

GERAÇÃO FOTOVOLTAICA DISTRIBUÍDA: ESTUDO OPERACIONAL PARA DETERMINAÇÃO DE AJUSTE DA PROTEÇÃO CONTRA ILHAMENTO BASEADA NA TAXA DE VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA¹

Anderson Lucas Vaz Machado²

Felipe Damarem³

Daiane Carla Casonatto⁴

Paulo Vicari⁵

RESUMO

As gerações distribuídas (GDs) são formas de geração de energia elétrica descentralizadas, que injetam energia no sistema elétrico convencional ajudando assim a diminuir as perdas e o carregamento da rede. Inerente as gerações distribuídas está o risco de operação ilhada, situação onde a geração permanece conectada mesmo após o desligamento de toda ou parte da rede da concessionária, colocando o sistema em risco. Para prevenir a operação ilhada, são adotados métodos anti-ilhamento, como a função de proteção Taxa de Variação de Frequência (do inglês, ROCOF-Rate Of Change Of Frequency). Assim o objetivo deste trabalho é analisar uma rede de distribuição e definir o ajuste da proteção ROCOF para 5 casos distintos, para isso foram realizadas simulações de um sistema elétrico adaptado do IEEE no software ETAP®. Após as simulações foi encontrado o ajuste de 0,3 Hz/s com tempo de detecção de ilhamento de 100 ms. Constatou-se que a proteção anti-ilhamento baseada somente na função ROCOF não deve ser empregada de forma singular, pois, para cargas menores que a geração, a mesma não demonstrou desempenho satisfatório, sendo necessário a utilização de uma proteção complementar.

Palavras-chave: Rocof. Anti-ilhamento. GD.

1 INTRODUÇÃO

A maior parte da matriz elétrica mundial é baseada em fontes não renováveis que são prejudiciais ao meio ambiente. Com a provável escassez desses recursos a busca por fontes de energias renováveis e limpas vem se intensificando nos últimos anos.

Segundo a Empresa de Pesquisa de Energia (EPE), a matriz elétrica mundial conta com 75% de sua produção baseada em recursos não renováveis e apenas 25% de fontes renováveis. O Brasil por sua vez possui cerca de 17% da sua geração elétrica proveniente de fontes não renováveis enquanto os 83% restantes provem de fontes renováveis, isso se deve ao grande potencial hídrico do país.

¹ Artigo científico apresentado como pré requisito para obtenção do título de Engenheiro Eletricista pela UCEFF.

² UCEFF Faculdades. Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica. E-mail andersonlucasvaz@gmail.com.

³ UCEFF Faculdades. Esp em Engenharia Elétrica. E-mail felipedamarem@uceff.edu.br .

⁴ Docente do curso de Engenharia Mecânica. E-mail: daianecasonatto@uceff.edu.br.

⁵ UCEFF Faculdades. Docente do curso de Engenharia Mecânica. E-mail: paulo.vicari@uceff.edu.br.

Com a criação da Resolução Normativa ANEEL nº 482, de 17 de abril de 2012, (alterada pela Resolução Normativa ANEEL nº 687 de 24 de novembro de 2015), que visa estabelecer as condições para o acesso das micro e minigeração a rede de distribuição, as fontes de energia renováveis, sobretudo a solar, tiveram um crescimento considerável.

Contudo, a implantação e conexão de gerações distribuídas na rede de energia da concessionária torna a operação e controle do sistema mais difícil, aumentando os desafios para manter a segurança das instalações. Como por exemplo, em situações de ilhamento não intencionais, desligamento de toda ou parte da rede da concessionária devido alguma anormalidade, a GD deve ter dispositivos que permitam a detecção da falha e isolamento do sistema, evitando a operação ilhada até o restabelecimento da energia na rede da concessionária. (A. G. DE BRITO, 2018).

Em geral as concessionárias de distribuição de energia elétrica, disponibilizam um manual com os procedimentos a serem seguidos para a conexão das gerações distribuídas no sistema elétrico. No caso da CELESC é disponibilizado a instrução normativa I-432.0004, com sua revisão mais recente de 2020, que estabelece, além dos requisitos técnicos e elementares de conexão de GDs ao seu sistema de distribuição de energia, quais as funções de proteção devem ser instaladas para a conexão da geradora na rede da CELESC, a fim de detectar e eliminar o ilhamento. Todas essas funções de proteção podem ser feitas por dispositivos eletrônicos e reles como: subtensão (27), sobretensão (59), sub frequência (81U), sobre frequência (81O), anti ilhamento (78) e Taxa de Variação de Frequência (81R - 81 df/dt).

Neste artigo foi modelado um alimentador de distribuição de energia de maneira a obter o ajuste do relé 81R de um consumidor com Geração Distribuída, a fim de identificar uma situação de ilhamento não intencional, de forma que a função 81R possa identificar o ilhamento sob diversas situações de operação dos alimentadores. **Para tanto, como pode ser realizado o estudo operacional a fim de encontrar o melhor ajuste da função Taxa de Variação de Frequência (81R - 81 df/dt), de modo que detecte uma situação de ilhamento não intencional e atenda as diversas formas de operação do sistema?**

Para isso optou-se por utilizar o software ETAP®⁶, onde serão feitas as simulações e testes dos ajustes do relé de proteção anti-ilhamento de uma GD fotovoltaica interligada a rede.

Desta forma o objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise do comportamento dinâmico em frequência de um alimentador de distribuição, com uma fonte de geração

⁶ ETAP® é uma empresa de software voltada para a engenharia elétrica, utilizado para: simulações e análises de sistemas de potência, modelagens, projetos, análise de curto circuito, proteção, seletividade e automação de sistemas elétricos.

distribuída fotovoltaica de 1MW conectada à rede elétrica, a fim de detectar situações de ilhamento, bem como a atuação da função taxa de variação de frequência nas condições prováveis de operação dos alimentadores.

Os objetivos específicos deste artigo são definir um alimentador de distribuição para a base do estudo, propor as cargas sujeitas a situações de ilhamento não intencional, desenvolver e simular o sistema no software ETAP® e por fim, definir o ajuste da função 81R que melhor poderá identificar situações de ilhamento em diversas condições de operação deste alimentador.

Tendo em vista que a operação de uma geração distribuída em situação de ilhamento pode causar danos as equipes de manutenção, consumidores ou danificar a própria rede convencional de energia, se justifica o estudo para encontrar o ajuste da função 81R, a fim de identificar situações de ilhamento e isolar a fonte geradora da rede de distribuição, evitando assim operações em ilha.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 GERAÇÃO DE ENERGIA NO MUNDO

A energia elétrica que utilizamos diariamente nas indústrias ou nas residências pode ser gerada a partir de fontes renováveis ou não renováveis. Fontes não renováveis são de grande importância para a produção energética mundial, devido a quantidade de energia que podem gerar, porém a liberação de energia ocorre em paralelo a poluição do meio ambiente, seja durante a queima de derivados do petróleo ou durante o descarte dos resíduos produzidos por usinas nucleares. De acordo com Simões Moreira (2018), dentre as fontes não renováveis tem-se:

- **fontes fosseis** são as que utilizam o carvão mineral e derivados do petróleo;
- **nuclear**, utiliza metais pesados como o urânio enriquecido para desencadear reações nucleares de forma controlada em um reator;

As fontes renováveis por sua vez utilizam a força da natureza ou resíduos que são descartados, de modo que são praticamente inesgotáveis, se regenerando toda vez que são utilizadas, diferente das fontes fosseis. Usualmente essas fontes são empregadas como forma de geração distribuída descentralizada. O Quadro 1 traz algumas dessas fontes que pertencem as renováveis.

Quadro 1 – Fontes de Energia renováveis

TIPO	DESCRIÇÃO
Energia das marés	Armazena a água da maré alta e a utiliza na maré baixa, fazendo com que a água armazenada passe por turbinas, funcionando de forma semelhante a uma usina hidrelétrica convencional;
Biomassa	É a queima de matéria orgânica, os resíduos podem ter origem agrícola, florestal, residencial ou industrial. A queima é feita em fornos que aquecem uma caldeira de água para gerar vapor e movimentam uma turbina acoplada a um gerador que produz eletricidade.
Hídrica	Utiliza a força da água armazenada em um lago para movimentar turbinas acopladas a geradores, estes convertem a energia mecânica em elétrica.
Eólica	São turbinas que utilizam a força dos ventos para geração de energia;
Energia solar	Pode ser utilizada como fonte térmica, para aquecimento de água (aquecedor solar) em residências, produção de vapor por meio de concentradores solares em usinas solares ou para geração de eletricidade pelo efeito fotovoltaico. O Brasil possui as condições ideais para se tornar líder na geração fotovoltaica, grande extensão territorial e localização geográfica que propicia a exposição a exposição de mais de 3 mil horas de luz solar por ano.

Fonte: Adaptado de Simões Moreira (2018).

2.1.1 Geração Distribuída No Brasil

De acordo com Mamede Filho (2017), entre 1920 a 1950, sistemas de geração termoelétrica descentralizadas eram muito comuns no Brasil, entretanto com a entrada em operação de grandes centrais geradoras hidráulicas, essa prática foi ficando de lado a partir de 1960, pois as fontes hidráulicas ofereciam energia “abundante”, com preço imbatível quando comparadas as termoelétricas.

