



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
FACULDADE DE ARQUITETURA, ENGENHARIA E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ROBERT RODRIGUES SIQUEIRA

**AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS PASSIVAS DE DETECÇÃO DE ILHAMENTO EM
REDES AÉREAS E SUBTERRÂNEAS**

CUIABÁ – MT
DEZEMBRO, 2022

ROBERT RODRIGUES SIQUEIRA

**AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS PASSIVAS DE DETECÇÃO DE ILHAMENTO EM
REDES AÉREAS E SUBTERRÂNEAS**

Trabalho Final de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador:
Prof. Dr. Rogério Lúcio Lima

CUIABÁ – MT
DEZEMBRO, 2022

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

S618a Siqueira, Robert Rodrigues.

Avaliação de técnicas passivas de detecção de ilhamento em redes aéreas e subterrâneas [recurso eletrônico] / Robert Rodrigues Siqueira. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 77 f., il. color., pdf). -- 2022.

Orientador: Rogério Lúcio Lima.

TCC (graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Cuiabá, 2022.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://bdm.ufmt.br>.

Inclui bibliografia.

1. Geração Distribuída, Relés de proteção anti-ilhamento, Impactos da geração distribuída, Rede de Distribuição Aérea, Rede de Distribuição Subterrânea. I. Lima, Rogério Lúcio, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

DESPACHO

Processo nº 23108.102784/2022-21

Interessado: ROGERIO LUCIO LIMA, ROBERT RODRIGUES SIQUEIRA

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA MONOGRAFIA:

AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS PASSIVAS DE DETECÇÃO DE ILHAMENTO EM REDES AÉREAS E SUBTERRÂNEAS.

ALUNO: ROBERT RODRIGUES SIQUEIRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito para a obtenção de grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 15 de dezembro de 2022.

Nota: 9,00.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rogério Lúcio Lima

Orientador

Prof. Dr. Carlos Enrique Portugal Poma

Examinadora

Prof. Dr. Fillipe Matos de Vasconcelos

Examinador



Documento assinado eletronicamente por **ROGERIO LUCIO LIMA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 19/12/2022, às 15:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **FILLIPE MATOS DE VASCONCELOS, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 19/12/2022, às 17:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **CARLOS ENRIQUE PORTUGAL POMA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 21/12/2022, às 10:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5362158** e o código CRC **AE20733A**.

RESUMO

A busca por aumentar a eficiência e reduzir os impactos ambientais causados pela produção de eletricidade tem impulsionado a procura por novos métodos de gerenciamento do fluxo energético no sistema elétrico de potência, neste contexto a geração distribuída, ou seja, a conexão de geradores ao sistema de distribuição das concessionárias, se apresenta como uma alternativa que cresce constantemente no Brasil. Paralelamente a esse crescimento surgem normas e recomendações técnicas que estabelecem requisitos mínimos para a conexão dos novos produtores de energia elétrica ao sistema, dentre eles a proibição de geração de energia em caso de ilhamento, pois essa configuração coloca em risco a segurança de pessoas e equipamentos, além de impactar a qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores locais. Deste modo, este trabalho de conclusão de curso busca avaliar a detecção do fenômeno de ilhamento com os métodos passivos Taxa de Variação de Frequência (do inglês, Rate of Change of Frequency - Rocof) e Relé de Salto Vetorial (phase jump ou vector jump) verificando o comportamento destas duas proteções em ambientes de redes de distribuição aéreas e subterrâneas. Os métodos passivos foram testados no ambiente de Simulação Matlab/Simulink utilizando o sistema de teste IEEE 13 barras que apresenta em seus trechos com estas especificidades, foram realizados teste com 10 cenários de desbalanço da potência ativa buscando definir a zona de não detecção destes relés. Por fim, nos testes em ambiente de simulação foi verificado que o tipo de rede de distribuição não é fator determinante para alterar o comportamento dos relés perante a detecção do fenômeno de ilhamento, uma vez que não houve alteração nas zonas de não detecção em ambos os trechos submetidos a avaliação.

Palavras-chave: Geração Distribuída, Relés de proteção anti-ilhamento, Impactos da geração distribuída, Rede de Distribuição Aérea, Rede de Distribuição Subterrânea

ABSTRACT

The quest to increase efficiency and reduce the environmental impacts caused by electricity production has driven the search for new methods of managing the energy flow in the electric power system, in this context distributed generation, that is, the connection of generators to the power system. distribution by concessionaires, presents itself as an alternative that is constantly growing in Brazil. Parallel to this growth, standards and technical recommendations emerge that establish minimum requirements for the connection of new electricity producers to the system, among them the prohibition of energy generation in case of islanding, as this configuration puts the safety of people and equipment at risk. , in addition to impacting the quality of electricity supplied to local consumers. Thus, this course conclusion work seeks to evaluate the detection of the islanding phenomenon with the passive methods Rate of Change of Frequency (Rocof) and Vector Jump Relay (phase jump or vector jump) verifying the behavior of these two protections in aerial and underground distribution network environments. The passive methods were tested in the Matlab/Simulink Simulation environment using the IEEE 13 bus test system that presents in its sections with these specificities, tests were carried out with 10 scenarios of active power imbalance seeking to define the non-detection zone of these relays. Finally, in the tests in a simulation environment, it was verified that the type of distribution network is not a determining factor for changing the behavior of the relays when detecting the islanding phenomenon, since there was no change in the non-detection zones in both excerpts submitted for evaluation.

Keywords: Distributed Generation, Anti-islanding protection relays, Impacts of distributed generation, Overhead Distribution Network, Underground Distribution Network.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1– Evolução de carga instalada em MMGD Fonte: (EPE, 2021) | 15 |
| Figura 2 - Classificação dos Métodos de Detecção de Ilhamento | 23 |
| Figura 3 - Exemplo de ZND | 32 |
| Figura 4 - Diagrama Unifilar IEEE 13 Barras Fonte: (SAHA e JOHNSON, 2016) | 35 |
| Figura 5 - Circuito T equivalente de um transformador trifásico de dois enrolamentos. | 37 |
| Figura 6 - Bloco Disjuntor | 38 |
| Figura 7 - Bloco Cargas | 38 |
| Figura 8 - Diagrama de blocos simplificado do relé de taxa de variação de frequência. | 39 |
| Figura 9 - Diagrama de blocos simplificado do relé de deslocamento de Fase..... | 40 |
| Figura 10 - Taxa de Variação de Frequência no Trecho Aéreo | 43 |
| Figura 11 - Variação no Ângulo de Carga no Trecho Aéreo | 44 |
| Figura 12 - Variação de Tensão Terminal do Gerador no Trecho Aéreo | 45 |
| Figura 13 - Atuação do Relé ROCOF Trecho Aéreo | 46 |
| Figura 14 - Atuação do Relé de Deslocamento Vetorial - Trecho Aéreo..... | 47 |
| Figura 15 - Taxa de Variação de Frequência no Trecho Subterrâneo | 48 |
| Figura 16 - Variação no Ângulo de Carga no Trecho Subterrâneo | 49 |
| Figura 17 - Variação de Tensão Terminal do Gerador no Trecho Subterrâneo | 50 |
| Figura 18 - Atuação do Relé ROCOF Trecho Subterrâneo | 51 |
| Figura 19 - Atuação do Relé Deslocamento Vetorial Trecho Subterrâneo | 52 |
| Figura 20 - Comparação entre Cenários S01 - Relé ROCOF..... | 62 |
| Figura 21 - Comparação entre Cenários S02 - Relé ROCOF..... | 62 |
| Figura 22 - Comparação entre Cenários S03 - Relé ROCOF..... | 63 |
| Figura 23 - Comparação entre Cenários S04 - Relé ROCOF..... | 63 |
| Figura 24 - Comparação entre Cenários S05 - Relé ROCOF..... | 64 |
| Figura 25 - Comparação entre Cenários S06 - Relé ROCOF..... | 64 |
| Figura 26 - Comparação entre Cenários S07 - Relé ROCOF..... | 65 |
| Figura 27 - Comparação entre Cenários S08 - Relé ROCOF..... | 65 |
| Figura 28 - Comparação entre Cenários S09 - Relé ROCOF..... | 66 |
| Figura 29 - Comparação entre Cenários S10 - Relé ROCOF..... | 66 |
| Figura 30 - Comparação entre Cenários S01 - Relé Salto Vetor..... | 67 |
| Figura 31 - Comparação entre Cenários S02 - Relé Salto Vetor..... | 67 |

