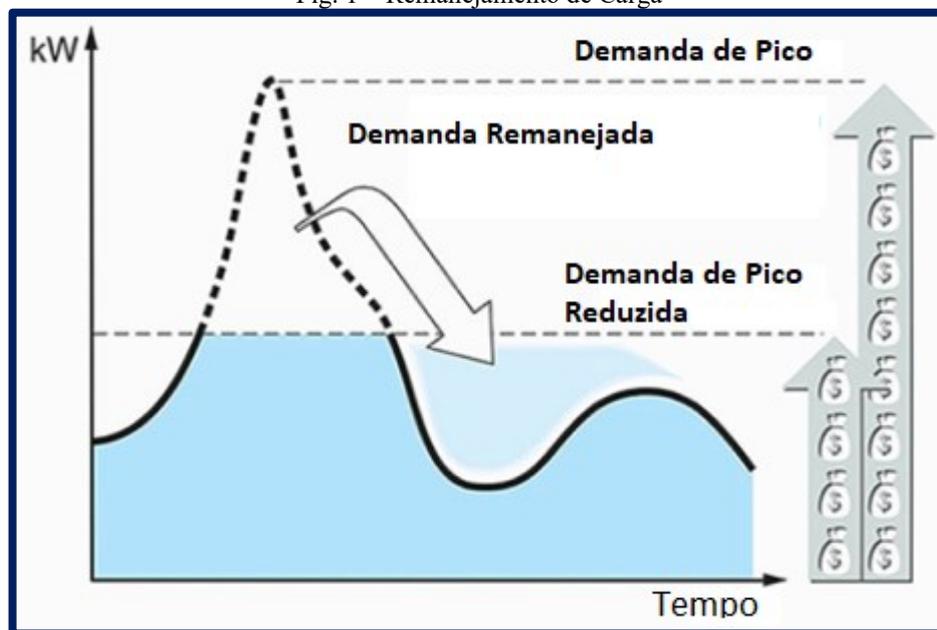
Atualmente, ajustar a carga ativa no sistema elétrico e influenciar o comportamento do consumidor pode ser feito de diversas maneiras pelas concessionárias de energia. Dentre elas,

se destacam o estabelecimento de um regime tarifário especial e a realização de um controle, via rede, capaz de conectar ou desconectar dispositivos a ela.

Essas técnicas tem sido adotadas por vários países, uma vez que aumentar a capacidade de geração de energia é extremamente inviável nessas situações emergências, devido a necessidade de ativação de plantas energéticas que estão em desuso. Além disso, vale ressaltar, que a maior parte dessas usinas são ineficientes, possuem preços operacionais elevadíssimos e causam grandes impactos ambientais.

A figura 1 ilustra uma curva de carga de um determinado sistema e mostra parte da carga dele sendo remanejada para outro horário do dia.

Fig. 1 – Remanejamento de Carga



Fonte: Do autor (2020)

Assim, podemos concluir que na figura 1, uma prática de remanejamento de carga foi adotada, uma vez que o consumo de energia elétrica total desses consumidores não foi alterado, somente melhor distribuído durante o dia. Ademais, em virtude dessa ação, é importante ressaltar, que os custos referentes ao uso desse recurso foram otimizados.

1.2 Inter-Harmônicas

De acordo com a norma IEEE 519-2014, inter-harmônicas podem ser classificadas como qualquer componente de frequência de uma quantidade periódica que não seja um múltiplo inteiro da frequência na qual o sistema de alimentação está operando (50 Hz ou 60 Hz)

[3]. Além disso, sua ordem é determinada pela relação entre sua frequência e a fundamental e, caso este valor seja menor que a unidade, ela pode ser classificada também como uma sub-harmônica [4].

Em um sistema elétrico de potência, há dois mecanismos básicos para a geração de inter-harmônicas. O primeiro deles, ocorre devido a perturbações geradas na rede por cargas que operam, temporariamente, em um regime transitório, produzindo oscilações de intensidade ou de ângulos de fases nas tensões. Já o segundo, é ocasionado em virtude do chaveamento assíncrono de dispositivos semicondutores em conversores estáticos [4].

Ademais, é importante ressaltar, que as inter-harmônicas podem ser transmitidas entre níveis de tensões diferentes, ou seja, o fenômeno manifestado em uma linha de alta tensão pode ser injetado em um sistema de baixa, ou vice versa [4]. Dessa maneira, como toda a rede está interligada, é essencial garantir que a interferência causada por esse parâmetro seja mínima.

Os principais efeitos ocasionados pela presença de inter-harmônicas serão listados logo a seguir:

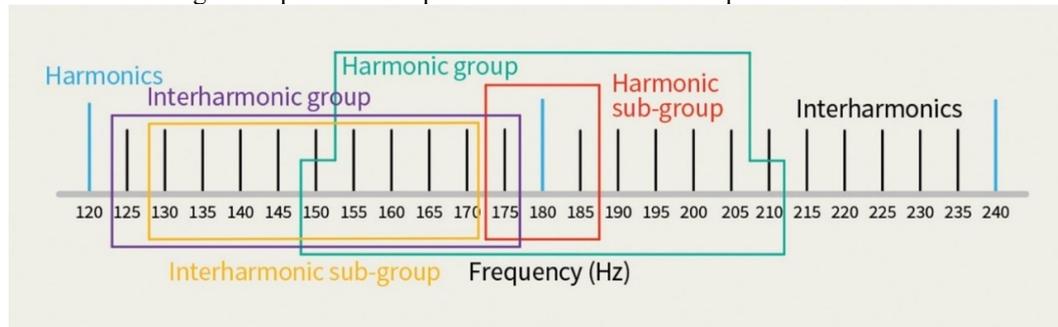
1. Efeitos térmicos;
2. Oscilações de baixas frequências em sistemas mecânicos;
3. Perturbação da operação de lâmpadas fluorescentes e equipamentos eletrônicos;
4. Interferência em sinais de controle e proteção em linhas de alimentação de potência;
5. Sobrecarga de filtros passivos paralelos para harmônicas de ordem mais elevadas;
6. Perturbação acústica;
7. Saturação de transformadores de correntes;
8. *Flicker*.