Durante o racionamento de energia elétrica ocorrido entre 2001 e 2002, consumidores de grande porte amargaram grandes prejuízos, a partir de então muitas indústrias instalaram em seu parque fabril usinas termoelétricas para atender sua demanda, impulsionadas pelo receio de um novo racionamento e pelo alto preço da energia elétrica no mercado livre de energia⁷, tornando o custo de geração das termoelétricas mais baixo e competitivo, essas termoelétricas foram interligadas a rede de energia local, criando o que é chamado de geração distribuída (MAMEDE FILHO, 2017)

Com a criação da Resolução normativa nº 482 da ANEEL e seu aperfeiçoamento com a Resolução Normativa 687 de 1º de março de 2016, as gerações distribuídas tiveram um crescimento acentuado nos últimos anos. Segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (2020), o Brasil apresentou crescimento dos sistemas de GDs de 77,83% no

⁷ Mercado livre de energia é um ambiente para negociação onde empresas geradoras e consumidores livres podem negociar o fornecimento de energia elétrica, de acordo com a regulamentação do setor.

primeiro semestre de 2020 em relação ao ano de 2019, destaque para as regiões sudeste e sul com a instalação de 424.848 kW e 200.105 kW respectivamente seguidas pelo Nordeste, com 161.746 kW.

Para os próximos anos de acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia 2030⁸, a dois cenários possíveis para as GDs, o primeiro, chamado de “cenário verão”, onde as mudanças na legislação seriam sutis e os incentivos governamentais seriam mantidos, para este caso os investimentos seriam de até R\$70 bilhões de reais e a potência instalada seria de 24,5 GW. No segundo cenário chamado de “cenário primavera”, com mudanças mais severas na legislação, haveria a redução dos incentivos, resultando em um investimento de aproximadamente R\$50 bilhões e a potência instalada seria de 16,8 GW.

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética, atualmente o Brasil possui cerca de 83% de sua matriz elétrica proveniente de fontes renováveis, com destaque para as usinas hidrelétricas, eólicas e solares. Com a criação da Resolução normativa nº 482 da ANEEL e avanço das tecnologias, de 2010 até então, houve uma redução de cerca de 85% no valor dos equipamentos voltados para a instalação de sistemas fotovoltaicos, Portal Solar (2019), ajudando no desenvolvimento e procura por essa modalidade de geração de energia. De acordo com projeções do Plano Decenal de Expansão de Energia 2030, até o ano de 2030 existirão entre 2 a 3 milhões de sistemas geração distribuída no Brasil, desses, cerca de 79% serão sistemas fotovoltaicos.

2.2 LEGISLAÇÃO PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL

Conforme o Instituto Nacional de Eficiência Energética INEE, “geração distribuída é toda a geração de energia elétrica feita junto ou próximo de seus consumidores”. No Brasil inicialmente legislado pelo Artigo 14º do Decreto Lei nº 5.163 de 2004.

Considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquela proveniente de:

- I - Hidrelétrico com capacidade instalada superior a 30 MW; e
- II - Termelétrico, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a 75% (BRASIL, 2004).

Em 2012 foi criada a Resolução Normativa ANEEL nº 482 com o objetivo de incentivar o desenvolvimento do mercado brasileiro de geração distribuída e diminuir as barreiras para o

⁸ Plano Decenal de Expansão de Energia 2030: Documento voltado a sociedade com indicação de projeção da expansão futura do setor de energia, para um período de 10 anos.

acesso a sistemas de micro e minigeração. No ano de 2015 esta norma foi alterada pela Resolução Normativa ANEEL nº 687, a qual autoriza o uso de fontes de energias renováveis e permite sua conexão com a rede elétrica convencional, além de definir como microgeração distribuída instalações com até 75 kW de potência instalada e minigeração distribuída instalações com potência de 75 kW até 5 MW com ressalva para fontes hídricas onde minigeração se limita a 3 MW.

Se tratando de sistemas de proteção elétrica, para os sistemas de geração distribuída cabe ao acessante a desconexão do sistema em casos de ilhamento. Em relação aos requisitos de proteção, o uso de relé de proteção é dispensado apenas para micro geração de energia solar, para as demais fontes geradoras que utilizam alternadores síncronos devem ser equipadas com relé de proteção, para casos onde a potência de geração fotovoltaica seja igual ou superior 300 kW é obrigatório o uso de relé de proteção. Para a instalação de um sistema de GD o consumidor deve verificar também a seção 3.7 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST (2017)), preencher a solicitação de acesso de acordo com a potência da instalação e entregar a concessionária de energia junto aos demais documentos solicitados que podem variar de uma distribuidora para outra.

2.2.1 Manuais E Instruções Das Concessionárias De Energia

Para a conexão de uma instalação que possua um sistema de geração descentralizada na rede elétrica convencional, o acessante deve atender as normas e seguir os padrões de cada concessionária de energia, para isso o cliente deve buscar junto a distribuidora o documento que diz respeito ao assunto, como por exemplo a CPFL que possui a GD 15303 - Micro e Mini Geração Distribuída, ENERGISA que possui a NTE-042 - Conexão De Geração Distribuída, ELEKTRO com a NT-64 - Conexão entre Microgeração Distribuída em Baixa Tensão e a Rede de Distribuição da ELEKTRO, COPEL com a NTC 905200 - Acesso De Micro E Minigeração Distribuída ao Sistema da Copel e a CELESC que possui a I-432.0004 - Requisitos Para a Conexão de Micro ou Minigeradores de Energia ao Sistema Elétrico da Celesc, isso para citar algumas. De modo geral, os requisitos para conexão de uma concessionária para outra tendem a mudar sutilmente, devendo o consumidor e projetista se atentar a esses detalhes.

Para conexão ao sistema da CELESC, além de seguir a Resolução Normativa nº 482 também é necessário atender os critérios da instrução normativa I-432.0004, manual elaborado para informar e auxiliar clientes e projetistas que pretendem instalar sistemas de geração

distribuída. Entre os documentos necessários para aprovação e conexão está o diagrama unifilar, certificados, parecer técnico de acesso, memorial descritivo entre outros.

Cabe ao cliente garantir a integridade e segurança de sua instalação e da rede a qual está conectado, caso contrário a concessionária pode desconectá-lo do sistema até a solução da falha. Para evitar este tipo de problema é necessário a realização de estudos de proteção e seletividade para o ajuste dos dispositivos de proteção. Em sistemas com potências mais elevadas é exigido, por exemplo, memorial de cálculo com o valor dos ajustes dos relés de proteções elétricas, dentre as quais uma delas trata das proteções de anti-ilhamento.

2.3 ILHAMENTO

De acordo com o módulo 1 do PRODIST (2016), Ilhamento é a “Operação em que a central geradora supre uma porção eletricamente isolada do sistema de distribuição da acessada”, essa condição pode causar danos ao sistema e deve ser eliminada, desta forma a seção 3.7 do módulo 3 do PRODIST (2017) diz que:

No caso de operação em ilha do acessante, a proteção de anti-ilhamento deve garantir a desconexão física entre a rede de distribuição e as instalações elétricas internas à unidade consumidora, incluindo a parcela de carga e de geração, sendo vedada a conexão ao sistema da distribuidora durante a interrupção do fornecimento. (2017, p 64).

De acordo com A. G. De Brito (2018), em situações de ilhamento existe a possibilidade de a GD continuar alimentando as cargas conectadas ao sistema, causando problemas relacionados à segurança, queima de equipamentos, interferência no restabelecimento da energia, entre outros. Esses fatores estimulam o desenvolvimento de estudos que buscam encontrar, desenvolver e testar novos métodos para a detecção de ilhamento de forma rápida e precisa. São inúmeras as técnicas para a detecção de ilhamento, essas podem ser divididas em ativas e passivas. Os métodos de detecção passivos se dividem em duas categorias, remota e local e serão abordados a seguir.

2.3.1 Método De Detecção Remota (Passivos)

De acordo Vieira Jr (2011), nos métodos de detecção remotos ocorre a comunicação entre os dispositivos de proteção e manobra da rede elétrica, geradores distribuídos e com a distribuidora de energia. Esses métodos apresentam alta eficácia para detecção de ilhamentos,

entretanto apresentam um custo alto para implantação do sistema, sobretudo pela utilização de dispositivos de comunicação, controle e aquisição de dados. A seguir tem-se o exemplo de algumas dessas técnicas.

- Rede de comunicação de dispositivos de proteção, neste método todos os dispositivos de proteção anti-ilhamento da rede trocam informações entre si, essas informações são comparadas, em caso de alguma variação a rede percebe o ilhamento e aciona os dispositivos de manobras de modo a eliminar a parte ilhada. A comparação entre os valores de cada gerador serve para evitar acionamentos indevidos e aumentar a capacidade de detecção (VIEIRA JR, 2011).
- Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA – do inglês “Supervisory Control And Data Acquisition”), esse método apresenta resposta rápida para anomalias na rede, sendo assim amplamente utilizado em redes de transmissão. Para a utilização contra ilhamento, este método faz o monitoramento do estado de todos os disjuntores do sistema partindo da concessionária até a fonte geradora distribuída, entretanto sua instalação apresenta valores elevados, tornando-o pouco utilizado em redes de distribuição (VIEIRA JR, 2011).