| | |
|---|----|
| Figura 32 - Comparação entre Cenários S03 - Relé Salto Vetor..... | 68 |
| Figura 33 - Comparação entre Cenários S04 - Relé Salto Vetor..... | 68 |
| Figura 34 - Comparação entre Cenários S05 - Relé Salto Vetor..... | 69 |
| Figura 35 - Comparação entre Cenários S06 - Relé Salto Vetor..... | 69 |
| Figura 36 - Comparação entre Cenários S07 - Relé Salto Vetor..... | 70 |
| Figura 37 - Comparação entre Cenários S08 - Relé Salto Vetor..... | 70 |
| Figura 38 - Comparação entre Cenários S09 - Relé Salto Vetor..... | 71 |
| Figura 39 - Comparação entre Cenários S10 - Relé Salto Vetor..... | 71 |
| Figura 40 - Diagrama Trifilar IEEE 13 Barras Fonte: (MATHWORKS, 2022)..... | 72 |
| Figura 41 - Conexão da GD no Trecho Aéreo Fonte: (MATHWORKS, 2022)..... | 72 |
| Figura 42 - Conexão da GD no Trecho Subterrâneo Fonte: (MATHWORKS, 2022)... | 73 |
| Figura 43 - Detalhes Matriz Fotovoltaica (MOACYR A. G. DE BRITO, 2011)..... | 73 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1- Cenários de simulação para os testes de sensibilidade das proteções - Cargas Resistivas | 42 |
| Tabela 2 - Tempo de Atuação das Proteção Anti-ilhamento | 53 |
| Tabela 3 - Dados de configuração da linha aérea | 74 |
| Tabela 4 - Dados de configuração da linha subterrânea | 74 |
| Tabela 5 - Dados do segmento da linha | 74 |
| Tabela 6 - Dados dos Transformadores | 74 |
| Tabela 7 - Dados dos Capacitores | 75 |
| Tabela 8 - Dados do regulador..... | 75 |
| Tabela 9 - Dados de carga | 76 |
| Tabela 10 - Dados de carga distribuídos..... | 76 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---------------------|---|
| AI | Anti-ilhamento |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| Art | Artigo |
| Conc | concessionaria |
| DC | Direct current |
| Dj | Disjuntor |
| EPE | Empresa de Pesquisa Energética |
| EUA | Estados Unidos da América |
| FP | Fator de Potência |
| GD | Geração Distribuída |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| MAE | Mercado Atacadista de Energia Elétrica |
| MMGD | Micro e minigeração distribuída |
| MPP | Máximo ponto de potência |
| MPPT | Maximum Power Point Tracking |
| NDU | Norma de Distribuição Unificada |
| ONS | Operador Nacional do Sistema Elétrico |
| PL | Projeto de Lei |
| PLCC | Power Line Carrier Communication |
| PRODIST Nacional | Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional |
| REN | Resolução Normativa |
| RLC | Resistor, Indutor e Capacitor |
| SCADA | Supervisory Control And Data Acquisition |
| SEP | Sistema Elétrico de Potência |
| ST | Subestação de Transferência |
| VSC | Voltage Source Converter |
| V _t | Tensão Terminal |
| ZND | Zona de não detecção |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------------|---|
| § | Parágrafo |
| $\frac{df}{dt}$ | Diferencial da frequência no tempo (taxa de variação de frequência) |
| $\Delta\delta$ | Ângulo de carga |

LISTA DE UNIDADES

| | |
|-------|------------------|
| Hz | Hertz |
| km | quilometro |
| kV | Quilo Volt |
| kVA | Quilo Volt-Amper |
| ms | milissegundo |
| MVA | Mega Volt-Amper |
| MW | Mega Watt |
| Pu | Por unidade |
| s | segundo |
| m^2 | metro quadrado |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. Introdução..... | 15 |
| 1.1 Problemática..... | 16 |
| 1.2 Justificativa | 17 |
| 1.3 Objetivos..... | 17 |
| 1.3.1 Objetivo Geral | 17 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos | 17 |
| 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO | 18 |
| 2. Referencial Teórico | 19 |
| 2.1 Regulamentação da Geração Distribuída..... | 19 |
| 2.1.1 Regulamentação Internacional..... | 19 |
| 3. Materiais e Métodos | 33 |
| 4. Simulação Computacional | 34 |
| 4.1 SimPowerSystems | 34 |
| 4.2 Sistema Modelado | 34 |
| 4.2.1 Modelagem dos elementos do Sistema..... | 36 |
| 4.2.1.1 Gerador Fotovoltaico..... | 36 |
| 4.2.1.2 Subsistema de Supervisão e Controle | 36 |
| 4.2.1.3 Transformadores | 37 |
| 4.2.1.4 Disjuntores | 38 |
| 4.2.1.5 Cargas | 38 |
| 4.3 Modelagem dos Relés de Proteção..... | 39 |
| 4.3.1 Relé de taxa de variação de frequência..... | 39 |
| 4.3.2 Relé de Salto Vetorial (Deslocamento de fase)..... | 40 |
| 5. Simulações e Resultados..... | 41 |
| 5.1 Testes de Sensibilidade das Proteções..... | 41 |
| 5.1.1 Trecho Aéreo | 42 |
| 5.1.2 Trecho Subterrâneo..... | 48 |

| | |
|--|----|
| 6. Análise dos Resultados | 54 |
| 7. Considerações Finais | 56 |
| 7.1 Sugestões Para Trabalhos Futuros | 56 |
| Referências | 57 |
| APÊNDICE A..... | 62 |
| ANEXO | 72 |

1. Introdução

A busca por aumentar a eficiência e reduzir os impactos ambientais causados pela produção de eletricidade tem impulsionado a procura por novos métodos de gerenciamento do fluxo energético no sistema elétrico de potência. Com o surgimento de novas tecnologias os micros e pequenos geradores de energia propiciaram uma nova categoria de geradores de energia, os geradores distribuídos (GD).

Segundo (BACELAR, 2013) a GD pode ser definida como a geração de energia elétrica próxima do consumidor, ligada à rede de distribuição. Este sistema de produção local gera vantagens em diversos aspectos, desde a redução na incidência de impostos até em alguns casos a melhora da qualidade de energia local (BORGES, 2017). Além disso, alinha-se as demandas ambientais, pois centrais eólicas, solares, a biomassa e pequenas centrais hidroelétricas são fontes de energia renováveis. (MARCHESAN, 2016)

No Brasil, as motivações para a implantação da geração de energia elétrica de forma distribuída surgem atreladas a fatores como o aumento das tarifas de eletricidade, a reestruturação do setor elétrico com a permissão de comercialização de energia e consumo livre, além da conscientização dos problemas e impactos ambientais ocasionados pelos grandes empreendimentos para geração de energia. (NICOLOTTI, SILVA e JORGE, 2011)

O Governo Federal através de suas agências reguladoras como resultado disso atuou em prol de criar a regulamentação da geração distribuída em 2012 através da Resolução Normativa N° 482 da ANEEL. (DE MELLO CAMPOS, 2018). Posterior a publicação desta norma conforme dados do BEN 2021 houve significativos incrementos da contribuição dos geradores distribuídos no sistema elétrico nacional conforme figura abaixo:

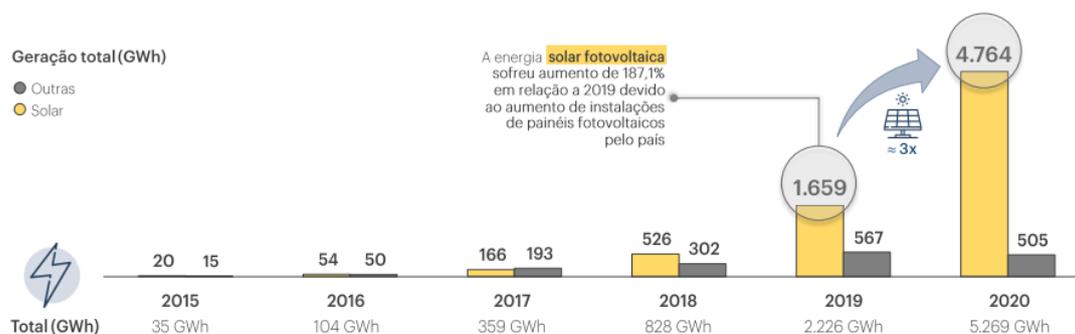


Figura 1– Evolução de carga instalada em MMGD

Fonte: (EPE, 2021)

Apesar de benéfico, a inclusão de geração distribuída traz consigo diversos desafios ao projeto e operação do sistema elétrico ao qual será conectada, pois tanto a concessionária quanto o proprietário da geração distribuída devem garantir que a instalação seja projetada de forma que a operação ocorra de maneira segura e confiável. E um destes desafios consiste na eficácia do sistema em identificar corretamente a condição de ilhamento. O ilhamento surge a partir do momento que o sistema de GD continua a disponibilizar potência à rede de distribuição ainda que o fluxo de potência da rede principal esteja interrompido, tal situação pode causar riscos às equipes de manutenção que realizam algum tipo de reparo, aos equipamentos da unidade de GD e à própria carga que se encontra no sistema ilhado (YE, DAME e KROPOSKI, 2005).

Assim, para sua detecção, o sistema de geração deve contar com função anti-ilhamento (AI) que aciona as proteções devidas. Esta função pode ter respostas variadas no acionamento da proteção, na capacidade de detecção da ilha ou na degradação da qualidade da energia da rede elétrica, a depender da técnica utilizada para sua detecção bem como no perfil de carga. (SILVEIRA, 2020)

Neste cenário, diversas soluções, diretamente ligadas ao sistema de proteção vêm sendo discutidas visando garantir a correta operação do sistema de geração distribuída, tornando-se fundamental à realização de análises para cada nova instalação a ser interconectada ao sistema elétrico e nos fatores que influenciam a eficácia dessas soluções. (NICOLOTTI, SILVA e JORGE, 2011)

1.1 Problemática

Um requisito de suma importância para a integração de sistemas de GD está associado à capacidade do sistema em detectar a condição de Ilhamento. A configuração de ilhamento pode causar transtornos para a concessionária, uma vez que ela é a responsável pela qualidade de energia fornecida para os consumidores que pode ficar comprometida. Outro fator de suma importância está no fato de que o ilhamento pode oferecer risco a vida, pois certas áreas podem continuar energizadas sem o controle e conhecimento da concessionária o que coloca em risco as equipes de manutenção, assim como aos consumidores em geral. (MULHAUSEN, 2010)

A inclusão de Geradores Distribuídos provoca ainda alterações no sistema de distribuição, que faz com que a operação do sistema ocorra de acordo com diferentes cenários, trazendo novas questões para o projeto e manutenção do sistema de proteção. O ilhamento de geradores distribuídos pode apresentar problemas quando ocorre o

religamento dos circuitos ou o fechamento de geradores fora de sincronismo, situações estas que podem acarretar danos elétricos e mecânicos em equipamentos. A fim de evitar situações incompatíveis de funcionamento, é essencial que as proteções gerais de cada gerador sejam acertadamente projetadas. Teste de sensibilidades aplicados a relés passivos de detecção de ilhamento demonstram que eles responderam de diferentes formas em cenários de variação do perfil de carga, com alteração em sua capacidade de detecção da condição de ilhamento. (NICOLOTTI, SILVA e JORGE, 2011). Desta forma, este trabalho destina-se a investigar se, assim como ocorre com a variação no perfil de carga: Existe influência do tipo de rede de distribuição na detecção passiva de ilhamento?