Recentemente, com o intuito de facilitar a quantificação das distorções inter-harmônicas e minimizar os recursos de memória por parte dos medidores, uma nova técnica foi definida pela IEC 61000-4-7 [5]. Segundo ela, primeiramente, uma Transformada Discreta de Fourier deve ser aplicada ao sinal em análise, com uma janela de 12 ciclos fundamentais de duração para um sistema de 60 Hz ou de 10 ciclos para um de 50 Hz, visando obter um espectro de frequência com resolução de 5 Hz.

Posteriormente, deve ser realizado um método de agrupamento entre os componentes amostrais obtidos. Os grupos a serem divididos são: harmônicos, subgrupos de harmônicos, inter-harmônicas e subgrupos de inter-harmônicas.

A figura 2 ilustra o processo descrito para um sistema de 60 Hz.

Fig 2 – Espectro de frequência de um sinal com frequência de 60 Hz



Fonte: [2]

Desse modo, para obter a magnitude de cada grupo, é necessário calcular a raiz quadrada da soma dos quadrados do valor das componentes individuais pertencentes a esse agrupamento. Feito isso, visando obter a distorção inter-harmônica total, basta realizar a raiz quadrada da soma dos quadrados dos valores obtidos anteriormente de todos os grupos e subgrupos de inter-harmônicas [2].

As equações (1) e (2), ilustram os procedimentos descritos anteriormente.

$$\text{Mag} = \sqrt{\sum_1^n \text{Mag}_{fn}^2} \quad (1)$$

$$\text{DIH}_{\text{total}} = \sqrt{\text{Mag}_{\text{grupo inter-harm}}^2 + \text{Mag}_{\text{sub grupo inter-harm}}^2} \quad (2)$$

Onde Mag é a magnitude de cada agrupamento, Mag_{fn} é a magnitude de suas componentes individuais, $\text{DIH}_{\text{total}}$ é a distorção inter-harmônica total, $\text{Mag}_{\text{grupo inter-harm}}$ e $\text{Mag}_{\text{sub grupo inter-harm}}$, são as magnitudes, calculadas pela equação (1), para os grupos e subgrupos de inter-harmônicas, respectivamente.

1.3 Ripple Control (RC)

O *Ripple Control* (controle de ondulação) é um tipo de técnica para remanejamento de carga que vem sendo bastante utilizada no continente europeu, incluindo na República Tcheca, com o intuito de equilibrar a geração e o consumo de energia elétrica. Além disso, é importante ressaltar, que tal atribuição é garantida através do controle, em tempo real, das cargas

conectadas aos sistemas elétricos.

De forma breve, o princípio de funcionamento dessa prática consiste na transmissão de um sinal, via rede pública de energia, que é capaz de comunicar com dispositivos instalados pela própria população em suas residências. Assim, a partir do momento que esses equipamentos recebem a informação enviada, instantaneamente, um comando é encaminhado aos aparelhos domésticos conectados a eles, determinando se devem permanecer ligados ou desligados.

No sistema elétrico de potência, a propagação desse sinal ocorre pela sua sobreposição em relação a componente fundamental da rede. Assim, pode-se caracterizar essa técnica como uma fonte de distorção inter-harmônica, uma vez que é utilizada uma alta frequência, geralmente na faixa de 100 até 1600 Hz, para a sua transmissão. Contudo, devido a curta duração do evento, não há grandes efeitos prejudiciais em função do seu uso.

Desse modo, devido a facilidade de aplicação desse método e ao alívio de cargas trazido as linhas de energia, essa prática tem sido bastante incentivada pelas concessionárias. Ademais, vale ressaltar, que ela também é bastante vantajosa ao consumidor, visto que parte do seu consumo de energia elétrica, em horários de pico, será transferido para um momento do dia em que o regime tarifário estará mais acessível financeiramente.

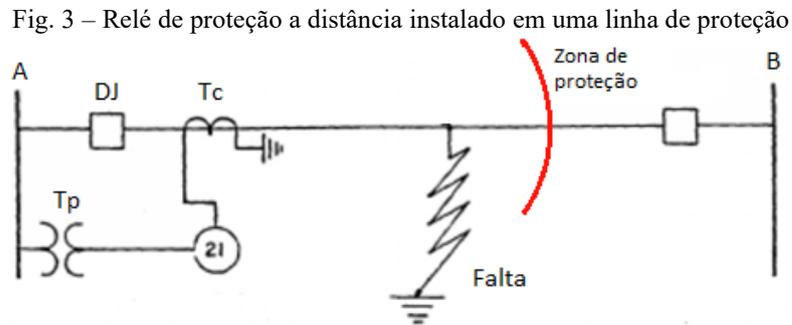
1.4 Relé de Proteção a Distância

Os relés de proteção a distância são dispositivos responsáveis pela proteção de sistemas elétricos. Basicamente, esses equipamentos realizam um monitoramento constante de sinais de tensões e correntes da rede e, a partir deles, identificam se devem ser tomadas medidas preventivas.

Ao longo das linhas de transmissão de energia, em virtude da vasta extensão territorial percorrida por seus cabos condutores, há uma certa dificuldade em garantir que eventos inesperados, como faltas ou curtos-circuitos, sejam identificados e corrigidos eficientemente. Dessa forma, é nesse cenário que os relés de proteção a distância se tornam essenciais, uma vez que além de fornecer a localização exata desse distúrbio, promovem a isolação dessa área.