2.3.2 Métodos De Detecção Local (Passivos)

Os métodos passivos utilizam as grandezas elétricas presente no ponto de conexão entre a rede da concessionária e a GD, no Quadro 2 serão apresentados alguns desses métodos.

Quadro 2 – Métodos locais Passivos

MÉTODOS	DESCRIÇÃO
Variação de Tensão	Utiliza a variação dos níveis de tensão para detectar a situação de ilhamento. Em caso de perda da rede elétrica, se a carga restante no sistema for menor que a potência nominal do gerador tem se a tendência de aumento de tensão, em casos onde a carga é maior que a potência nominal do gerador ocorre o afundamento de tensão possibilitando que a proteção de sub/sob tensão perceba o ilhamento e desconecte o gerador. Essas variações não ocorrem em casos onde a rede esteja presente.
Deslocamento de Fase (Fase Shift) ou Salto de Vetor (Vector Jump)	Detecta as variações no ângulo da tensão, em uma situação de ilhamento a carga da barra conectada ao gerador passa a ser alimentada exclusivamente por ele, isso causa uma alteração na potência e no ângulo da tensão, fazendo com que a proteção atue.
Variação de Frequência	Este fenômeno pode ocorrer quando uma carga de grande porte é acionada ou retirada do sistema, em regime normal isso não influencia a rede elétrica, porém durante uma falha toda a carga recai sobre a GD, fazendo com que a frequência caia de forma instantânea e fique assim por um período de tempo, isso sensibiliza a proteção que desacopla o gerador da rede.

Distorção Harmônica Total da Tensão ou da Corrente	A desconexão de um ramal de alimentação do gerador de modo a deixa-lo ilhado causa uma mudança brusca na carga que está ligada a GD, essa mudança causa uma alteração nas harmônicas do sistema de geração permitindo a detecção do ilhamento
Taxa de Variação de Frequência (df/dt) ou ROCOF ⁹	Utilizada no monitoramento da taxa de variação da frequência no ponto de conexão entre a distribuidora de energia e a geração distribuída. Essa função deve ser empregada em situações onde há um distúrbio na rede formando um ilhamento de cargas e GD, em situações onde a variação de frequência ocorre de forma lenta, a função 81R se torna mais sensível que as funções de sub e sobrefrequência.

Fonte: Adaptado de Lunardi 2016.

Os métodos de detecção passivos como por exemplo sub/sob tensão e sub/sob frequência empregados em inversores de sistemas fotovoltaicos possuem uma região de não detecção, ou seja, um ponto de operação onde os dispositivos de proteção não conseguem perceber o ilhamento. Normalmente essa região ocorre quando temos uma carga com potência próxima ou igual a potência fornecida pela geração, nesses casos a rede pode não participar da alimentação da carga, de modo que ao ser desconectada não cause distúrbios no sistema. (TRINDADE DA SILVA, 2016).

2.3.3 Métodos De Detecção Local Ativos

Os métodos ativos surgiram devido a região de não detecção dos métodos passivos, desta forma foram desenvolvidas técnicas para criar pequenos distúrbios na saída dos inversores, esses distúrbios causam oscilações que são monitoradas continuamente pelo inversor. A seguir são citados alguns dos métodos ativos:

- **Desvio ativo de Frequência ou Active Frequency Dryft (AFD)**, produz uma corrente na saída do inversor com onda levemente distorcida, apresenta um intervalo T_z , chamado de tempo morto. Essa distorção tende a desviar a frequência da tensão, com a rede ligada essa tendência é anulada, em caso de falta a frequência da tensão é alterada ultrapassando o ajuste cf^{10} e o inversor percebe o ilhamento (TRINDADE DA SILVA, 2016).
- **Sandia de Desvio de Frequência ou Sandia Frequency Shift (SFS)**, está técnica utiliza a realimentação positiva para modificar o cf em função da variação de frequência. É de fácil implantação e possui bom desempenho na detecção de ilhamento, porém causa uma pequena degradação na qualidade da tensão da rede (TRINDADE DA SILVA, 2016).

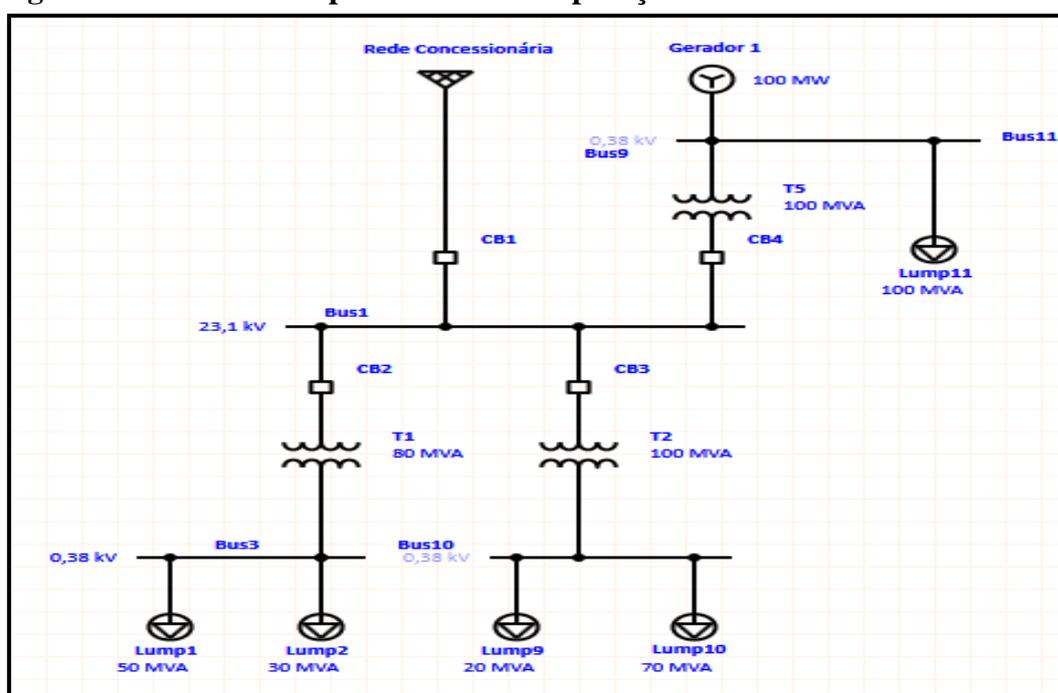
⁹ ROCOF é uma sigla em inglês para Rate of change of frequency.

¹⁰ cf é o fator de corte ou ajuste da proteção, definido através da equação: $cf = 2T_z/T_v$. Onde T_v é o período da tensão de rede.

- **Sandia de Desvio de tensão ou Sandia Voltage Shift (SVS)**, usa a realimentação positiva, variando a amplitude da tensão, produzindo perturbações na potência ativa de saída do inversor, ao diminuir a amplitude da tensão de saída a potência diminui, se o sistema estiver ilhado a amplitude continua a diminuir devido a realimentação positiva, até que a proteção de subtensão seja acionada. (TRINDADE DA SILVA, 2016).

Essas proteções devem ser analisadas e as que melhor se adaptem ao sistema devem ser implementadas afim de evitar que ocorra a operação da geração de forma ilhada. Tem-se o exemplo de um sistema elétrico com geração distribuída, que pode vir a operar de forma ilhada representado na Figura 1.

Figura 1 – Sistema com possibilidade de operação ilhada



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Em caso de abertura do disjuntor CB1 toda a carga do sistema tenderá a ser alimentada pelo gerador 1, causando oscilações na rede que devem sensibilizar as proteções, fazendo abrir o CB4, isolando o gerador do restante da rede, deixando o gerador alimentar apenas a carga Lump 11.

2.4 MODELAGEM DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO E OS PROBLEMAS RELACIONADOS À VARIAÇÃO DE CARGA

Redes de distribuição são um “conjunto de estruturas, utilidades, condutores e equipamentos elétricos, aéreos ou subterrâneos, utilizados para a distribuição da energia

elétrica, operando em baixa, média ou alta tensão de distribuição, inferior a 230 kV” (ANEEL 2015, pg 15).

De acordo com Dresch (2014), as cargas de uma rede de distribuição podem ser do tipo: Potencia constante, corrente constante, impedância constante, polinomial e exponencial.

- Potência constante para esse caso a potência não sofre alteração com a variação de tensão;
- Corrente constante a carga sofre influência de forma linear em relação a variação de tensão;
- Impedância constante para esses casos a potência varia de forma proporcional ao quadrado da variação da tensão no ponto de operação.
- Polinomial, esse método relaciona o modelo de potência constante, corrente constante e impedância constante é conhecido como modelo “ZIP”, sendo que a soma dessas resulta no valor total da potência ativa e reativa.
- Exponencial, nesse modelo são relacionadas as potencias ativa e reativa de forma não linear em relação a variação de tensão da rede.