1.2 Justificativa

A detecção de ilhamento é uma função de proteção fundamental e obrigatória para todo o gerador distribuído. Deste modo, torna-se de suma importância a pesquisa, análise e comparação dos diferentes métodos utilizados para o adequado funcionamento destes sistemas de geração conectados à rede, a fim de assegurar a operação com segurança, a qualidade e confiabilidade destes sistemas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar o desempenho das técnicas de detecção de ilhamento passivas perante alterações nos parâmetros da rede de distribuição

1.3.2 Objetivos Específicos

- Revisão Bibliográfica dos métodos de detecção de ilhamento passivos bem como da legislação pertinente.
- Elencar as características destas técnicas passivas e da influência das redes aéreas e subterrâneas na detecção de ilhamento.
- Avaliar o desempenho dos métodos propostos através de simulações em um sistema teste.
- Comparar o desempenho das metodologias passivas comumente utilizadas (Relés de taxa de variação de frequência e Deslocamento Vetorial) de forma a verificar em que circunstâncias cada método é mais adequado.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em sete capítulos. O primeiro capítulo é destinado à apresentação do trabalho, contextualizando o tema, o problema a ser resolvido e as justificativas que levam ao estudo do problema.

O segundo capítulo trata da fundamentação teórica, regulamentação da geração distribuída, as principais legislações, procedimentos e normas de âmbito nacional e internacional, apresentando também a teoria das proteções anti-ilhamento, seu funcionamento e utilização, com foco nos relés de taxa de variação de frequência e salto vetorial.

O terceiro capítulo descreve o planejamento e a metodologia das atividades e as diretrizes básicas adotadas para a execução da pesquisa

O quarto capítulo trata da descrição da simulação, como o sistema modelado, da ferramenta computacional utilizada, pontos de acoplamento, e especificações dos itens modelados.

O quinto capítulo apresenta os resultados obtidos nos cenários de simulação

O sexto capítulo aborda a análise dos resultados e o sétimo trata das considerações finais

2. Referencial Teórico

2.1 Regulamentação da Geração Distribuída

A vanguarda em incentivar a geração distribuída ocorreu em 1978 nos Estados Unidos da América (EUA), com mudanças na legislação promovidas devido à crise econômica mundial. As alterações tinham como objetivo reduzir o consumo crescente e a dependência do petróleo, visando investir em fontes alternativas de energia. Os principais pontos de mudança focavam na publicidade dos custos das grandes concessionárias em diversas épocas do ano para que estes custos fossem adotados como parâmetro na remuneração dos excedentes energéticos dos autoprodutores habilitados de modo que estes excedentes fossem comprados pela concessionária. Para ser favorecido por esta legislação, o autoprodutor deveria utilizar fontes renováveis. (GONÇALVES, 2004)

Na Europa, países como França, Alemanha, Itália e Dinamarca desenvolveram programas voltados para a geração distribuída de forma a diminuir e buscarem alternativas ao consumo de combustíveis fósseis (BORBELY e KREIDER, 2001)

De acordo com (LORA e HADDAD, 2006), no início da década de 90, poucas indústrias brasileiras usavam a cogeração para suprir suas necessidades de calor e eletricidade. Porém seguindo a tendência mundial, no Brasil cresceram os estudos para viabilizar a geração distribuída, por motivos tais como, aumento de custo de importação de equipamentos, tarifas de eletricidade, altas tarifas de gás natural, dentre outros. Com a reestruturação do setor elétrico nacional, o que antes era um problema predominantemente técnico, passou a ter sua complexidade aumentada, saindo de um sistema de monopólio verticalizado para um sistema com diversas questões técnicas e comerciais. (INEE, 2002).

2.1.1 Regulamentação Internacional

Devido a sua complexidade e as diversas soluções utilizadas na geração distribuída, em todos os locais em que ela é empregada é indispensável fazer o uso de normas técnicas específicas para garantir a correta operação da geração no sistema elétrico, sem causar danos ao gerador distribuído, ao sistema elétrico e a terceiros. (REZENDE, 2015) Dessa forma, serão apresentadas a seguir de forma sucinta a principal norma internacional sobre geração distribuída.

2.1.1.1 IEEE 1547 - 2003: IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems

Publicada em 28 de julho de 2003 a norma técnica IEEE 1547 - 2003 é a primeira norma da série 1547 de padrões de interconexão sendo considerada um marco para o desenvolvimento de outras normas. Esta norma tem por objetivo apresentar os requisitos para a conexão de tecnologias de geração distribuída, com capacidade menor ou igual a 10 MVA, ao sistema elétrico de potência em tensão primária ou secundária fornecendo um padrão uniforme para interconexão de recursos distribuídos com sistemas de energia elétrica. Ela fornece requisitos relevantes para o desempenho, operação, testes, considerações de segurança e manutenção da interconexão. A norma apresenta requisitos técnicos de interconexão, abordando os seguintes temas:

- Regulação de tensão: a geração distribuída não deve modificar o valor da tensão do ponto de acoplamento e do sistema elétrico.
- Aterramento: o sistema de aterramento da geração distribuída não deve provocar sobretensão e não pode causar interferência na proteção à terra;
- Sincronização: o gerador distribuído ao operar em paralelo com o sistema elétrico não deve causar uma flutuação de tensão superior a $\pm 5\%$ no nível de tensão do ponto de acoplamento;
- Rede local de distribuição secundária: A proteção da geração distribuída não deve interferir no sistema de proteção de outros consumidores no sistema elétrico local;
- Monitoramento: unidades de geração distribuída com potência instalada maior ou igual a 250 kVA devem ter monitoramento das condições de potência ativa, potência reativa e tensão do ponto de acoplamento;
- Dispositivo de isolamento: deve ser localizado entre a geração distribuída e o sistema elétrico;
- Capacidade de resistir a surtos: o sistema de interconexão deve suportar surtos de tensão e corrente respeitando as normas IEEE Std C62.41.2-2002 e IEEE Std C37.90.1-2002;
- Dispositivo de paralelismo: o dispositivo de paralelismo deve suportar 220% da tensão nominal do sistema de interconexão.

A norma IEEE 1547 - 2003 também especifica os procedimentos necessários que o gerador distribuído deve seguir mediante operação não nominal do sistema elétrico. Estes procedimentos descritos na norma são:

- Faltas no sistema elétrico: em caso de faltas no sistema elétrico da distribuidora, a geração distribuída deve parar de fornecer energia ao sistema elétrico;
- Coordenação de religamento: após eliminadas as faltas é necessário que o sistema elétrico retorne ao seu funcionamento normal para depois a geração distribuída fornecer energia ao mesmo.
- Tensão: quando há tensão não nominal proveniente da geração distribuída, essa geração deve ser desconectada do sistema elétrico respeitando o tempo previsto nesta norma. O tempo para desconectar a geração distribuída depende do valor da tensão medida em relação à porcentagem da tensão nominal.

2.1.2 Regulamentação Nacional

A base para definição, regulamentação de geração distribuída e reestruturação do setor elétrico brasileiro em geral, deram-se principalmente através dos seguintes decretos e leis:

- Lei nº 9.074 de 07/07/1995, que estabeleceu normas para outorga e prorrogação de concessões e permissões de serviços públicos; (LEI Nº 9.074, 1995)
- Lei nº 9.427 de 26/12/1996, que instituiu a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e disciplinou o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e deu outras providências; (LEI Nº 9.427, 1996)
- Lei nº 9.648 de 27/05/1998, que alterou dispositivos de leis anteriores e autorizou o Poder Executivo a promover a reestruturação das Centrais Elétricas Brasileiras, ELETROBRÁS e de suas subsidiárias, além de outras providências; (LEI Nº 9.648, 1998)
- Decreto nº 2.003 de 10/09/1996, que regulamentou a produção de energia elétrica por Produtor Independente e por autoprodutor; (DECRETO Nº 2.003, 1996)
- Decreto nº 2.655 de 02/07/1998 (com alterações dadas no Decreto nº 3.653 de 07/11/2000), que regulamentou o Mercado Atacadista de Energia Elétrica (MAE), definindo a organização do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). (DECRETO Nº 2.655, 1998)

- Decreto nº 2.335 de 06/10/1997, referente à ANEEL, aprovando a estrutura regimental e o quadro demonstrativo dos cargos em comissão e funções de confiança e outras providências; (DECRETO Nº 2.335, 1997)
- § 6º do Art.15 da Lei 9.074 e o Art.13 do Decreto 2.003, assegurando ao Produtor Independente e ao Autoprodutor o livre acesso aos sistemas de transmissão e distribuição de concessionários, mediante compensação do custo de transporte envolvido.
- Resolução Normativa 482 de Abril de 2012: Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) publica a REN que estabelece o sistema de compensação de energia elétrica. (REN 482, 2012)
- Resolução Normativa 687 de Novembro de 2015: Aneel publica a REN, que introduz alterações em relação a REN 482, como novos limites de potência, prazo de resposta da distribuidora, padronização de solicitação de acesso, ampliação da validade dos créditos e novas modalidades de GD. (REN 687, 2015)
- Novembro de 2019: Apresentação do Projeto de Lei 5829/19, propondo a criação do marco legal da micro e minigeração distribuída. (PL 2829, 2019)
- Agosto de 2021: Aprovação do PL 5829/19 no plenário da Câmara dos Deputados com placar de 476 votos a favor e 3 contra. (Marco legal da GD, 2022)
- Janeiro de 2022: O presidente da República, sancionou o PL 5829/19 com dois vetos, convertendo o marco legal da GD na Lei 14.300 de 06/01/2022. (Marco legal da GD, 2022)

Este trabalho foi baseado nas seguintes normas da ANEEL e concessionárias:

- NDU 013 – Critérios para a Conexão em Baixa Tensão de Acessantes de Geração Distribuída ao Sistema de Distribuição. (ENERGISA, 2022)
- PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, em especial os módulos 1, 3, 5 e 8; (ANEEL, 2022)
- Procedimentos de Rede do ONS, módulos 3 e 11, que trata de conexão e proteção respectivamente. (ONS, 2022)

2.2. Proteções Utilizadas na Detecção de Ilhamento

As técnicas utilizadas para detecção de ilhamento são classificadas em função de seus modos de operação. Existem duas classes principais que são subdivididas. Dentro de cada subclasse existem inúmeras técnicas de detecção e a determinação de uma ou mais delas depende de sua viabilidade técnica e econômica. (XU, MAUCH e MARTEL, 2004) Na figura abaixo é apresentada uma visão geral dessa classificação.