Ademais, para que a proteção disponibilizada por esse equipamento seja ainda mais eficaz, é importante que vários relés desse tipo sejam instalados em todo o sistema. No entanto, para que tal incumbência seja garantida, é necessário que esses dispositivos estejam corretamente programados e coordenados entre si.

Atualmente, os principais relés de proteção a distância utilizados no mercado são classificados como: impedância, admitância ou reatância. A figura 3, ilustra um relé instalado com a função 21, ou seja, de proteção a distância, em uma linha de transmissão.



Fonte: Adaptado [7] (2020)

Assim, podemos concluir que para a instalação do relé de proteção de distância, é necessário a utilização de um transformador de corrente (Tc) e um de potencial (Tp), que são responsáveis, respectivamente, por fornecer sinais de corrente e tensão ao dispositivo. Dessa forma, quando uma falta é instalada dentro da sua zona de proteção, como exemplificado na figura 3, um comando de abertura deverá ser enviado ao disjuntor (DJ), isolando esse trecho.

2. OBJETIVO

O objetivo desse trabalho de conclusão de curso é realizar um estudo sobre como o sinal de *Ripple Control* influencia o funcionamento do relé de proteção a distância, uma vez que esse dispositivo, sob essa circunstância, estará operando com parâmetros consideravelmente distorcidos.

Geralmente, as magnitudes das inter-harmônicas injetadas na rede por essa técnica de remanejamento de carga variam de 2 a 5 % da mesma componente em relação a fundamental, podendo chegar até a 9 % sob condições de ressonância [4]. Portanto, é evidente que as tensões do sistema elétrico de potência estarão deturpadas nesses instantes.

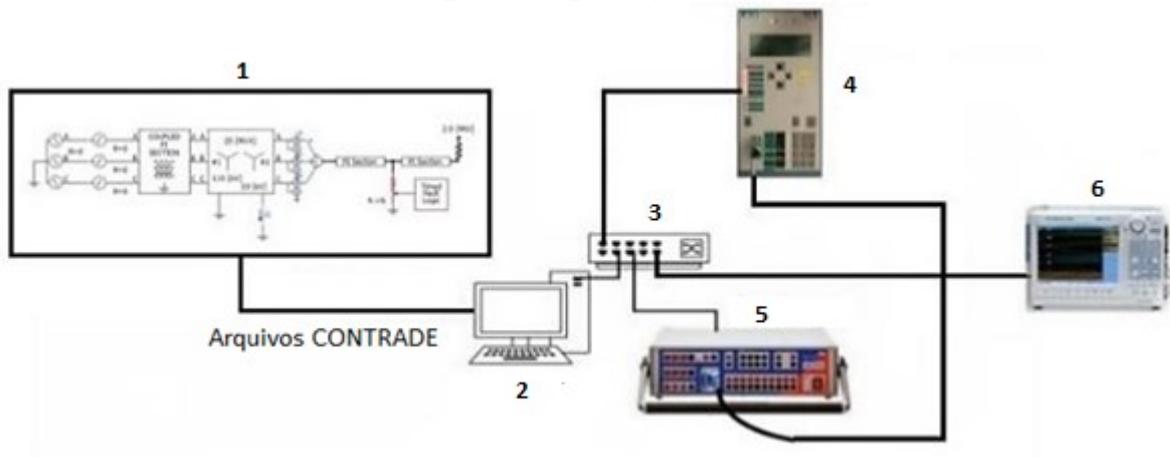
Dessa forma, caso o momento da ocorrência de uma falta coincida justamente quando alguma concessionária de energia está realizando o *Ripple Control*, os relés de proteção a distância poderiam identificar o local de ocorrência do evento erroneamente, colocando em risco as linhas de transmissão de energia.

Assim, com o intuito de verificar o nível de precisão e a qualidade desse tipo de relé, foram realizados uma série de testes em laboratórios de engenharia elétrica, analisando o comportamento desse equipamento em situações operacionais semelhantes as enfrentadas em seu cotidiano.

3. MONTAGEM EXPERIMENTAL

Para testar o impacto das inter-harmônicas em um relé de proteção a distância, a seguinte montagem experimental foi realizada.

Fig. 4- Montagem Experimental



Fonte: Do autor (2020)

Como exemplificado na figura 4, para a realização do experimento, foram utilizadas as seguintes ferramentas:

1. *Software* PSCAD;
2. Computador;
3. *Switch* (Hirschmann RS20);
4. Relé de proteção a distância (7SA610);
5. Mala de teste da Omicron (CMC 256-6);
6. Yokogawa (DL850/DL850V Scope Corde).