Para Leal Granados (2018) a duas abordagens que podem ser utilizadas para a modelagem de cargas, sendo que a primeira delas é baseada em medições direta, onde são realizadas medições da potência em relação a tensão e frequência. Essas variações na tensão e frequência ocorrem devido ao funcionamento dos dispositivos, os dados coletados são armazenados e processados para então apontar o modelo da carga. Esse método apresenta desafios quanto ao seu custo de aplicação e limitação do range de tensão ao qual pode ser aplicado. A segunda forma é através da abordagem por meio dos componentes, esse método utiliza os componentes do sistema, onde cada dispositivo possui valores e dados conhecidos disponíveis em uma base de dados.

Ainda para Leal Granados (2018) podem ser aplicadas duas formas de modelagem das cargas, estática e dinâmica.

- Modelo estático, consiste na representação algébrica da potência ativa e reativa da carga em função da tensão e frequência, são utilizados para estudos do fluxo de potência, também são indicados para cargas resistivas e de iluminação, nesse modelo a representação de cargas como motores só se dá de forma satisfatória em regime de trabalho permanente.
- Modelo dinâmico, é representado por equações algébricas e diferenciais que definem a potência ativa e reativa da carga em relação a frequência e a tensão, para o cálculo são utilizados

os valores da tensão no instante e períodos anteriores, desta forma esse tipo de modelo é utilizado para análise de regimes transitórios.

Para a modelagem de uma rede o projetista deve levar em consideração fatores estáticos e dinâmicos da carga, fazendo a escolha do método que melhor se aplica a situação em estudo, de modo obter um modelo que permita a visualização do sistema de diferentes perspectivas, possibilitando a análise de seu comportamento quando exposto a alguma anomalia, bem como seu tempo de resposta para cada situação e a partir desses resultados tomar e definir medidas de proteção e de segurança, eliminando ou diminuindo ao máximo os riscos da instalação.

Para realização de estudos elétricos de diversas naturezas, modelos consagrados e amplamente testados podem ser utilizados, visando se aproximar de sistemas reais. Esses sistemas são encontrados na IEEE¹¹, portanto frequentemente servem de base para estudos e ensaios no meio acadêmico e científico.

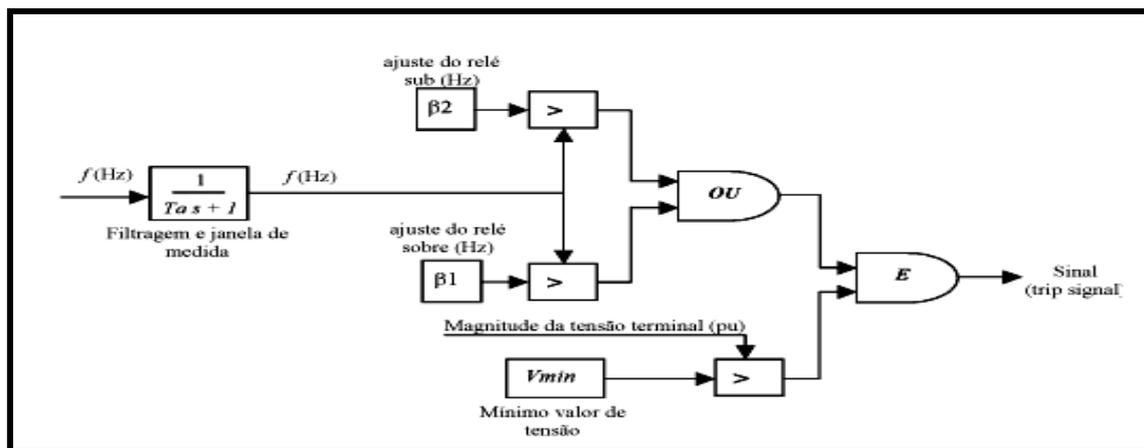
2.5 PROTEÇÃO CONTRA ILHAMENTO BASEADA EM FREQUÊNCIA

Geralmente sistemas com injeção de potência elevada requerem relés baseados em frequência, como sub/sob frequência e taxa de variação de frequência, para sensibilização das proteções das fontes de geração contra possíveis ilhamentos causados nas redes de distribuição. Esses relés podem falhar em situações onde o desbalanceamento de potência do sistema seja relativamente pequeno, nesse sentido a função ROCOF apresenta desempenho superior para detecção de ilhamentos, devido a sua capacidade de detecção de pequenos desequilíbrios de potência (VIEIRA JR; FREITAS; FRANÇA, 2004).

Relés de sub e sob frequência funcionam por meio de alterações na frequência da rede. O relé monitora o sinal de pelo menos um ciclo da frequência e então passa este sinal por um filtro com constante de tempo, de modo a eliminar sinais transitórios, após o filtro a frequência é comparada com os ajustes de sub e sob frequência, como mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Diagrama de operação do Rele de sub/sob frequência

¹¹ IEEE (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos ou Instituto de Engenheiros Eletrotécnicos e Eletrônicos), é uma organização sem fins lucrativos e uma das maiores organizações voltadas ao avanço da tecnologia em prol de todos.

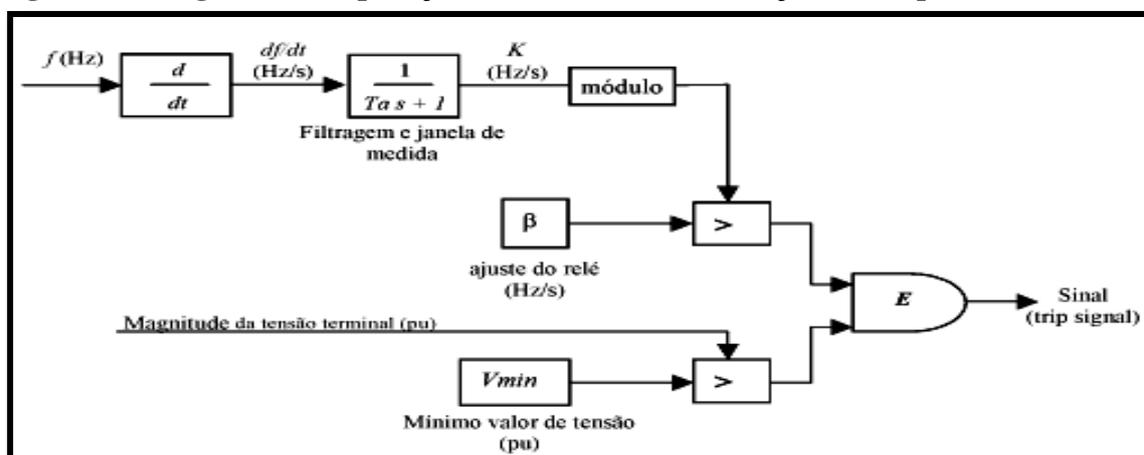


Fonte: Adaptado (VIEIRA JR; FREITAS; FRANÇA, 2004).

Após a comparação entre a frequência medida e a ajustada, nos casos em que os valores de frequência se encontram fora dos limites ajustados, o relé envia um sinal de trip para que o disjuntor de acoplamento da unidade geradora abra, retirando o paralelismo com o sistema de distribuição. Normalmente o tempo de atuação do relé está na faixa de 400ms ou mais, dependendo do sistema (VIEIRA JR; FREITAS; FRANÇA, 2004).

Taxa de variação de frequência (ROCOF) em ilhamentos onde o desbalanceamento da potência ativa é muito pequeno, ocorre a variação da frequência de forma muito lenta, desta forma para calcular a taxa de variação da frequência o relé analisa um período entre 2 e 50 ciclos do sinal de frequência, esse sinal passa por filtros e só após é comparado com o valor ajustado (VIEIRA JR; FREITAS; FRANÇA, 2004). A operação de um relé taxa de variação de frequência se dá conforme mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Diagrama de Operação do Relé Taxa de variação de frequência (ROCOF)



Fonte: Adaptado (VIEIRA JR; FREITAS; FRANÇA, 2004).

Pode se observar que este tipo de rele é equipado com um mecanismo de bloqueio que impede a operação se o nível de tensão estiver abaixo de um valor mínimo pré determinado (V_{min}). De acordo com a instrução normativa I-432.0004 de 14 de outubro de 2020 “todas as minigerações e somente as microgerações que não utilizam inversores devem realizar no mínimo as funções de proteção subtensão (27), sobretensão (59), desequilíbrio de tensão (59N), subfrequência (81U), sobrefrequência (81O), taxa de variação de frequência (81R), anti-ilhamento (78), sobrecorrente direcional (67) e direcional de potência (32) com relé de proteção”, sendo que a função 81R deverá ter, para sistemas com potência de até 1MW, ajuste de 1 Hz/s e tempo máximo de atuação de 2 segundos.

2.6 SOFTWARE ETAP®

ETAP® é uma plataforma voltada para a engenharia. Sua proposta é realizar análises, simulações, projetos, planejamento e automação de sistemas elétricos, monitoramento e controle. Sua versatilidade permite a elaboração de diagramas unifilares até 60% mais rápido que em outros softwares.