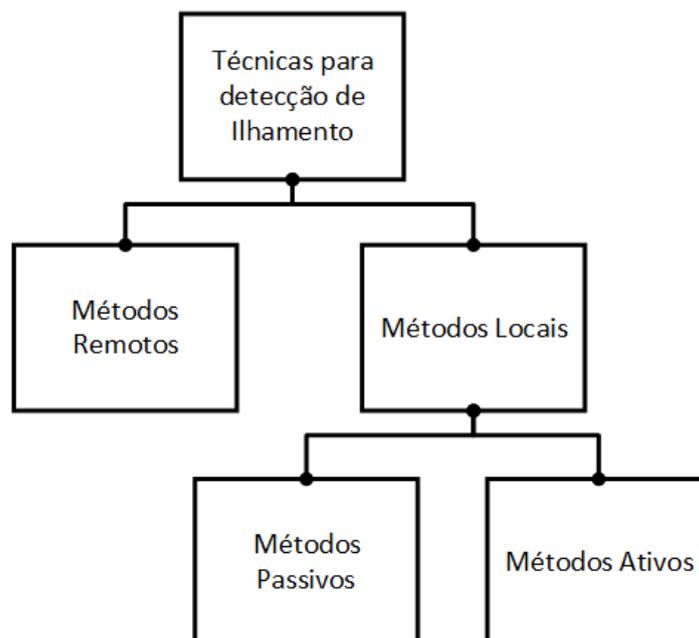


Figura 2 - Classificação dos Métodos de Detecção de Ilhamento
Fonte: Autoria própria

2.2.1. Técnicas Remotas

Essas técnicas envolvem algum tipo de comunicação entre a concessionária, os dispositivos de proteção e manobra presentes na rede elétrica e os geradores distribuídos. A principal vantagem do emprego dessas técnicas é a elevada eficácia na identificação de situações de ilhamento. Como desvantagens estão os altos custos da instalação, uma vez que envolve o uso de esquemas sofisticados de comunicação, controle e aquisição de dados. Dessa forma, torna-se uma opção pouco atraente para pequenos geradores distribuídos. As principais técnicas remotas são relacionadas nos itens seguintes:

Técnicas baseadas em sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition):

Embora sistemas do tipo SCADA sejam muito utilizados em redes de transmissão em virtude da rápida resposta frente a anomalias na rede, tais sistemas ainda são pouco empregados em redes de distribuição devido ao alto custo. Em esquemas de proteção

contra ilhamento, a ideia é monitorar os estados de todos os disjuntores da rede elétrica desde a subestação da concessionária até os geradores distribuídos. Na ocorrência de um evento que provoque um ilhamento, o sistema SCADA identifica a área isolada e um esquema de tele proteção pode ser utilizado para comandar o desligamento dos geradores distribuídos. Embora seja eficiente, os custos da implantação desse sistema são elevados e tendem a crescer conforme a complexidade da rede aumenta, pois também aumenta o número de disjuntores que devem ser monitorados. (JR, 2011)

2.2.1.1 Técnicas Baseadas em Sistema PLCC (Power Line Carrier Communication):

O funcionamento deste tipo de esquema envolve basicamente um gerador de sinais conectado ao secundário do transformador da subestação da concessionária, que envia sinais de baixa frequência (tipicamente inferiores a 500 Hz) de maneira contínua para todos os alimentadores (ROPP, AAKER, et al., 2000). Para que o sistema funcione de maneira efetiva todos os geradores distribuídos devem ser equipados com dispositivos capazes de receber esses sinais. Os sinais são transmitidos pela própria rede elétrica e se algum gerador distribuído não recebe o sinal enviado pelo transmissor instalado na subestação, o sistema interpreta como que há uma condição de ilhamento, pois em tese o circuito que interliga a subestação ao gerador distribuído foi interrompido. Logo, o gerador distribuído é imediatamente desconectado. Entre as vantagens do sistema de comunicação PLCC destacam-se a sua confiabilidade, uma vez que existe apenas um transmissor de sinais envolvido, e sua facilidade de implementação é reforçada pelo fato de que mudanças na topologia da rede elétrica não afetam o desempenho do sistema (JR., 2011). Uma desvantagem se encontra no fato dos elevados custos do transmissor e do receptor de sinais, principalmente do transmissor, pois é um dispositivo para ser instalado em média tensão.

Seguindo a ideia de usar a própria rede de distribuição de energia como meio de comunicação, em (VIEIRA, FREITAS, et al., 2008) os autores propõem um esquema baseado no conceito de tele proteção que opera da seguinte forma: na subestação de distribuição existe um gerador de sinais que transmite constantemente sinais de alta frequência (centenas de Hertz) via rede de distribuição. Em cada gerador distribuído existe um receptor para esses sinais, que, se não forem recebidos, indicam que houve a ocorrência de ilhamento, com a consequente desconexão imediata dos geradores. Os autores realizaram diversos testes em simulação e em campo para poder identificar quais

fatores influenciaram a transferência do sinal e desenvolveram algoritmos de detecção dele.

2.2.1.2 Rede de Comunicação de Dispositivos de Proteção

Neste arranjo, todos os dispositivos usados nos sistemas de proteção anti-ilhamento de diferentes geradores distribuídos são conectados por uma rede de comunicação e precisam trocar informações para reduzir a ocorrência de falsa operação e aumentar a confiabilidade da detecção.

Em (BRIGHT, 2001) é apresentado um exemplo de uso desta técnica que consiste em uma rede de comunicação estabelecida entre relés tipo taxa de variação de frequência (df/dt). A solução se resume na instalação um relé tipo df/dt na subestação da concessionária, que emite sinais com informações da taxa de variação da frequência medida naquele ponto, agrupada com um sinal de bloqueio. Esses sinais são enviados a todos os outros relés tipo df/dt instalados nos geradores distribuídos ao longo da rede de distribuição, sendo que o sinal de bloqueio, quando recebido, impede a atuação desses relés. Portanto a todo momento é feita a comparação entre a taxa de variação da frequência recebida (a qual foi medida na subestação) com sua própria medida. Havendo diferença entre esses valores, o sistema de proteção compreende que houve ilhamento e o sinal de bloqueio desaparece, habilitando assim os relés dos geradores distribuídos a operar para abrir os respectivos disjuntores. O uso desta técnica não melhora a capacidade de detecção de ilhamento do relé, apenas diminui a possibilidade de falsa operação devido a perturbações no sistema de transmissão.

2.2.2. Técnicas Locais

O princípio fundamental das técnicas locais é detectar o ilhamento usando medidas de tensões, correntes, frequência ou outra grandeza elétrica disponíveis no local de instalação do gerador distribuído. Essas técnicas são classificadas em passivas e ativas, as quais são detalhadas nos itens subsequentes.

2.2.2.1 Técnicas Passivas

São técnicas fundamentadas em medidas de grandezas elétricas no ponto de interconexão entre o gerador distribuído e o sistema elétrico, sendo o ilhamento identificado se houver variações das grandezas medidas. Os esquemas de proteção contra ilhamento que empregam relés baseados em medidas de frequência são os mais difundidos dentro das técnicas passivas (JENKINS, ALLAN, et al., 2000). Quando existe

um grande desequilíbrio de potência entre a geração e a carga da rede ilhada, na ocorrência do ilhamento há uma variação significativa da frequência elétrica do subsistema isolado. Deste modo, são esquemas bastante atrativos, sobretudo pelo baixo custo de implementação e fácil instalação, no entanto seu desempenho é negativamente afetado caso a diferença entre geração e carga seja pequena. A escolha dos ajustes dos dispositivos de proteção que compõem esse esquema deve ser meticulosamente elaborada para minimizar a ocorrência de atuação incorreta, que pode ocorrer em razão de chaveamentos de cargas ou curtos-circuitos, por exemplo.

Relés de sub e sobrefrequência são muito empregados nesse tipo de sistema de proteção. Um outro tipo de relé baseado em medida de frequência muito aplicado em sistemas de proteção anti-ilhamento é o relé de taxa de variação de frequência df/dt , pois agiliza a detecção do ilhamento, sobretudo quando a frequência varia lentamente (JENKINS, ALLAN, et al., 2000) (XU, MAUCH e MARTEL, 2004).