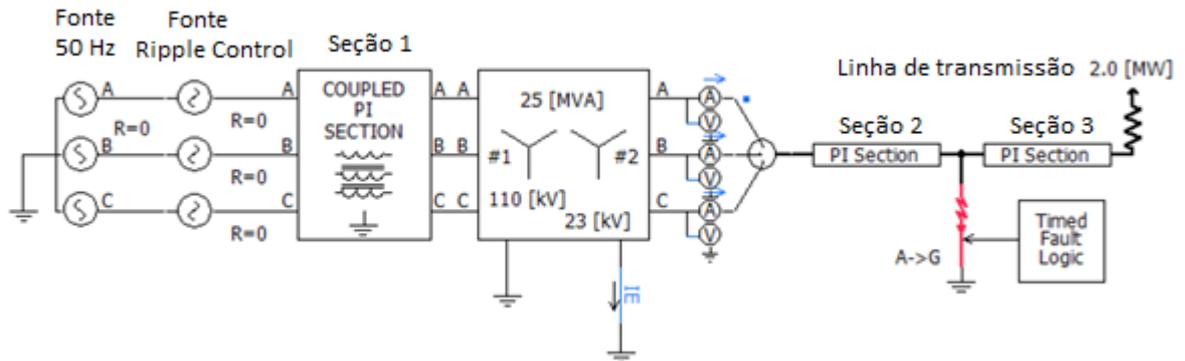
No laboratório, após reunidos todos os dispositivos, conexões foram feitas entre eles, com objetivo de simular um sistema elétrico real e o *Ripple Control*. Seguindo a listagem de 1 a 6, citadas anteriormente, conectam-se as entradas 5 e 6 no equipamento 3. Posteriormente, as saídas de 5 e 4 foram ligadas as ferramentas 4 e 3, respectivamente. Para finalizar, os aparelhos 3 e 2 foram interligados e os arquivos gerados em 1 foram reproduzidos em 2.

Dessa forma, a montagem prática torna-se concluída.

3.1 Procedimentos Experimentais

O primeiro passo para a realização do estudo proposto, foi o desenvolvimento de uma simulação computacional de um sistema de transmissão de energia no *software* PSCAD. O esboço do circuito elaborado encontra-se anexado na figura 5.

Fig. 5- Simulação Computacional PSCAD



Fonte: Do autor (2020)

Como podemos observar na figura 5, a linha de transmissão proposta para o experimento é trifásica, sendo alimentada pelas fontes de tensões A, B e C, com uma tensão de 110 kV. Além disso, para simular o sinal de *Ripple Control*, em cada fase, individualmente, foi conectada uma fonte de tensão sobreposta a fundamental.

Logo após as fontes, um bloco (seção 1), cujas configurações permitem inserir a impedância total para cada uma das fases, foi instalado no circuito. Posteriormente, sua saída foi conectada a um transformador trifásico de 110/23 kV, que possui seu secundário interligado a uma linha de transmissão de 40 km, responsável pela alimentação de uma carga de 2 MW.

Ademais, é importante ressaltar, que o sistema de transmissão elaborado foi dividido em duas partes, separadas por dois blocos (seções 2 e 3) que representam a falta fase-terra. Para finalizar, foram instalados medidores de corrente e tensão no início da linha, visando possibilitar o registro desses parâmetros em cada um dos testes realizados.

Dessa forma, após a elaboração do circuito, os arquivos gerados nas simulações foram convertidos para o formato CONTRADE, que é bastante utilizado por *Intelligent Electronic Devices* (IEDs), inclusive pela mala de teste da Omicron 256.

Na tabela a seguir, encontra-se anexado todos os parâmetros adotados no sistema da figura 5.

Tabela 1 – Parâmetros PSCAD

Fontes A, B e C	
Tensão (fase-fase)	U = 110 kV
Frequência	f = 50 Hz
Impedância de sequência positiva	$\bar{Z} = (1,981 + 19,809) \Omega$
Impedância de sequência zero	$\bar{Z}_0 = (1,348 + 13,484) \Omega$
Transformador 110/23 kV	
Conexão	YN/yn
Potência	S = 25 MVA
Reatância de dispersão de sequência positiva	11 %
Perdas por correntes de Foucault	0,06 %
Perdas no cobre	0,32 %
Linha de Transmissão	
Tamanho	l = 40 km
Resistência de sequência positiva	0,259 Ω /km
Reatância de sequência positiva	0,368 Ω /km
Reatância capacitiva de sequência positiva	685 k Ω /km
Razão entre resistência de sequência zero e resistência de sequência positiva	1,5
Razão entre impedância de surto de sequência zero e impedância de surto de sequência positiva	1,5

Fonte: Do autor (2020)

Terminada essa etapa, o segundo passo foi começar a modelar o sinal de *Ripple Control* fornecido pelas fontes de tensões sobrepostas. Para a realização dos ensaios, foram aplicados vários níveis tensões (fase-terra), visando simular diferentes tipos de cenários. No entanto, as frequências adotadas como referência foram sempre de 183,33 e 216,66 Hz, visto que na República Tcheca, essas duas faixas são amplamente empregadas.

Assim, o próximo procedimento desenvolvido, foi a determinação da distância da falta em relação ao relé de proteção a distância. Para isso, primeiramente, foi necessário aplicar uma Transformada Rápida de Fourier nas medições de correntes e tensões arquivadas. Feito isso, os dados obtidos foram utilizados para calcular a reatância até a falta.

Para uma falta fase-terra na fase 1, a equação (3) foi adotada como referência para aferir o valor dessa reatância X_{LF} [8]:

$$X_{LF} = \frac{U_{L1E}}{I_{L1}} \frac{\sin \varphi_{L1} - \frac{I_E}{I_{L1}} K_{RE} \sin \varphi_{L1E}}{1 - (K_{XE} + K_{RE}) \frac{I_E}{I_{L1}} (\cos \varphi_{L1} - \cos \varphi_{L1E})^2 + K_{XE} K_{RE} \left(\frac{I_E}{I_{L1}} \right)^2} \quad (3)$$

Onde X_{LF} é a reatância até a falta, U_{L1E} é a tensão fase-terra na fase 1, I_{L1} é a corrente de fase de curto-circuito na fase 1, I_E é a corrente de curto-circuito de terra, φ_{L1} é o ângulo entre U_{L1E} e I_{L1} e φ_{L1E} é o ângulo entre U_{L1E} e I_E . Além disso, a equação (3) conta com dois fatores de compensações residuais, calculados a partir das fórmulas (4) e (5), e que serão implementados no relé de distância real.

$$K_{RE} = \frac{R_E}{R_1} = \frac{1}{3} \left(\frac{R_0}{R_1} - 1 \right) \quad (4)$$

$$K_{XE} = \frac{X_E}{X_1} = \frac{1}{3} \left(\frac{X_0}{X_1} - 1 \right) \quad (5)$$

Onde K_{RE} e K_{XE} são os fatores de compensações residuais, R_0 e R_1 são as resistências de sequência zero e positiva e X_0 e X_1 são as reatâncias de sequência zero e positiva. Na tabela 2, encontram-se anexados os valores dessas variáveis calculadas para o sistema proposto.