Entre suas funções pode-se citar estudo da malha de aterramento, estudo de arco elétrico e energia incidente, indicando a distância mínima de aproximação dos barramentos bem como o nível calórico incidente por cm^2 , realiza simulação de curto circuito, elaboração de relatórios, elaboração de placas de sinalização de acordo com os resultados encontrados nas simulações, ajuste das curvas de atuação dos dispositivos de proteção, entre outras (adaptado youtube).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa deste trabalho teve o objetivo de definir o ajuste para a proteção ROCOF, para isso foram realizados estudos das normas brasileiras e instruções normativas das distribuidoras de energia que tratam do assunto, sobretudo da instrução normativa I-432.0004 da CELESC. O estudo dessas normas possibilitou o entendimento das situações em que se faz necessário a utilização da referida função, bem como seus limites de operação de forma a manter a rede protegida contra ilhamentos não intencionais. Para isso foram seguidos os seguintes passos:

- Escolha de um sistema real encontrado na literatura;
- Adaptações no modelo;
- Definição das simulações a serem realizadas;
- Simulações;

- Definição do ajuste da função ROCOF

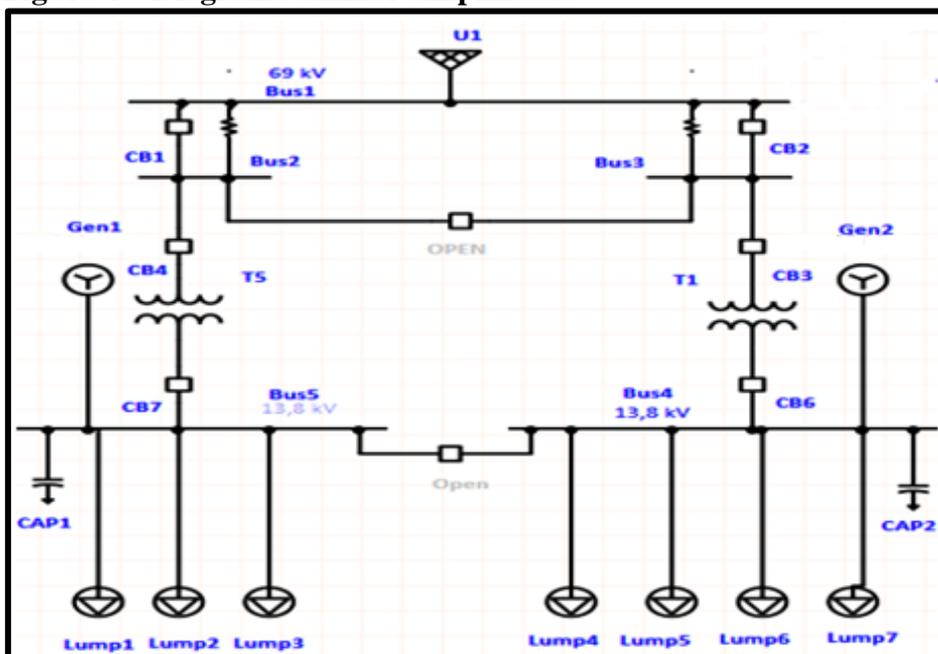
3.1 SISTEMA 44 BARRAS IEEE

A escolha do modelo composto por 44 barras, encontrado no IEEE, foi motivada pelo fato do sistema ter aplicação real e apresentar alguns desafios para o ajuste das proteções, como a presença de geradores, bancos de capacitores entre outros.

O modelo escolhido é um sistema elétrico formado por uma subestação de 69 KV, de onde saem dois alimentadores, esses alimentadores formam uma rede do tipo radial com recursividade, de modo a aumentar a confiabilidade da rede elétrica. Cada alimentador está ligado a uma barra, responsável por alimentar parte das cargas, por sua vez, cada barra possui um banco de capacitor e um gerador ligado em paralelo a rede, entre essas barras há dispositivos que podem ser manobrados, para alimentação do restante do circuito em caso de falha de um dos ramais de alimentação.

O modelo original possui um total de 21 unidades consumidoras, juntas possuem uma potência instalada de 24,216 MVA. Uma representação simplificada do sistema de recursividade do modelo original é representada na Figura 4.

Figura 4 – Diagrama unifilar simplificado



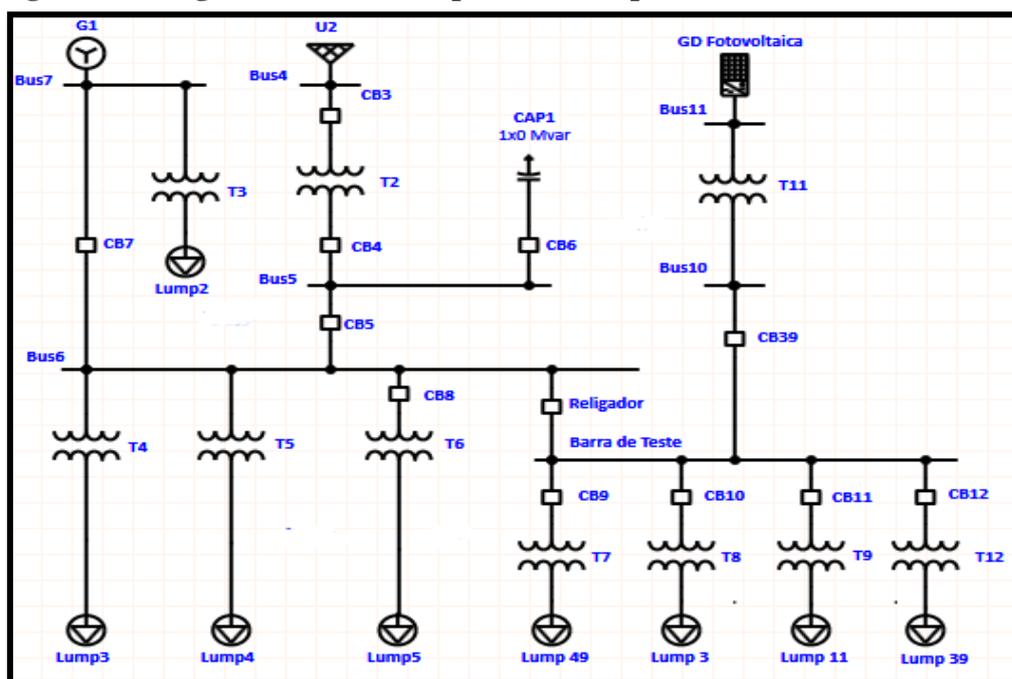
Fonte: Dados da pesquisa (2021).

A recursividade visa manter o fornecimento em casos de falha das linhas ou dos dispositivos responsáveis por alimentar os transformadores T1 e T5, entretanto cada uma dessas linhas e dispositivos, deve ser projetado para suportar toda a carga do sistema, aumentando custos com implantação e manutenção.

3.2 ADAPTAÇÕES NO MODELO

Para a realização dos ensaios foram realizadas algumas adaptações no modelo, de modo a torná-lo mais simples, compacto e análogo às redes de distribuição brasileiras. As mudanças realizadas consistem na retirada de algumas barras de recursividade, parte das cargas e adição de um sistema fotovoltaico distribuído com potência de 1.000 kVA, o qual será objeto de análise das condições de ilhamento e ajuste da função ROCOF. Uma perfil simplificado deste arranjo é representado pela Figura 5.

Figura 5 – Diagrama unifilar simplificado adaptado



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Após as adaptações do modelo, o sistema ficou com carga total de 9,552 MVA em paralelo a um gerador G1 com potência de 13,281 MW e com a geração fotovoltaica. A nova configuração do sistema como mostrado passou a ser do tipo radial sem recursividade.

3.3 DEFINIÇÃO DAS SIMULAÇÕES A SEREM REALIZADAS

O sistema elétrico em análise possui uma carga instalada total de 9,552MW, a qual é distribuída ao longo do alimentador derivado da subestação U2, mostrada na Figura 5. Para as simulações de ilhamento, foram atuados em dois elementos de seccionamento no alimentador, distintamente:

- Abertura do disjuntor CB3 da Figura 5. Essa condição gera ilhamento em todo o alimentador, deixando o gerador G1 e a usina fotovoltaica alimentando o sistema.
- Abertura do Religador da Figura 5. Essa condição gera ilhamento das cargas conectadas na barra de teste com a usina fotovoltaica.

As análises da variação da frequência, motivadas pelos ilhamentos simulados, foram realizadas na barra de teste, a qual está conectada a GD. Vale ressaltar que em todo instante a usina fotovoltaica permanece conectada ao sistema.

As cargas conectadas à barra de teste são chamadas de Lump 49, Lump 39, Lump 11 e Lump 3, com potências de 1,094 MW, 1,422 MW, 0,406 MW e 3,046 MW respectivamente.

As demais cargas se distribuem pelo alimentador de distribuição. Os critérios das simulações que foram realizadas para análises do comportamento da frequência do modelo adaptado são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Análises do comportamento da frequência

Casos simulados	Potência injetada pela GD (kVA)	Ilhamento – carga	Carga Energizada (MW)	Dispositivo Atuado
Caso 1	1.000	Todas as cargas	9,552	CB3
Caso 2	1.000	49, 39, 11 e 3	5,968	Religador
Caso 3	1.000	3	0,406	Religador
Caso 4	1.000	49	1,094	Religador
Caso 5	1.000	39 e 11	1,828	Religador

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Essas simulações reproduzem as condições de ilhamento mais críticas para detecção do relé de proteção da usina fotovoltaica. Deste modo, busca-se averiguar o comportamento da frequência frente a esses distúrbios, de forma a encontrar o ajuste ideal para as condições simuladas.