Relés de deslocamento de fase, conhecidos como “Salto de Vetor”, também são empregados para detecção de ilhamentos em geração distribuída (JENKINS, ALLAN, et al., 2000) (XU, MAUCH e MARTEL, 2004). Seu princípio de funcionamento está baseado em medidas do ângulo da tensão do gerador. Quando este ângulo excede um valor pré-definido o relé então envia o sinal de desconexão do gerador. Apesar de serem muito difundidos estes relés assim como os relés df/dt podem não detectar o ilhamento caso haja equilíbrio entre a potência ativa consumida e gerada na ilha formada.

Esquemas de proteção contra ilhamentos que empregam relés baseados em medidas do módulo da tensão também são utilizados. (ISHIBASHI, IMAI, et al., 2004) A intensidade da variação da tensão é diretamente relacionada ao valor do desbalanço de potência reativa no sistema ilhado. Ou seja, quanto maior o desbalanço de potência reativa no momento do ilhamento mais eficiente será o sistema de proteção baseado nessas medidas de tensão. Neste arranjo são mais utilizados os relés de sub e sobre tensão

Existe outras técnicas de detecção de ilhamento que são menos convencionais. Como exemplo, há um método que monitora a variação da potência ativa dP/dt fornecida pelo gerador (FUNABASHI, KOYANAGI e YOKOYAMA, 2008). Esta técnica se baseia no princípio de que a taxa de variação da potência ativa do gerador é maior no momento que ocorre o ilhamento do que em condições normais de chaveamento de cargas. Os testes práticos demonstraram que o método é válido quando o desbalanço entre geração e cargas na rede ilhada é grande, porém, apresentou baixo desempenho em situações de equilíbrio entre geração e carga. Este sistema também se mostrou ineficiente

em geradores onde a variação de potência de saída do gerador é característica intrínseca, como ocorre com a geração eólica.

Existem também propostas que consistem em de esquemas de proteção adaptativos. Neste contexto, (PITOMBO, JÚNIOR e MELO, 2010) propõe sistema adaptativo, off-line que altera os ajustes dos dispositivos de proteção anti-ilhamento, conforme o desbalanço de potência ativa nas possíveis ilhas varia ao longo de um período. Em simulações, os resultados foram satisfatórios sendo os ilhamentos detectados durante grande parte do período de observação. O principal desafio desse método é o conhecimento da variação da carga. Como o método não emprega ferramentas on-line, ele deve receber informações sobre a curva de carga do alimentador. Logo, seu desempenho é extremamente dependente da fidedignidade dessas informações.

Embora haja diversas técnicas passivas, nenhuma delas é completamente infalível para detectar ilhamento para todas as situações com a qual o gerador e o sistema elétrico estão propensos. Isso faz com que essas técnicas tenham zonas de não detecção (TRINDADE, MEIRA, et al., 2010) que podem assumir tamanhos diferentes em função dos ajustes dos dispositivos de proteção.

Quanto mais sensíveis os ajustes dos relés mais o sistema estará propenso a falsas operações, porém a zona de não detecção é diminuída. (VIEIRA, FREITAS, et al., 2008). Logo, em se tratando das técnicas passivas, o grande desafio é minimizar as zonas de não detecção e reduzir as falsas operações de modo a se aumentar a confiabilidade do sistema. Na busca destes objetivos outras soluções foram desenvolvidas, as técnicas ativas surgiram de modo a tentar contornar esses problemas com zonas de não detecção muito pequenas ou até irrelevantes. Este tópico é discutido nas seções seguintes.

2.2.2.1.1 Relé de Taxa de Variação de Frequência

Do inglês rate of change of frequency (ROCOF), o relé de taxa de variação, é um relé para proteção de Geradores Distribuídos que tem sido amplamente estudado e utilizado nos últimos anos, devido principalmente a sua eficácia em detectar pequenas variações de frequência no sistema. Quando o desbalanceamento de carga na configuração de ilhamento for pequeno, a frequência irá variar de forma lenta, de modo que os relés de sub/sobrefrequência não atuam (VIEIRA, 2008), dessa forma a grandeza taxa de variação de frequência no tempo é utilizada para auxiliar a detecção de mudanças lentas na frequência do sistema elétrico. Estudos demonstram que este relé é eficaz para ser utilizado como proteção contra ilhamento para determinadas condições, nas quais as

variações de frequência, possam ocorrer e afetar o correto funcionamento do sistema elétrico (CIGRÉ WORKING GROUP, 2010).

A função ROCOF, quando ajustada de forma muito sensível, pode disparar e gerar a abertura de um disjuntor ou religador do ponto de conexão de maneira incorreta. Esse disparo pode ser gerado através de flutuações de frequência ocasionadas pela entrada ou saída de grandes cargas e através da extinção de correntes de faltas. Sendo assim esse disparo pode gerar a abertura de um religador, e fechamento automático do mesmo pode causar um dano no sistema, caso o gerador e a rede venham a ficar fora de sincronismo, podendo inclusive gerar danos mecânicos às máquinas dos geradores distribuídos conectados ao sistema (JENKINS, ALLAN, et al., 2000). Para reduzir a possibilidade de acionamentos incorretos, o processador do relé deve efetuar no mínimo dois cálculos para verificar que a variação de frequência atingiu um limite crítico para assim então enviar o sinal de disparo ao sistema de proteção, de modo a evitar assim o disparo em fenômenos transitórios temporários. De modo a reduzir a atuação incorreta do relé e, situações em que ocorre a perturbação na frequência fundamental por motivos diferentes a do ilhamento é recomendado configurar um tempo de atraso (time delay) para a atuação do relé (CIGRÉ WORKING GROUP, 2010).

O desempenho dos relés ROCOF estão diretamente relacionados à quantidade de GD conectada ao sistema. Quando havia poucos geradores distribuídos conectados a rede, os relés ROCOF apresentavam um desempenho satisfatório possuindo uma detecção rápida e precisa. Porém, com o aumento de geradores distribuídos no sistema, a confiabilidade dessa proteção se torna um importante desafio. Quanto maior o número de geradores distribuídos conectados ao sistema, mais sensíveis são os ajustes indicados para a atuação do relé ROCOF, visando aumentar a eficiência do sistema de proteção (CIGRÉ WORKING GROUP, 2010). Porém o aumento no valor do ajuste do relé traz consigo outra consequência: a dificuldade em detectar o ilhamento quando a potência gerada é muito próxima a potência da carga ilhada pois nestas condições a variação de potência ativa é muito pequena e por conseguinte a variação de frequência no tempo (df/dt) é baixa, por vezes sendo inferior ao ajustado no relé. Por outro lado, quando o relé ROCOF é ajustado com alta sensibilidade, a proteção se torna instável, trazendo uma baixa confiabilidade a ao sistema e faz com que seja então necessário métodos adicionais para que a proteção seja eficiente na prática. Contudo esta proteção é considerada apropriada para uso em sistemas de distribuição não sendo adequada para sistemas de subtransmissão, os quais podem ter transitórios longos que afetam o desempenho do relé

ROCOF (JENKINS, ALLAN, et al., 2000). O relé de taxa de variação de frequência tem sido amplamente utilizado pelas concessionárias de energia ao redor do mundo em países como: Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, Itália e Reino Unido apesar dos pontos de desempenho citados anteriormente. Os ajustes para o ROCOF variam de sistema para sistema, de acordo com a janela de medição utilizada e com o algoritmo específico do relé empregado. O relé ROCOF pode ser utilizado associado ao relé de subtensão, para bloquear a operação do ROCOF quando a magnitude da tensão do sistema estiver abaixo de um valor determinado, evitando deste modo disparos impróprios, em situações para as quais outras funções de proteção devem atuar como por exemplo faltas. (VIEIRA, 2005)

2.2.2.1.2 Relé de Salto Vetorial (Deslocamento de Fase)

O relé de salto vetorial, (vector shift) função 78, também conhecido como salto vetor (phase jump ou vector jump) ou ainda relé de deslocamento de fase (phase displacement), analisa a variação angular da tensão que ocorre nos terminais do gerador. Assim como o relé ROCOF, o relé de salto vetorial tem ganhado espaço nos últimos anos devido à expansão do sistema de geração distribuída e à necessidade de melhoria dos métodos tradicionais para a detecção do ilhamento (CIGRÉ WORKING GROUP, 2010)

Este método passivo possui um algoritmo de cálculo baseado na diferença angular das tensões de fase, as quais podem ser medidas apenas em uma fase do circuito, ou em todas as três fases, sendo que a utilização das grandezas trifásicas para a medição apresenta vantagens sobre a medição monofásica, pois torna o algoritmo menos suscetível a distorções harmônicas e outras interferências assimétricas do sistema (CIGRÉ WORKING GROUP, 2010). O princípio de funcionamento desta função de proteção é baseado na variação angular entre a tensão interna do gerador e a tensão nos terminais ($\Delta\delta$ variação do ângulo de carga do gerador). Quando o gerador distribuído continua a atender a uma carga na situação de ilhamento, no momento da perda da rede principal (rede da concessionária) ocorre uma variação no ângulo de carga do gerador, pois a tensão V_t oscila no momento da desconexão da rede. A alteração angular sofrida $\Delta\delta$ ocasionará um aumento ou diminuição na duração do ciclo da tensão. (NAISANI, THOLOMIER, et al., 2010)

O relé de proteção pode realizar a medição do ângulo entre as tensões em cada fase a cada meio ciclo, por exemplo. Após esta medição, um é feita uma comparação com

a diferença angular entre a medição atual e a anterior, comparando em seguida o resultado com o valor de limiar pré-definido. Para aumentar a estabilidade do relé de proteção, pode-se utilizar esta função em conjunto com as funções de subtensão e/ou sobre tensão para evitar disparos incorretos, como por exemplo, quando da ocorrência de contingências no sistema da concessionária para as quais outras proteções, diferentes dos relés anti-ilhamento, devem atuar. (CIGRÉ WORKING GROUP, 2010)

O relé de deslocamento de fase é menos sensível quando comparado com o relé ROCOF para a detecção da condição de ilhamento. Entretanto, este relé apresenta maior estabilidade, dado que o relé ROCOF é mais passível a falsas operações, devido a sua alta sensibilidade. Para evitar falsos acionamentos de ambos os relés, é possível estabelecer um limite mínimo de tensão, isto é, quando a tensão da rede diminuir além do valor pré-definido, tanto a função salto vetorial quanto a função ROCOF são desativadas, a fim de se evitar a atuação indevida da proteção (PUJHARI, 2009). Apesar de conter os obstáculos discorridos anteriormente, assim como o ROCOF, o relé de salto vetorial tem sido amplamente utilizado em países da Europa, e no Brasil, pela COPEL para assegurar que em casos de possível ilhamento o gerador ilhado também seja desconectado da carga (CIGRÉ WORKING GROUP, 2010).