Tabela 2 – Fatores de compensações residuais

K_{RE}	0,167
K_{XE}	0,417

Fonte: Do autor (2020)

Dessa forma, a partir dos dados obtidos pelas equações (3), (4) e (5), foi possível determinar a localização de várias faltas fase-terra simuladas na linha de transmissão proposta. A fórmula (6) demonstra como esse cálculo foi realizado.

$$l_F = \frac{X_{LF}}{X_K} \quad (6)$$

Onde l_F é a distância em km do relé até a falta, X_K é o valor da reatância por km da linha de transmissão, definido pela tabela 1 como $0.368 \Omega/\text{km}$, e X_{LF} é a reatância da equação (3).

Finalizada a simulação, deu-se início ao último passo experimental, que foi a reprodução dos dados obtidos nos testes, no formato CONTRADE, pela mala de teste da Omicron. Além disso, é importante ressaltar que os arquivos obtidos foram executados através do *Trans Play Test*, disponível no *software* de operação desse equipamento, instalado no computador.

Desse modo, encerrou-se os procedimentos experimentais, faltando apenas analisar as informações sobre as faltas, fornecidas pelo relé, e acompanhar a forma de onda da tensão aplicada ao sistema, através do uso do Yokogawa, que é semelhante a um osciloscópio.

4. RESULTADOS

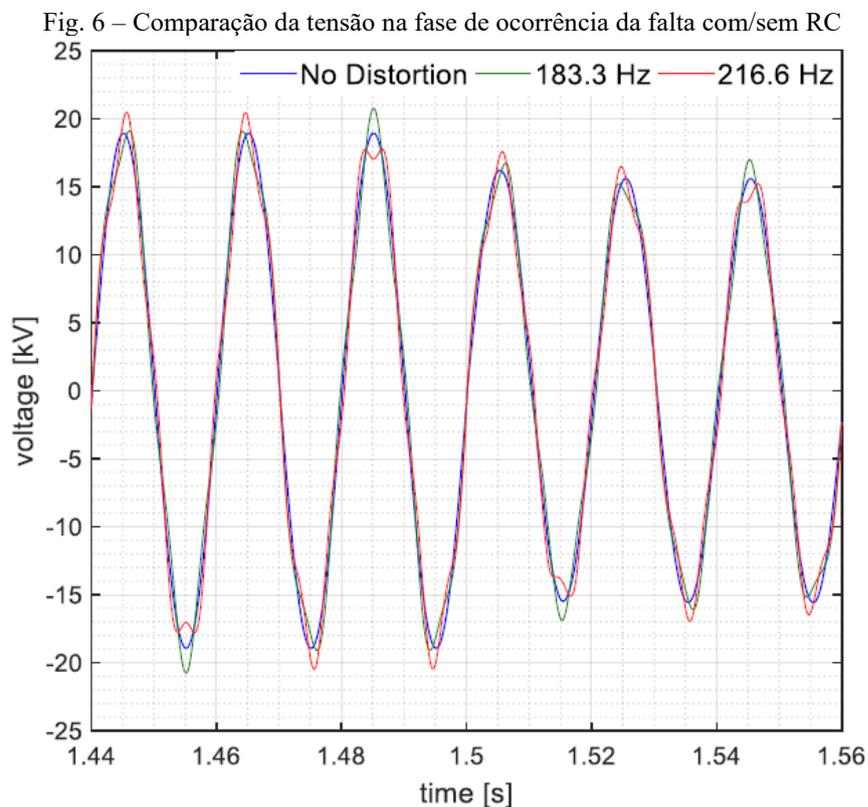
Após a realização de vários testes e estudos de diversos cenários de operação para o sistema de transmissão proposto, os resultados obtidos serão expostos nos próximos tópicos.

4.1 Análise da Tensão

Primeiramente, o foco desse trabalho foi a analisar o comportamento da tensão na fase submetida a falta fase-terra. Dessa maneira, foram elaborados diversos ensaios, variando a magnitude da tensão das fontes sobrepostas de 0 até 9 % do valor da fundamental.

Em todas as simulações realizadas, as frequências adotadas como referências para a técnica de remanejamento de carga, foram de 183,33 e 216,66 Hz. Ademais, é importante ressaltar, que o instante de ocorrência da falta foi sempre 1,5 segundos após o início do teste.

Na figura 6, é ilustrada três formas de ondas de tensões sujeitas a um curto-circuito monofásico, cuja resistência é de 1 Ω e está localizado a 20 km do relé de proteção a distância. Além disso, para as frequências classificadas como inter-harmônicas, a magnitude da tensão aplicada foi de 5,716 kV.