Para o caso de número 1, tem-se todo o sistema elétrico alimentado energizado e operando normalmente. O caso 2 apresenta as quatro cargas ligadas diretamente ao barramento

da geração distribuída. Já para os casos 3 e 4, foram consideradas a menor e a maior carga ligada respectivamente na barra de teste, enquanto que para o caso 5 tem-se a junção de duas cargas ligadas e duas desligadas.

Ainda foi realizado a comparação do ajuste da função taxa de variação da frequência – ROCOF, definido pelas simulações, com a instrução normativa da Celesc, I-432.0004, que tratam de assuntos relacionados a proteção de sistemas conectados a GD, e diz que a parametrização da função 81R deve ser feita de acordo com o estudo operacional e o tempo máximo para operação deve ser de dois segundos. Os resultados obtidos, portanto, devem atender aos limites de tempo estipulados para a desconexão dos geradores distribuídos em caso de ilhamento não intencional.

3.4 SIMULAÇÕES

Para execução das simulações foi utilizado a ferramenta de análise de transientes do software ETAP®, esta função simulou os momentos transitórios que ocorreram na rede elétrica, durante os distúrbios propostos e definidos pela Tabela 1.

Durante as simulações foram consideradas as cargas e a usina fotovoltaica operando em seu valor nominal. O software foi configurado para um tempo de simulação de 5 segundos, o qual no instante 1 segundo foi provocada a atuação dos dispositivos conforme os casos da Tabela 1. Vale ressaltar que cada caso foi analisado de forma individual permitindo a coleta dos dados utilizados para análise.

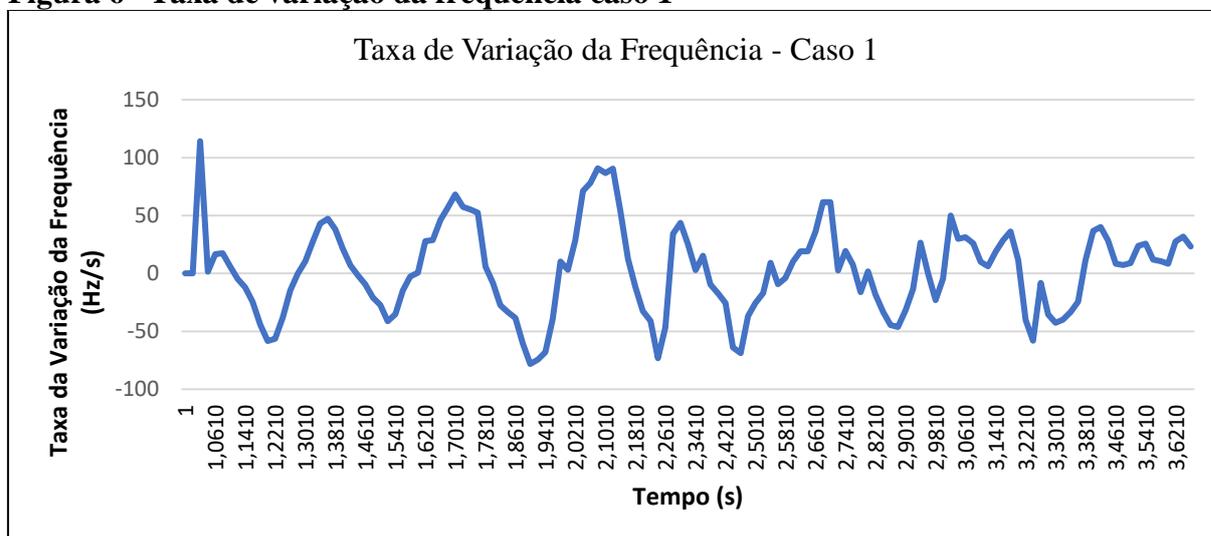
4 RESULTADO E ANÁLISE DOS DADOS

O ajuste final para a função 81R foi definido através da análise gráfica dos cinco casos simulados, de forma que o ajuste da função ROCOF possa identificar a situação de ilhamento não intencional para qualquer caso de operação do sistema. As Figuras de 6 a 10, representam graficamente a taxa da variação da frequência em Hz/s, no momento do ilhamento não intencional, para os casos simulados da Tabela 1. Abaixo são apresentados os dados analisados.

Para o caso 1 no instante de 1 segundo ocorre a abertura do disjuntor CB3, este evento deixa o sistema operando de forma ilhada e as cargas alimentadas pela geração distribuída fotovoltaica e pelo gerador GEN 1, com potência de 13MW, que permanece conectado à rede elétrica. A perda da concessionária ocasiona um grande desequilíbrio carga-geração no sistema,

de maneira que a frequência varie ao longo do tempo com uma velocidade (Hz/s) muito alta. Uma representação dessa variação é representada na Figura 6.

Figura 6 –Taxa de variação da frequência caso 1

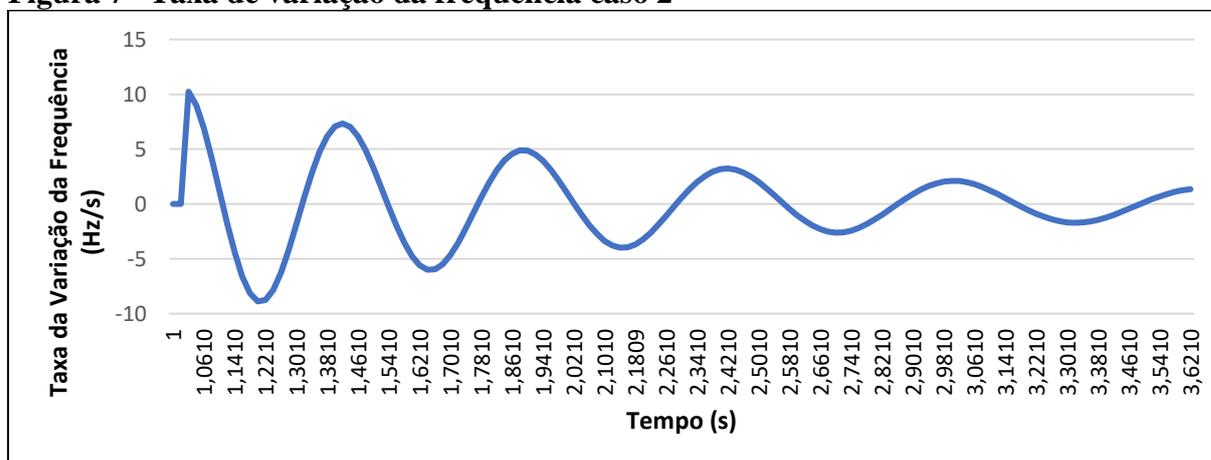


Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Para este caso o ajuste Hz/s, definido pela norma Celesc I-432.0004 seria suficiente para detectar o ilhamento, porém o tempo de detecção está na ordem de 200ms.

No caso 2 ocorre a abertura do religador de alimentação da barra de teste no instante de 1 segundo, deixando a geração distribuída operando de forma ilhada e como única fonte de alimentação para as quatro cargas conectadas ao barramento de teste. A desconexão da distribuidora de energia provoca um desequilíbrio entre geração-carga, este impacta diretamente na velocidade de variação frequência ao longo do tempo, fazendo com que essa velocidade em Hz/s assumam valores elevados, como representado pela Figura 7.

Figura 7 –Taxa de variação da frequência caso 2



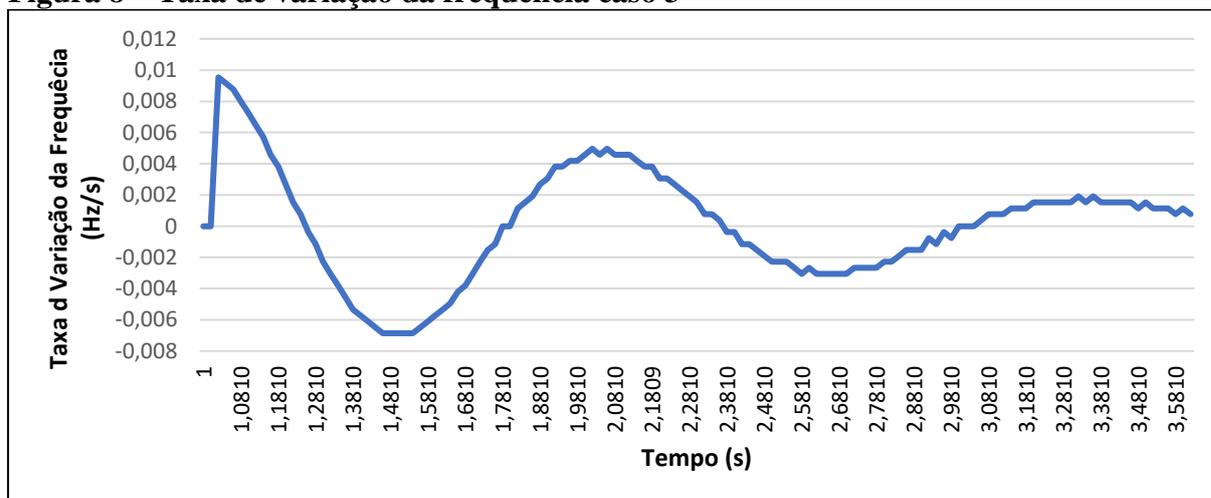
Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Neste caso o ajuste em Hz/s, definido pela norma Celesc I-432.0004 iria detectar o ilhamento em um tempo de aproximadamente 290ms, sendo que o ajuste ideal para este caso seria de 0,4 Hz/s com delay de 120ms.