2.2.2.2 Técnicas Ativas

As técnicas de detecção de ilhamento denominadas como ativas são classificadas pelo fato de que o gerador distribuído injeta sinais que causem distúrbios no sistema elétrico, de forma que na situação de ilhamento o sistema apresentará uma reação diferente entre as condições de operação interligada com a concessionária. Diversas são as técnicas de ilhamento já apresentadas e implementadas, sendo que algumas delas serão rapidamente tratadas nesta seção.

Estudos observaram que normalmente, ocorre um aumento da impedância do sistema “vista” pelo gerador distribuído após o ilhamento. Desde modo, esta medida pode ser utilizada como uma técnica para a detecção de ilhamento (O'KANE e FOX, 1997). Esta técnica consiste em aplicar um sinal de alta frequência no sistema injetado por um gerador de sinais instalado com o gerador distribuído. Este sinal é empregado para realizar medições da impedância do sistema. A principal vantagem dessa técnica se encontra na sua independência em relação aos desbalanços de potência ativa e reativa na ilha formada. Entretanto, seu desempenho é reduzido quando há mais geradores distribuídos na rede

que utilizam o mesmo método, pois a interferência entre os sinais injetados por eles prejudica o valor de impedância medido.

Outra solução para detectar a ocorrência de ilhamentos que emprega uma técnica de monitoramento da variação da potência reativa do gerador é proposta em (MOTOHASHI, ICHINOSE, et al., 1999). Esse trabalho propõe um modelo onde se injeta um sinal de baixa amplitude para variar a tensão do gerador, e realiza medição da frequência elétrica do gerador. Em caso de ilhamento, as variações da frequência são significativas, enquanto desprezíveis caso o gerador esteja interligado à concessionária. O destaque positivo desta é a detecção do ilhamento para os mais variados níveis de desbalanço de potência ativa e reativa, podendo ser empregada como complementação às técnicas passivas baseadas em medidas de frequência. As desvantagens são o alto custo, sobretudo no método que emprega um filtro ativo, e a lenta operação, visto que testes práticos mostraram tempos de atuação maiores que 1 segundo.

A discussão de técnicas ativas para detecção de ilhamento em sistemas de geração distribuída com inversores pode ser encontrada em (YIN, CHANG e DIDUCH, 2004). Dentre essas técnicas se destacam principalmente aquelas que injetam sinais de modo a alterar o ângulo de fase e por consequência, a frequência da corrente de saída do inversor. Essas mudanças desestabilizam o gerador caso ocorra o ilhamento. As principais técnicas que utilizam esse princípio são (STEVENS, BONN, et al.); (JOHN, YE e KOLWALKAR, 2004): SMS (Slip-mode frequency shift), AFD (Active Frequency Drift) e APS (Automatic Phase-shift).

2.2.2.3 Conceito de Zona de Não Detecção

Definida como: área medida em regime permanente onde não é possível detectar o ilhamento de um sistema conectado à rede elétrica. A Zona de Não Detecção (ZND) determina a confiabilidade de um método anti-ilhamento, nessa região a proteção anti-ilhamento é insensível à formação de ilha e não atua. Esta região pode variar em área ou formato de acordo com diversas circunstâncias, como, por exemplo: controles diferentes da GD, tipo de carga, o tempo de atuação do relé de proteção, o FP etc. (YE, KOLWALKAR, et al., 2004). A disposição da ZND em um gráfico bidimensional é chamada de mapeamento da ZND e representa o principal critério de avaliação de uma técnica AI. Este mapeamento pode ser realizado com parâmetros distintos, sendo que neste trabalho será considerado o desbalanço de potência ΔP ,

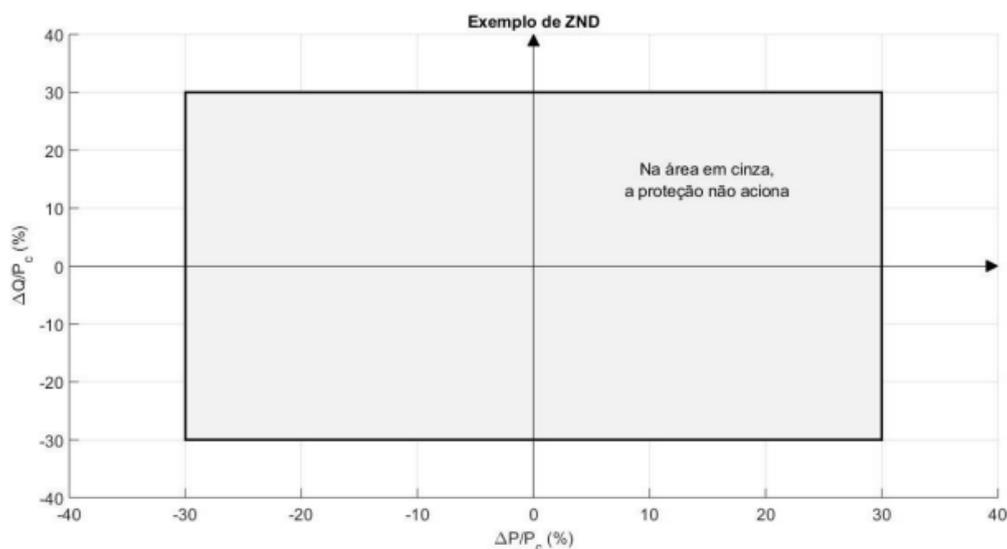


Figura 9 - Exemplo de ZND
Fonte: (Autoria própria, 2020)

Figura 3 - Exemplo de ZND
Fonte: (SILVEIRA, 2020)

O mapa do desbalanço de potência corresponde ao mapeamento mais conhecido e utilizado entre os métodos passivos. Este mapa é estruturado em sistema cartesiano e utiliza o desbalanço de potência ativa (ΔP) consumida ou injetada no SEP no eixo das abscissas e o desbalanço de potência reativa (ΔQ) consumida ou injetada no SEP no eixo das ordenadas. (SILVEIRA, 2020). Como o ilhamento suprime o desbalanço de potência (ΔP e ΔQ) e força a GD a gerar potência igual à potência exigida pela carga, então é possível estipular uma relação entre a quantidade de potências ativa e reativa consumidas ou injetadas no SEP (ΔP e ΔQ) e a capacidade de atuação da proteção AI, uma vez que quanto maior a contribuição da rede elétrica no suprimento da carga, maior será o impacto da supressão desse fornecimento. Caso o desbalanço de potência seja pequeno, a perturbação dos parâmetros de magnitude, frequência ou fase da tensão no ponto de acoplamento será insuficiente para acionar a proteção AI, formando a ZND.

3. Materiais e Métodos

Inicialmente foi realizada a coleta de informações acerca das principais normas regulamentadoras vigentes de âmbito nacional e internacional que se referem a sistemas com geração distribuída objetivando um maior esclarecimento sobre o assunto. Além disso, foram estudados os principais impactos no sistema elétrico provenientes da conexão de GD e o funcionamento dos relés de proteção de deslocamento de fase e de taxa de variação de frequência.

Na segunda etapa foram definidos os pontos críticos do sistema em estudo e as simulações a serem realizadas. Paralelamente, foi feita a busca pelos sistemas teste mais utilizados para modelagem e representação do sistema, sendo escolhido o IEEE 13 barras. Utilizando o Matlab (SimPowerSystem) foram escolhidos os modelos equivalentes de geradores, transformadores, cargas, linhas de distribuição, dentre outros, obedecendo os parâmetros do sistema escolhido e assim elaborado o circuito elétrico representativo do sistema em estudo. Posteriormente foi realizada as simulações, análise dos resultados obtidos e conclusão do estudo

4. Simulação Computacional

4.1 SimPowerSystems

Para a execução das simulações propostas e discutidas neste trabalho, utilizou-se como ferramenta computacional o SimPowerSystems. Uma ferramenta bastante aplicada no meio acadêmico para estudos de transitórios eletromecânicos, eletromagnéticos, fluxo de carga e estabilidade transitória agregado a plataforma Matlab/Simulink (HYDRO-QUÉBEC, 2022). O SimPowerSystems possui uma vasta biblioteca com os mais variados modelos dinâmicos dos componentes do sistema elétrico de potência. Dentre os principais componentes destacam-se elementos RLC concentrados, cargas não lineares, modelos de máquinas elétricas (síncrona, assíncrona e contínua) e respectivos controles associados. Além de tais componentes, apresenta ainda modelos de linhas de transmissão e cabos concentrados e distribuídos, disjuntores, transformadores, para-raios, elementos de eletrônica de potência e circuitos de controles. (VIEIRA, 2005). O SimPowerSystems viabiliza ainda criação e manipulação de modelos desenvolvidos pelo usuário empregando elementos do Simulink ou por meio de utilização de linguagem de programação Fortran ou C.