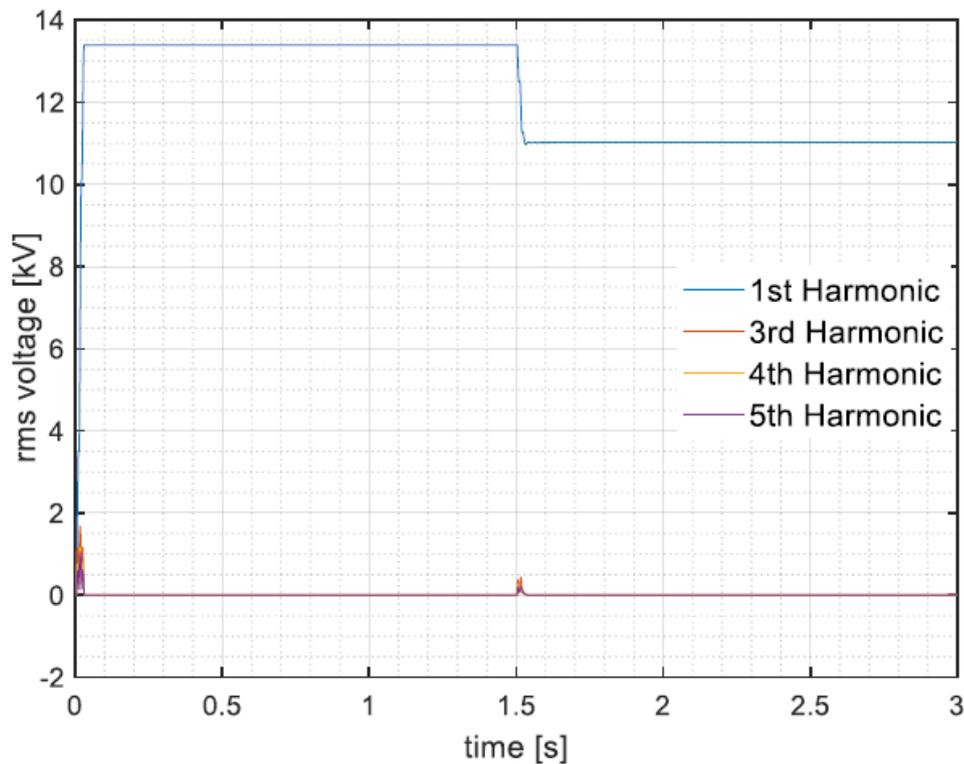
Fonte: Do autor (2019)

A partir da figura 6, é possível inferir que a forma de onda da tensão do sistema elétrico de potência, submetida a 9 % de taxa de *Ripple Control*, apresentou distorções consideráveis. Outro fator importante demonstrado no gráfico, foi o afundamento de tensão no segundo 1,5, evidenciando a ocorrência da falta.

Posteriormente, o próximo passo do teste foi aplicar uma Transformada Rápida de Fourier sob as tensões da simulação descrita na figura 6. Desse modo, foram obtidos os valores rms desses parâmetros para as suas principais componentes harmônicas.

Na figura 7, encontram-se os resultados para o sistema operando apenas com a frequência fundamental.

Fig. 7 – Valores rms das componentes harmônicas da tensão sem RC

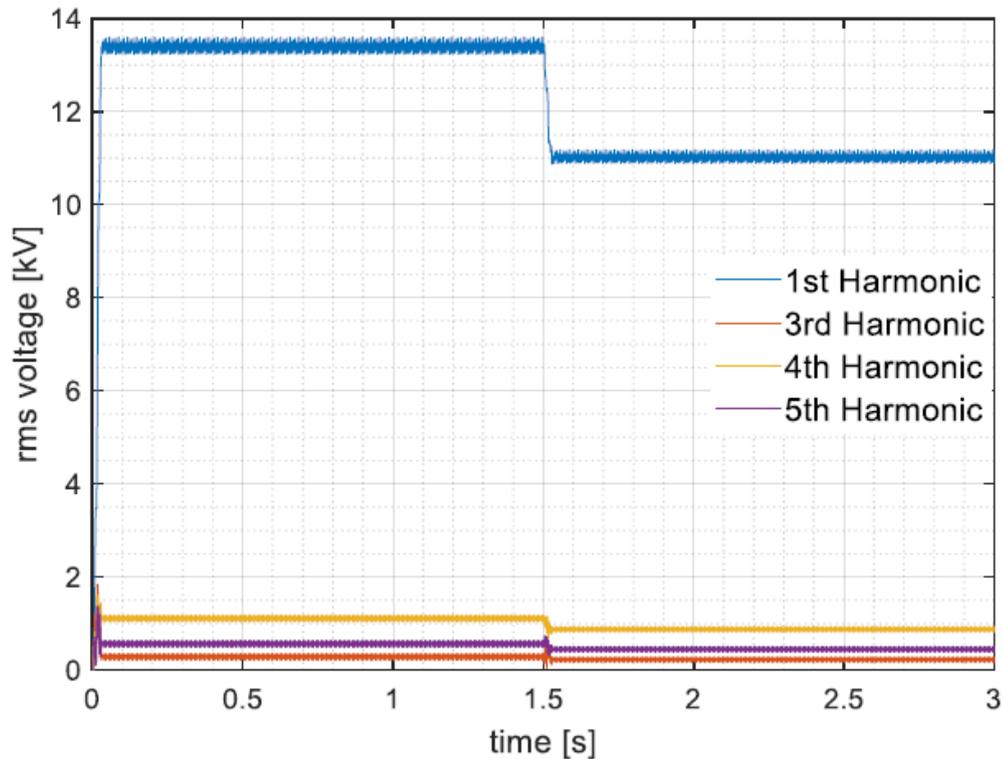


Fonte: Do autor (2019)

Como exemplificado pelo gráfico da figura 7, um sistema de transmissão operando apenas com a frequência fundamental, não apresentou componentes harmônicas de tensões na fase de ocorrência da falta. Além disso, vale ressaltar, que tal característica é válida durante todo o tempo de simulação.

Na figura 8, encontram-se os resultados para o sistema operando sob influência de uma tensão de 5,716 kV, na frequência de 216,66 Hz.