Para o caso 3 apenas a carga com potência de 406 kW encontra-se em funcionamento no momento do ilhamento. No instante de 1 segundo, ocorre a abertura do religador, evento que deixa a GD operando de forma ilhada, alimentando a carga. Nesta situação a perda da concessionária gera um desequilíbrio entre carga-geração muito pequena, devido a grande diferença de potência entre geração e carga, os distúrbios gerados na rede elétrica são quase nulos, de maneira que a frequência varie em Hz/s com uma velocidade muito baixa ao longo do tempo, dificultando sua detecção.

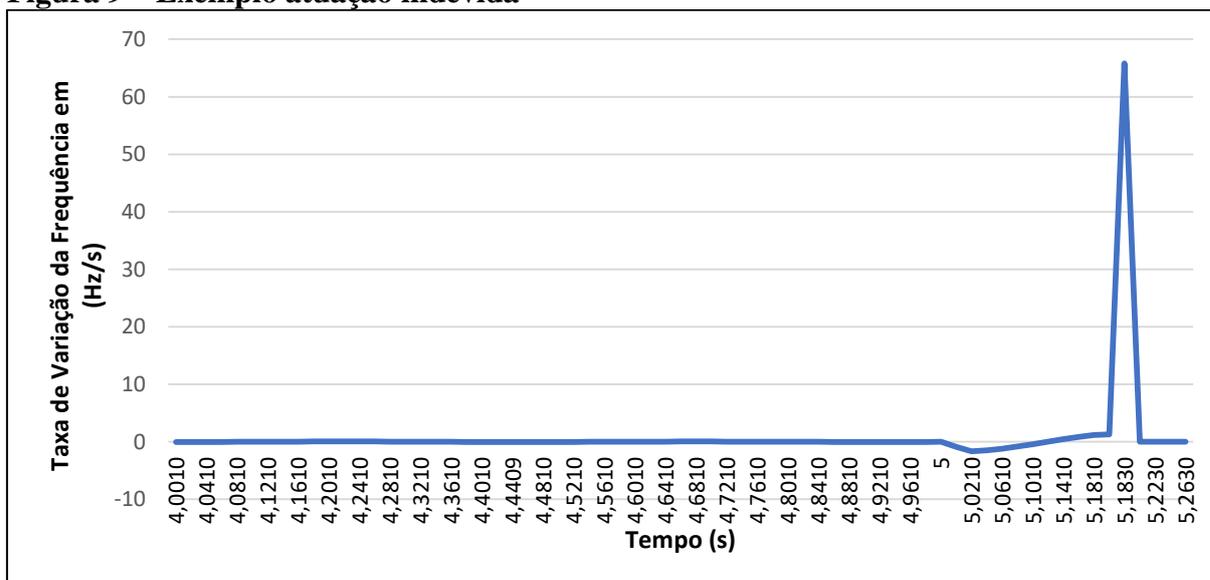
Para o caso 3 os ajustes definidos pela norma Celesc I-432.0004 não seriam o suficiente para detectar o ilhamento, devido a pequena variação causada ao sistema, sendo os valores de detecção ideais para esse caso de 0,002 Hz/s com tempo de atuação de 300ms, como mostrado pela Figura 8.

Figura 8 – Taxa de variação da frequência caso 3



Fonte: Dados da pesquisa (2021).

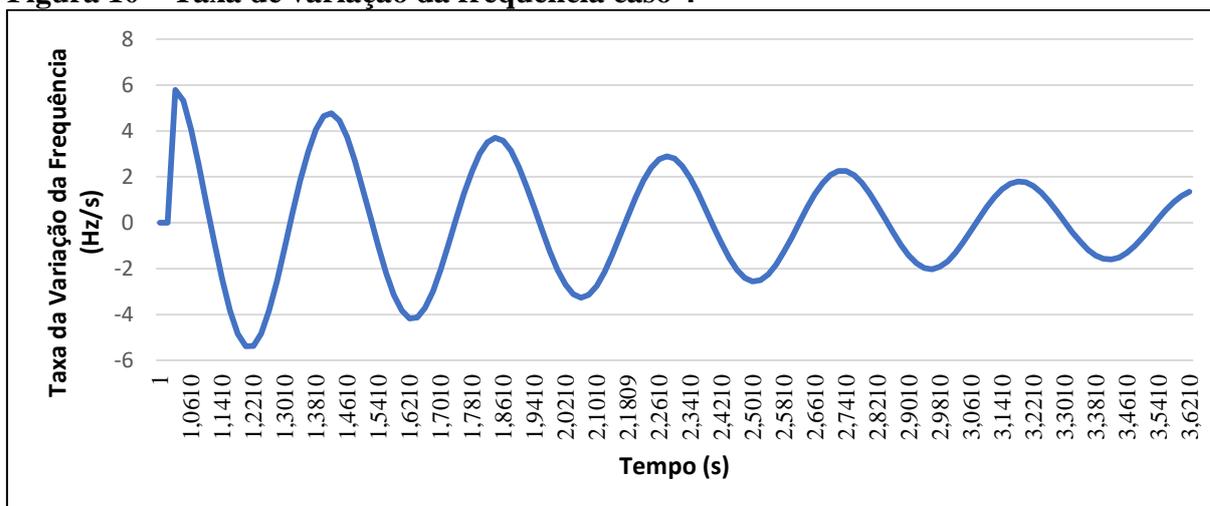
O ajuste para essa situação implicaria na possibilidade de acionamentos indesejados durante a entrada e saída de cargas com potência mais elevada, isso por que essas cargas podem causar perturbações ao sistema e assim sensibilizar a proteção devido a seu ajuste apresentar valores muito baixos, como representado na Figura 9.

Figura 9 – Exemplo atuação indevida

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

A Figura 9 representa a atuação do relé ROCOF durante a saída de uma carga de 3,046 MVA seguida da desconexão do gerador G1 no instante de 5 segundos, esta situação não caracteriza um ilhamento, visto que a concessionária permanece conectada ao sistema. O ajuste do relé na situação apresentada é de 0,002 Hz/s com tempo de atuação de 300 ms, mostrando que a utilização de valores de ajuste da taxa de variação da frequência muito baixos pode vir a causar desconexões indesejadas no sistema.

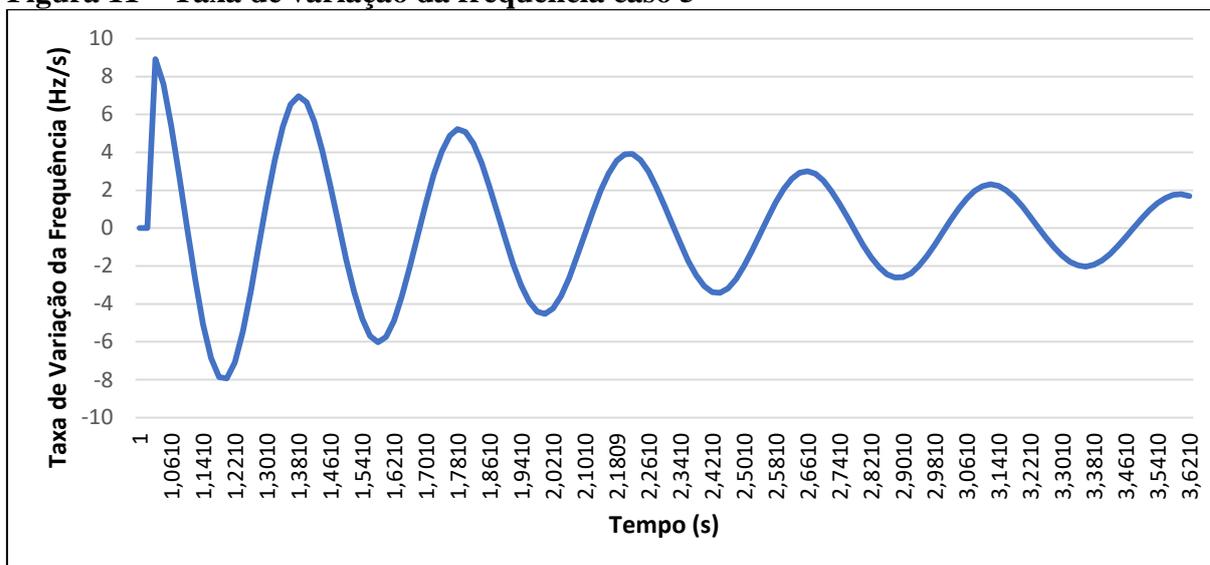
Para o caso 4, no instante de 1 segundo ocorre a abertura do religador, deixando a GD operando de forma ilhada, assumindo assim alimentação da carga conectada a barra de teste, vale destacar que a carga conectada nesse instante possui potência de 1,094 MW. A desconexão do religador causa um desequilíbrio entre carga e geração do sistema, fazendo com que a taxa de variação da frequência tenha uma considerável variação, de modo a atingir valores maiores que 5 Hz/s ao longo do tempo, como representado pela Figura 10.