Uma importante funcionalidade disponível no SimPowerSystems é o cálculo das condições iniciais das variáveis das máquinas elétricas e controles associados, a partir de um cálculo de fluxo de carga. O SimPowerSystems permite ainda que seja escolhido o método de resolução utilizado nas simulações, variando entre simulações ditas contínuas (passo de integração variável), discreta ou fasorial (regime permanente).

4.2 Sistema Modelado

O sistema elétrico de geração distribuída utilizado no estudo e modelado no SimPowerSystems é o sistema de teste 13 barras IEEE este sistema é usado para testar recursos comuns de software de análise de distribuição. Operando a 4,16 kV caracteriza-se por ser curto, porém complexo. O IEEE 13 barras consiste em 13 nós, 9 cargas desequilibradas, 10 linhas aéreas e cabos subterrâneos com 1, 2, 3 fases com arranjo variado, dois bancos capacitores (shunts), um transformador e um regulador de tensão por fase. A Figura 4 mostra o diagrama da rede.

Trata-se de um sistema onde se encontram cargas desequilibradas, linhas de diferentes impedâncias, bancos de capacitores e um regulador de tensão (IEEE 13 node, 2006). Este sistema possui dois bancos de capacitores localizados nas barras 611 e 675, além disso possui um regulador de tensão na saída da subestação que controla

independentemente a tensão das fases utilizando como referência a barra 680 e uma chave entre as barras 671 e 692. Possui, também, cargas nas suas barras, exceto nas barras 680, 684, 632 e 633. Para a conexão das cargas foram utilizados transformadores abaixadores de tensão 4,16/0,220 kV, ou seja, as cargas conectadas nestes transformadores representam um conjunto de cargas residenciais ou comerciais. O gerador distribuído é conectado na barra 634 (trecho aéreo) e posteriormente na barra 675 (trecho subterrâneo).

O diagrama unifilar do sistema é mostrado na figura 4.

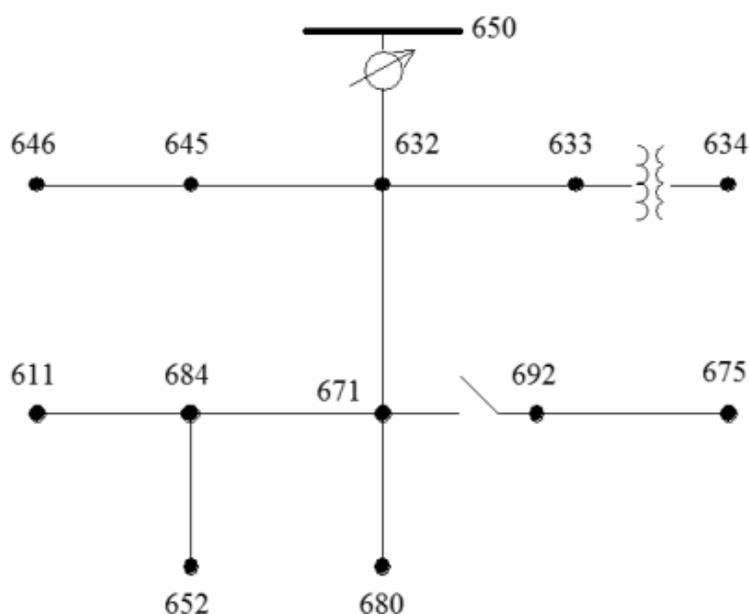


Figura 4 - Diagrama Unifilar IEEE 13 Barras
Fonte: (SAHA e JOHNSON, 2016)

O sistema com geração distribuída em estudo é composto por uma usina de geração fotovoltaica de 100 kW em 220 V. A usina é conectada ao sistema de distribuição de 4,16 kV através da subestação de transferência ST, a qual foi modelada como uma barra de conexão que contém um transformador de 112,5 kVA.

O ilhamento é simulado pela abertura do disjuntor da concessionária (Dj Conc), retirando o sistema da concessionária e consequentemente deixando o trecho em análise ilhado com o gerador fotovoltaico. Os relés anti-ilhamento em estudo estão instalados na barra B. Os circuitos simulados são apresentados na figura 10. Todos os parâmetros do sistema elétrico empregados nas simulações são apresentados no Apêndice A.

4.2.1 Modelagem dos elementos do Sistema

A modelagem dos elementos do sistema elétrico foi realizada de forma trifásica, visto que essa abordagem representa a forma mais próxima da realidade para o sistema em estudo e os fenômenos em análise.

4.2.1.1 Gerador Fotovoltaico

O arranjo fotovoltaico utilizado é um modelo detalhado de 100 kW, conforme Figura 13, conectado a uma rede de 220 V por meio de um conversor boost DC-DC e um conversor de fonte de tensão trifásico de três níveis (VSC). (MATHWORKS, 2022). O gerador de 100 kW é composto por 330 módulos SunPower (SPR-305E-WHT-D) organizados em 66 strings em paralelo, cada string contendo 5 módulos conectados em série ($66 \cdot 5 \cdot 305,2 \text{ W} = 100,7 \text{ kW}$).

As especificações do fabricante para um módulo são:

Potência nominal: 305 W
Tensão de Circuito Aberto: 64,2 V
Corrente de Curto-Circuito: 5,96 A
Tensão na Potência Máxima: 54,7 V
Corrente na Potência Máxima: 5,58 A
Eficiência do Pannel: 18,7%
Tensão Máxima do Sistema: 600 V

Demais informações podem ser encontradas na referência: (POSHARP, 2022)

O bloco do painel fotovoltaico tem duas entradas que permitem variar a irradiância do sol em $1 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right)$ e temperatura em $1 \text{ }^\circ\text{C}$. Os perfis de irradiância e temperatura são definidos por um bloco Signal Builder que é conectado às entradas do painel fotovoltaico. (MATHWORKS, 2022).

4.2.1.2 Subsistema de Supervisão e Controle

O Maximum Power Point Tracking (MPPT) é implementado no conversor boost por meio de um modelo Simulink usando a técnica Condutância Incremental.

O principal objetivo dos algoritmos de MPPT é garantir que seja extraída a máxima potência disponível, a qualquer momento considerando as variações ao qual a placa está propensa a sofrer ao decorrer do dia. (VENDRUSCOLO, 2020)

O método necessita de sensores de tensão e corrente, pois esse método analisa o sinal da derivada da potência pela tensão do arranjo fotovoltaico. De acordo com este método, o MPP está onde a derivada é nula. Assim, realizando uma amostragem periódica da tensão e corrente instantânea, calculando o incremento de condutância $\frac{dI}{dV}$ e comparando com os valores instantâneos é possível rastrear o MPP. Considerando os métodos mais utilizados, este método apresenta melhor resultados em regime permanente e para rápidas mudanças de irradiação. (VENDRUSCOLO, 2020)

4.2.1.3 Transformadores

Os transformadores trifásicos empregados na simulação possuem dois enrolamentos e foram representados pelo modelo T, conforme figura 5, considerando as perdas no núcleo.

No domínio elétrico, as perdas por correntes parasitas são modeladas usando uma resistência paralela ao longo do enrolamento primário. Este é o circuito equivalente para um transformador não ideal de dois enrolamentos. O efeito de saturação do núcleo foi desprezado. (MATHWORKS, 2018)

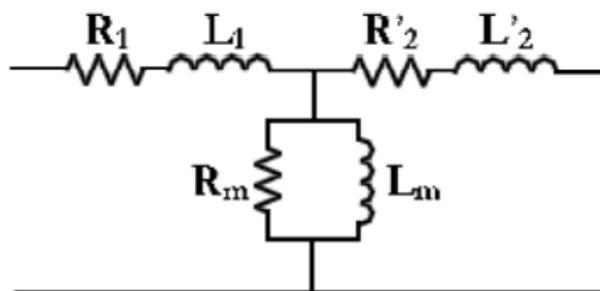


Figura 5 - Circuito T equivalente de um transformador trifásico de dois enrolamentos.
Fonte: (MATHWORKS, 2018)

No diagrama:

R_1 , L_1 e R_2 , L_2 são as autoindutâncias dos enrolamentos primário e secundário, respectivamente.

- L_m é a indutância mútua entre os dois enrolamentos.
- R_m é a resistência mútua entre os dois enrolamentos, causada pela corrente parasita

4.2.1.4 Disjuntores

O bloco de disjuntores modela um disjuntor trifásico que pode abrir e fechar seus contatos conforme tempos definidos na simulação ou através de comandos externos para comutação de estado da chave (aberta ou fechada). Além do controle de abertura e fechamento há parâmetros a serem preenchidos, tais como, a resistência e capacitância de amortecimento, medições de tensão e corrente e resistência do disjuntor. (MATHWORKS, 2018)

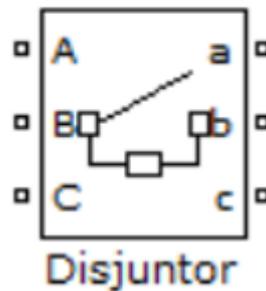


Figura 6 - Bloco Disjuntor
(MATHWORKS, 2018)

4.2.1.5 Cargas

As cargas utilizadas neste trabalho foram representadas como cargas de potência constante.

O bloco RLC modela uma impedância trifásica, cada um dos três componentes de impedância pode incluir qualquer combinação de um resistor, (R), capacitor (C) e indutor (L), conectados em série ou em paralelo. Sendo possível definir os valores para os componentes R, L e C especificando os parâmetros apropriados para o bloco. (MATHWORKS, 2018)

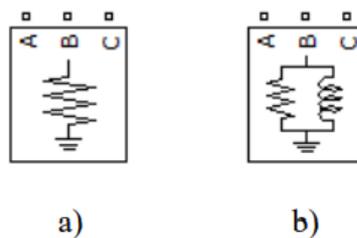


Figura 7 - Bloco Cargas
(MATHWORKS, 2018)

4.3 Modelagem dos Relés de Proteção

4.3.1 Relé de taxa de variação de frequência

O modelo computacional do relé ROCOF utilizado para as simulações deste trabalho foi baseado no funcionamento descrito no item 2.2.2.1.1 e na referência VIEIRA, 2006. O diagrama de blocos simplificado do relé ROCOF pode ser visto na figura 8.