Fig. 8 – Valores rms das componentes harmônicas da tensão com RC de 216,66 Hz



Fonte: Do autor (2019)

Como exemplificado na figura 8, devido à presença do *Ripple Control*, o comportamento da tensão apresentou alterações em relação a figura 7. Um fator importante a se observar, é que não foi somente o valor das componentes harmônicas que mudaram, mas, também, a tensão fundamental apresentou grandes oscilações durante toda a simulação.

4.2 Distância da falta

Nesse tópico, será analisado os resultados obtidos a partir do uso do algoritmo localizador, representado pela equação (3), em diferentes pontos da linha de transmissão proposta. A equação (7) demonstra como foi aferido o nível de confiabilidade dos parâmetros calculados.

$$\text{Erro} = \frac{|\text{Distância Estimada} - \text{Distância Atual}|}{\text{Distância Atual}} \cdot 100 \quad (7)$$

Na tabela 3, encontram-se anexados os valores de distâncias obtidas a partir de várias simulações realizadas. Para todas elas, as resistências adotadas para as faltas foram de 1Ω e os

níveis de *Ripple Control*, quando presentes, foram de 9 % da tensão fundamental, ou seja, 5,716 kV. Além disso, as janelas de tempo empregadas para calcular as posições das faltas, foram de 20 períodos, ou seja, 400 ms.

Tabela 3 – Distâncias obtidas com uma janela de tempo de 20 períodos

Distância Atual (km)	Sem inter-harmônicas		Com inter-harmônicas de 183,33 Hz		Com inter-harmônicas de 216,66 Hz	
	Distância Estimada	Erro (%)	Distância Estimada	Erro (%)	Distância Estimada	Erro (%)
5	5,006545	0,131	5,006537	0,131	5,006566	0,131
10	10,010162	0,102	10,010132	0,101	10,010201	0,102
15	15,014152	0,094	15,014096	0,094	15,014205	0,095
20	20,018629	0,093	20,018543	0,093	20,018697	0,093
25	25,023707	0,095	25,023898	0,094	25,023789	0,095

Fonte: Do autor (2019)

A partir da análise da tabela 3, é evidente que a distância estimada da falta é praticamente a mesma em todos os cenários simulados, uma vez que os erros desses parâmetros, não excederam 0,131 %.

Tomando como base os parâmetros definidos na simulação anterior, foram realizados novos testes, com o intuito de avaliar o impacto da janela de tempo utilizada na determinação da distância da falta. Em todos os ensaios elaborados, a falta estava localizada a uma distância de 10 km dos terminais de medições e, para efetuar os cálculos necessários, as janelas de tempo adotadas foram de 3 períodos, ou seja, 60 ms.

Na tabela 4, encontram-se registrados os resultados obtidos.

Tabela 4 – Distâncias obtidas com uma janela de tempo de 3 períodos

Intervalo de tempo (s)	Sem inter-harmônicas		Com inter-harmônicas de 183,33 Hz		Com inter-harmônicas de 216,66 Hz	
	Distância Estimada	Erro (%)	Distância Estimada	Erro (%)	Distância Estimada	Erro (%)
1.69 – 1.75	10,010162	0,102	10,009137	0,091	10,009888	0,099
1.94 – 2.00	10,010162	0,102	10,008458	0,085	10,012724	0,127
2.00 – 2.06	10,010162	0,102	10,009263	0,093	10,008769	0,088
2.30 – 2.36	10,010162	0,102	10,009036	0,090	10,010072	0,101
2.61 – 2.67	10,010162	0,102	10,010774	0,108	10,011029	0,110

Fonte: Do autor (2019)

A partir da análise da tabela 4, é possível afirmar que a distância estimada da falta, no cenário sem distorção inter-harmônica, é a mesma independente dos 60 ms escolhidos como referência. No entanto, tal característica não é válida para os sistemas sob a influência do *Ripple Control*, visto que o erro calculado sofreu leves alterações dependendo dos instantes examinados.

Um dos fatores observados que influenciaram significativamente a distância determinada pelo algoritmo de localização, foi a resistência de falta. Assim, foram realizados outros testes, visando verificar a interferência dessa variável.

Na tabela 5, encontra-se anexados os resultados obtidos para uma falta localizada a uma distância de 10 km.

Tabela 5 – Distâncias obtidas variando a resistência de falta

Resistência da falta (Ω)	Sem inter-harmônicas		Com inter-harmônicas de 183,33 Hz		Com inter-harmônicas de 216,66 Hz	
	Distância Estimada	Erro (%)	Distância Estimada	Erro (%)	Distância Estimada	Erro (%)
0	9,998890	0,011	9,998902	0,011	9,998944	0,011
1	10,010162	0,102	10,010132	0,101	10,010201	0,102
5	10,055611	0,556	10,057629	0,576	10,057783	0,578
20	10,229981	2,299	10,229426	2,294	10,229705	2,297
50	10,586897	5,869	10,586267	5,862	10,586340	5,863

Fonte: Do autor (2019)

A partir da análise da tabela 5, é comprovado que quanto maior for a resistência da falta, mais imprecisa tende a ser a distância estimada pela equação (3), sendo válida essa afirmação em todos os cenários estudados. Além disso, à medida que o valor da resistência foi sendo incrementado, a diferença entre os resultados individuais, para as mesmas condições de curto, começaram a ser mais discrepantes.

4.3 Relé de proteção a distância

Nessa etapa, através do uso da mala de teste do Omicron, os arquivos armazenados no formato CONTRADE, obtidos a partir das simulações realizadas no *software* PSCAD, foram reproduzidos na montagem experimental elaborada. Assim, o objetivo desse experimento, foi analisar o funcionamento do relé de proteção a distância sob a influência do *Ripple Control*.