Figura 10 – Taxa de variação da frequência caso 4

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Para o caso 4 os ajustes definidos pela norma Celesc I-432.0004 iriam detectar o ilhamento em um tempo de aproximadamente 360ms. O ajuste ideal em Hz/s seria de 0,3 Hz/s com tempo de atuação de 100ms.

A última situação proposta da mesma forma que nas apresentadas anteriormente a desconexão da concessionária de energia ocorre no instante de 1 segundo, deixando a geração fotovoltaica como única fonte de alimentação para as cargas conectadas a barra de teste, este evento causa um desequilíbrio entre a geração e carga, essa diferença provoca a variação da frequência ao longo do tempo com velocidade em Hz/s relativamente alta como mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Taxa de variação da frequência caso 5

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Para este caso o ajuste em Hz/s, definido pela norma Celesc I-432.0004 iria detectar o ilhamento em um período de tempo de aproximadamente 340ms. Os ajustes para esse caso seriam de 0,5 Hz/s com tempo de atuação de 140ms.

Para os casos simulados pode se notar que a taxa de variação da frequência muda consideravelmente de uma situação para outra, sendo que essa mudança é influenciada diretamente pelo valor da carga e tipo de geração conectada ao sistema no momento do ilhamento. Pode se notar que a variação do sistema em Hz/s abrange uma ampla faixa de valores, alguns no máximo a 0,008 Hz/s enquanto outros podem atingir valores de até 100 Hz/s.

Entretanto uma rede elétrica equipada com o rele ROCOF precisa detectar situações de ilhamentos não intencionais e atuar de maneira precisa, independentemente da situação. Para o ajuste da referida proteção, deve-se evitar os casos em que a taxa de variação é mínima, ou seja, menores que 0,1 Hz/s, pois as variações de carga-geração normais do sistema, como entrada e saída de carga ou geração, podem fazer o relé ROCOF atuar indevidamente. Sendo assim o estudo do sistema busca entender suas características e particularidades e assim definir o valor de ajuste que apresenta melhor resposta para todas as situações.

A Tabela 2 representa os ajustes da taxa de variação de frequência ideal para cada caso e o seu respectivo tempo para detecção de ilhamento.

Tabela 2 – Taxa de variação da frequência e tempo de detecção de ilhamento

Caso	Taxa Variação da frequência admitida em Hz/s	Tempo de detecção em mili segundos	Ajuste proposto pela I-432-0004	Sensibilizou a proteção
Caso 1	1	200	1 Hz/s	Sim
Caso 2	0,4	120	1 Hz/s	Sim
Caso 3	0,002	300	1 Hz/s	Não
Caso 4	0,3	100	1 Hz/s	Sim
Caso 5	0,5	140	1 Hz/s	Sim

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Nota-se na Tabela 2, que os valores são bastante diferentes e o ajuste da função ROCOF somente poderá assumir um valor de Hz/s e tempo de detecção de ilhamento sendo que esses devem servir para ambos os casos, assim o ajuste que atende a praticamente todos os casos simulados são os valores 0,3 Hz/s, com tempo de detecção de 100 mili segundos.

Ressalta-se que o ajuste definido não detecta o ilhamento para o caso 3, pois a velocidade com que a frequência varia no tempo é muito baixa, em torno de 0,004 Hz/s. Isso acontece devido à baixa carga de ilhamento em relação a potência da usina solar não ser suficiente para causar impactos que sensibilizem o relé. Para ser possível sua detecção por meio

da ROCOF seriam necessários valores muito baixos, de modo que não atenderiam as demais situações. Para este caso o ilhamento poderá ser detectado por outras funções de proteção agregadas ao sistema solar.

Outro aspecto importante é que o tempo de ajuste para detecção, proposto pela normativa Celesc I-432-0004 é muito alto, devendo o mesmo ser ajustado conforme simulações e estudo para cada instalação, visto que cada uma possui suas particularidades e devem ser avaliadas e tratadas de forma individual.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho demonstra que o relé de taxa de variação de frequência, comumente utilizado para a detecção de ilhamentos em sistemas de geração distribuída, apresenta um bom desempenho para detecção de ilhamentos não intencionais para cargas com potência igual ou maior que a da geração. Entretanto, para casos onde as cargas possuem potência menor que a da geração, a detecção por meio da função ROCOF se torna menos viável, visto que não se deve ajustar o ROCOF com valores de Hz/s muito baixos, pois a todo momento ocorrem pequenas oscilações de frequência no sistema, podendo desta forma causar acionamentos indesejados durante a entrada e saída de cargas do sistema.

Para casos onde a potência da carga é muito pequena em relação a geração, se faz necessário a utilização de métodos complementares para a detecção de ilhamentos, associados a função ROCOF, como por exemplo, a norma Celesc I-432-0004 define como complementar a função 78 - Salto de Vetor de Tensão.

Para fim de estudos futuros, sugere-se avaliar o emprego das funções 81R e 78 de maneira a verificar a complementariedade das funções entre si, de forma a observar se uma proteção atua na zona de não detecção da outra, aumentando o grau de proteção e segurança da rede elétrica, evitando acionamentos indesejados e interrupções desnecessárias.

Assim, vale ressaltar que a proteção anti-ilhamento baseada somente na função ROCOF não deve ser empregada de forma singular, pois, para cargas menores que a geração, a mesma não tem um desempenho satisfatório não operando em algumas situações.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR. Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/noticia/geracao-distribuida-cresce-7783-no-primeiro-semester-de-2020/>. Acesso em: 13 mai.2021.

A. G. DE BRITO, Moacyr; G. ALVES, Marcos; P. SAMPAIO, Leonardo; A. CANESIN, Carlos. **Estratégias De Anti-Ilhamento Aplicadas A Sistemas De Geração Distribuída Fotovoltaica**. Sobraep, Joinville, p. 226-234, 15 fev. 2018.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa** nº482/2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2021.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa** nº 687 de 24 de novembro de 2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2021.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa** nº674/2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015674.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2021.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. PRODIST. **Módulo 1** – Introdução. 2016.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. PRODIST. **Módulo 3** – Acesso ao Sistema de Distribuição. 2017.

BRASIL. **Decreto Nº 5.163** de 30 de julho de 2004. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5163.htm. Acesso em: 14 abr. 2021.

CELESC.SA. **Manual de Procedimentos**. I-432. 0004 Requisitos para a conexão de micro ou minigeradores de energia ao sistema elétrico da Celesc. Disponível em: <https://www.celesc.com.br/arquivos/normas-tecnicas/conexao-centrais-geradoras/conexao-micro-mini-geradores-out2020.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2021.

DRESCH, Rodolfo de Freitas Valle. **Análise do Efeito da Modelagem das Cargas nas Estimativas de Perdas Elétricas em Sistemas de Distribuição**. 2014. 70 p. Dissertação (Mestrado em Eng. Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/103754/000936973.pdf?sequence=1>. Acesso em: 13 abr. 2021.

EPE. Empresa de Pesquisa de Energia. **A Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 17 mar. 2021.

INEE. Instituto Nacional de Eficiência Energética. **O que é geração distribuída**. Disponível em: http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp. Acesso em: 17 mar. 2021.

LEAL GRANADOS, Josué Fernando. **Modelagem de Carga em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 2018. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.

LUNARDI, T. R **Detecção De Ilhamento em Sistemas de Distribuição com Múltiplos Geradores Distribuídos Utilizando Redes Neurais Artificiais**. 95 p. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2016.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações elétricas**: de acordo com a norma brasileira NBR 5419:2015. 9.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030**. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao490/PDE%202030_RevisaoPosCP_rv2.pdf. Acesso em: 31 mar. 2021.

PORTAL Solar: **A Energia Solar Fotovoltaica no Brasil**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/a-energia-fotovoltaica-no-brasil.html>. Acesso em: 25 mar. 2021.

SIMÕES MOREIRA, João, R. **Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética**. Local de publicação. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

TRINDADE DA SILVA, Humberto. **Estudo para método anti-ilhamento de sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição de baixa tensão com múltiplos inversores**. 2016. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica Universidade de São Paulo, 2016.

VIEIRA JR, José Carlos M; FREITAS, Walmir; FRANÇA, André L. Morelato. **Análise comparativa sobre a eficácia de relés baseados em medidas de frequência para detecção de ilhamento de geradores distribuídos**. Revista Controle & Automação, v. 16, p. 251-261, 31 ago. 2004.

VIEIRA JR, José Carlos M. **Detecção De Ilhamento De Geradores Distribuídos: Uma Revisão Bibliográfica Sobre O Tema**, 14 dez. 2011. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/234559539.pdf>. Acesso em: 6 maio 2021.

YOUTUBE. Etap software. **Como o ETAP pode ajudar a atender a NR-10**. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=WteZyOq7Cgs>. Acesso em: 08 mar. 2021.