Para determinar a localização da falta, o dispositivo de proteção utilizado, processa os dados de tensões e correntes fornecidas pela fonte e aplica uma análise de Fourier sob eles, com uma frequência amostral de 1 kHz. Além disso, é importante ressaltar, que para todos os testes anexados nesse tópico, o valor da magnitude da tensão, com frequência não múltipla da fundamental, foi de 9% do valor da componente de 50 Hz.

Assim, apesar do nível de distorção inter-harmônica adotado nos ensaios serem bastantes superiores ao comumente observado em linhas de transmissão de energia, o relé demonstrou ser capaz de eliminar seus efeitos negativos, não havendo alterações significativas em seu regime de operação.

Os resultados obtidos dos testes realizados encontram-se anexados na tabela a seguir.

Tabela 6 – Distâncias obtidas pelo relé para uma falta na posição de 10 km

Número do Teste	Sem inter-harmônicas	Com inter-harmônicas de 183,33 Hz	Com inter-harmônicas de 216,66 Hz
	Distância (km)	Distância (km)	Distância (km)
1	11,00	11,00	11,00
2	11,00	11,00	11,00
3	11,00	11,00	11,00
4	11,00	11,00	11,00
5	11,00	11,00	11,00

Fonte: Do autor (2019)

Tabela 7 – Distâncias obtidas pelo relé para uma falta na posição de 20 km

Número do Teste	Sem inter-harmônicas	Com inter-harmônicas de 183,33 Hz	Com inter-harmônicas de 216,66 Hz
	Distância (km)	Distância (km)	Distância (km)
1	22,1	22,1	22,0
2	22,1	22,1	22,1
3	22,1	22,0	22,0
4	22,1	22,0	22,1
5	22,1	22,1	22,1

Fonte: Do autor (2019)

Tabela 8 – Distâncias obtidas pelo relé para uma falta na posição de 30 km

Número do Teste	Sem inter-harmônicas	Com inter-harmônicas de 183,33 Hz	Com inter-harmônicas de 216,66 Hz
	Distância (km)	Distância (km)	Distância (km)
1	33,1	33,1	33,1
2	33,1	33,1	33,1
3	33,1	33,1	33,1
4	33,1	33,1	33,1
5	33,1	33,1	33,1

Fonte: Do autor (2019)

Tabela 9 – Distâncias obtidas pelo relé para uma falta na posição de 40 km

Número do Teste	Sem inter-harmônicas	Com inter-harmônicas de 183,33 Hz	Com inter-harmônicas de 216,66 Hz
	Distância (km)	Distância (km)	Distância (km)
1	44,1	44,1	44,1
2	44,1	44,1	44,1
3	44,1	44,1	44,1
4	44,1	44,1	44,1
5	44,1	44,1	44,1

Fonte: Do autor (2019)

5. CONCLUSÃO

A partir do estudo realizado ao longo desse trabalho, é evidente que o conhecimento sobre as técnicas de remanejamento de carga, adotadas pelas concessionárias de energia, é essencial para garantir que um sistema elétrico de potência esteja operando de forma eficiente e segura para todos os seus consumidores.

Com base nos resultados obtidos, é possível afirmar que o nível de distorção inter-harmônica, fornecido pelo *Ripple Control*, pode provocar oscilações consideráveis na tensão fornecida pelas linhas de transmissão de energia. Dessa forma, por se tratar de um evento que pode ser propagado entre níveis de tensões diferentes, todos os relés de proteção a distância, conectados a essa rede, estarão sujeitos a esse impacto.

No entanto, baseado nos cálculos que foram realizados a partir das simulações desenvolvidas no *software* PSCAD, foi comprovado que o *Ripple Control* apresenta uma baixa influência sob o algoritmo localizador de faltas fase-terra. Assim, caso um curto-circuito monofásico se instale em um determinado ponto do sistema, a distância identificada do evento seria praticamente a mesma, independentemente se há inter-harmônicas injetadas na rede ou não.

Além disso, o relé de proteção físico, modelo 7SA610, utilizado nos experimentos realizados em laboratório, mostrou ser bastante preciso e capaz de suprimir os efeitos negativos provocados por essa prática de controle instantâneo da carga conectada à rede de energia elétrica.

Desse modo, a conclusão desse trabalho é que a transmissão de sinais de curta duração, com frequências não múltiplas da fundamental, através das linhas de energia elétrica, não é um fator de risco à proteção proporcionada pelos relés de distância. Assim, o *Ripple Control* deve ser visto como uma prática extremamente vantajosa tanto para o consumidor quanto para o sistema elétrico de potência.

REFERÊNCIAS

- [1] *Sistema de Distribuição*. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/apostila_sdee_01.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2020.
- [2] MARZ, Michael. *Understanding Power System Interharmonics*. 2017. Disponível em: <<https://www.tdworld.com/grid-innovations/smart-grid/article/20969485/understanding-power-system-interharmonics>>. Acesso em: 19 mar. 2020.
- [3] IEEE STANDARDS ASSOCIATION. *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. New York: 2014.
- [4] LEONARDO POWER QUALITY INITIATIVE. *Guia de Aplicação de Qualidade de Energia*. Polônia: 2004.
- [5] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Norma IEC 61000-4*. 2014.
- [6] *What is Ripple Control*. Disponível em: <<https://www.hotwatercylinders.nz/blog/what-is-ripple-control/>>. Acesso em: 21 mar. 2020.
- [7] WILSON, José. *Apostila do curso de proteção de sistemas elétricos*.
- [8] Ziegler, G. *Numerical Distance Protection*. Munique: Siemens MCD, 1999.