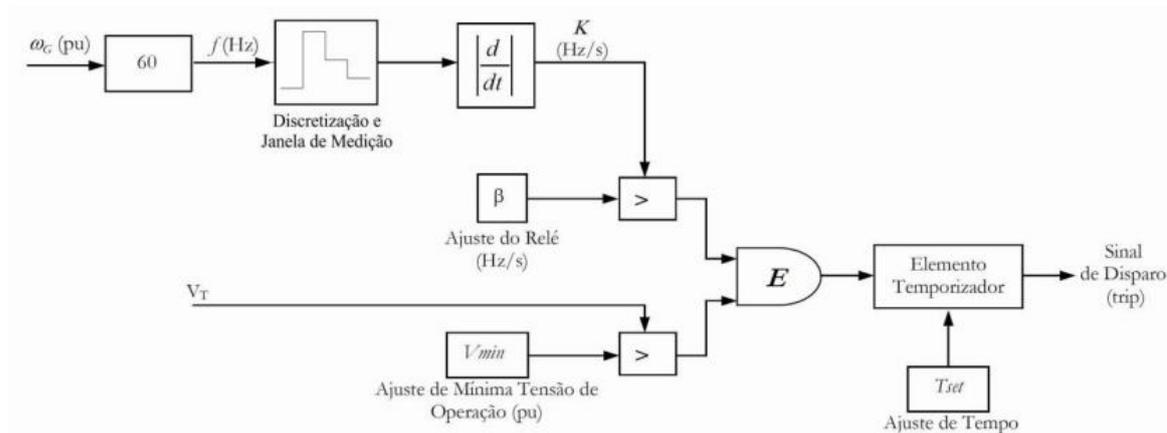


Figura 8 - Diagrama de blocos simplificado do relé de taxa de variação de frequência.
Fonte – (NICOLOTTI, SILVA e JORGE, 2011).

Conforme pode ser observado no diagrama de blocos da figura 8, é feita a leitura da frequência que é extraída utilizando-se a frequência de saída do gerador. Através deste sinal, é obtido a frequência instantânea. Após a medição, o sinal amostrado é derivado em relação ao tempo e o valor absoluto do sinal resultante é comparado com o ajuste do relé. (NICOLOTTI, SILVA e JORGE, 2011) Caso o valor medido seja maior que o ajuste do relé, o relé é sensibilizado e envia um sinal de disparo para a abertura do disjuntor no ponto de interconexão (sinal de trip), eliminando a condição de ilhamento do sistema elétrico. Também foi implementado a função de variação de tensão, a qual é responsável por bloquear a operação do relé ROCOF quando a magnitude da tensão no gerador está abaixo ou acima de um determinado valor. Essa restrição foi considerada na concepção do ROCOF de forma a garantir sua correta operação frente a condições adversas que o sistema de distribuição pode sofrer, como por exemplo, faltas e transitórios, situações em que outras funções de proteção, diferentes dos relés anti-ilhamento, devem operar. (VIEIRA, 2005) Conforme testes realizados no sistema em estudo e na referência (NICOLOTTI, SILVA e JORGE, 2011) o ajuste de sensibilidade do relé ROCOF foi definido em 5 Hz/s

4.3.2 Relé de Salto Vetorial (Deslocamento de fase)

O relé de deslocamento de fase foi modelado computacionalmente conforme descrito do item 2.2.2.1.2 e na referência VIEIRA, 2006. O diagrama simplificado de blocos do relé de deslocamento de fase é apresentado na figura 9.

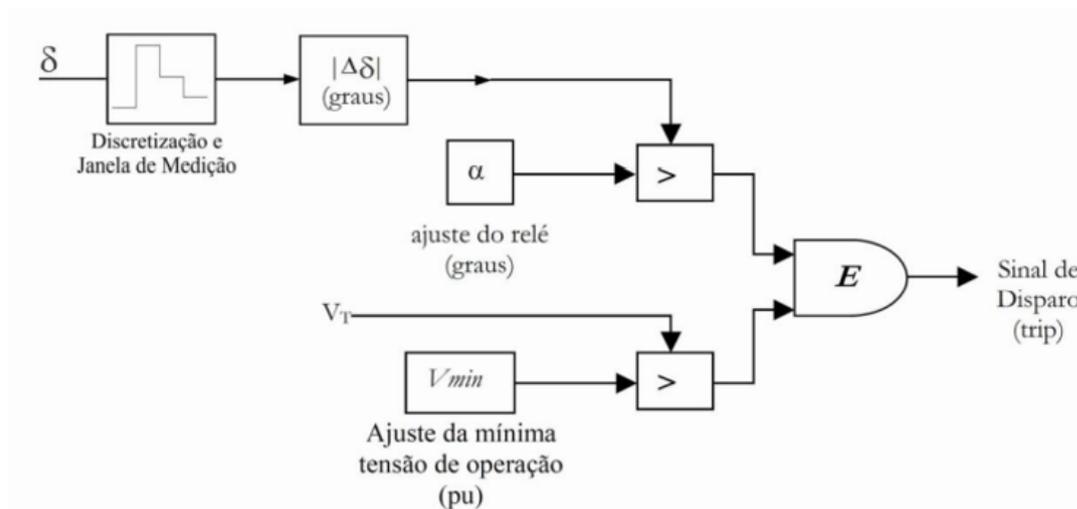


Figura 9 - Diagrama de blocos simplificado do relé de deslocamento de Fase.

Fonte – (NICOLOTTI, SILVA e JORGE, 2011).

O ângulo (defasamento entre a tensão nos terminais e a tensão interna do gerador) é obtido no SimPowerSystems através dos sinais de saída do gerador fotovoltaico. Posteriormente este valor é comparado com o valor ajustado no relé. Assim como considerado para o relé de taxa de variação de frequência, o relé de deslocamento de fase implementado computacionalmente possui também bloqueio por restrição de tensão (ver item 4.3.1).

5. Simulações e Resultados

De modo a se avaliar o desempenho do sistema de proteção anti-ilhamento mediante a alteração do tipo de rede de distribuição ao qual a GD está conectada foram separados dois conjuntos principais de simulações para abordar os aspectos de desempenho das proteções, o primeiro conjunto se refere aos testes realizados no trecho aéreo do sistema IEEE 13 barras e o segundo no trecho subterrâneo.

5.1 Testes de Sensibilidade das Proteções

Conforme apresentado no item 2.2, o cenário mais crítico a ser analisado é quando a carga ilhada se equivale à potência que está sendo fornecida pelo gerador ao sistema antes do ilhamento. A simulação deste cenário é de grande relevância, pois as variações de frequência e do ângulo de carga são pouco expressivas, logo a detecção da situação de ilhamento pelos sistemas de proteção hora em análise se tornam bastante difícil. Quando a potência da carga ilhada é muito menor ou maior que a potência que está sendo fornecida pelo gerador antes do ilhamento, a velocidade e ângulo de carga do gerador sofrem variações bruscas que levam consequentemente a atuação das proteções anti-ilhamento aqui estudadas.

Inicialmente foram realizados 24 testes de sensibilidades em cada trecho a fim de se verificar o comportamento das curvas. Nestes testes partiu-se do cenário mais crítico onde a potência do gerador é igual a carga da ilha e então foi se aumentando a potência da carga em passos de 1 kW a fim de se encontrar a zona de não detecção de cada relé. Nestes testes foi verificado que a partir de um certo ponto, o tempo de atuação do relé se manteve com alteração não significativas para o objetivo deste trabalho. Sendo assim foram então trazidos para análises os 10 testes mais relevantes para a verificação. Estes cenários estão descritos na tabela 1 abaixo.

Tabela 1- Cenários de simulação para os testes de sensibilidade das proteções - Cargas Resistivas

| Cenário Nº | Saída do Gerador (% PG*) | Carga Local (%PG*) | Potência Transferida para a concessionária (%PG*) |
|---|--------------------------|--------------------|---|
| S01 | 100 | 90 | 10 |
| S02 | 100 | 92 | 8 |
| S03 | 100 | 93 | 7 |
| S04 | 100 | 95 | 5 |
| S05 | 100 | 100 | 0 |
| S06 | 100 | 105 | -5** |
| S07 | 100 | 110 | -10** |
| S08 | 100 | 111 | -11** |
| S09 | 100 | 112 | -12** |
| S10 | 100 | 115 | -15** |
| PG = 100 kW | | | |
| * PG – Potência ativa fornecida pelo gerador conectado na barra BG. | | | |
| **Carga ilhada possui potência superior à potência fornecida pelo gerador em x %. | | | |

Em todos os cenários de sensibilidade, S01 a S10, foi considerado que ocorre o ilhamento das cargas em um tempo de 300 ms após o início da simulação, com a abertura do disjuntor de interconexão.

5.1.1 Trecho Aéreo

Para os diferentes cenários simulados com cargas resistivas, foi verificado que à medida que a carga ilhada se aproxima do valor da potência entregue pelo gerador antes do ilhamento, os valores da taxa de variação de frequência e ângulo de carga variam com menor intensidade. As figuras 10 a 13 apresentam respectivamente a taxa de variação da frequência, o ângulo de carga e a tensão terminal do gerador no trecho Aéreo de acordo com os cenários S01 a S10 da tabela 1.

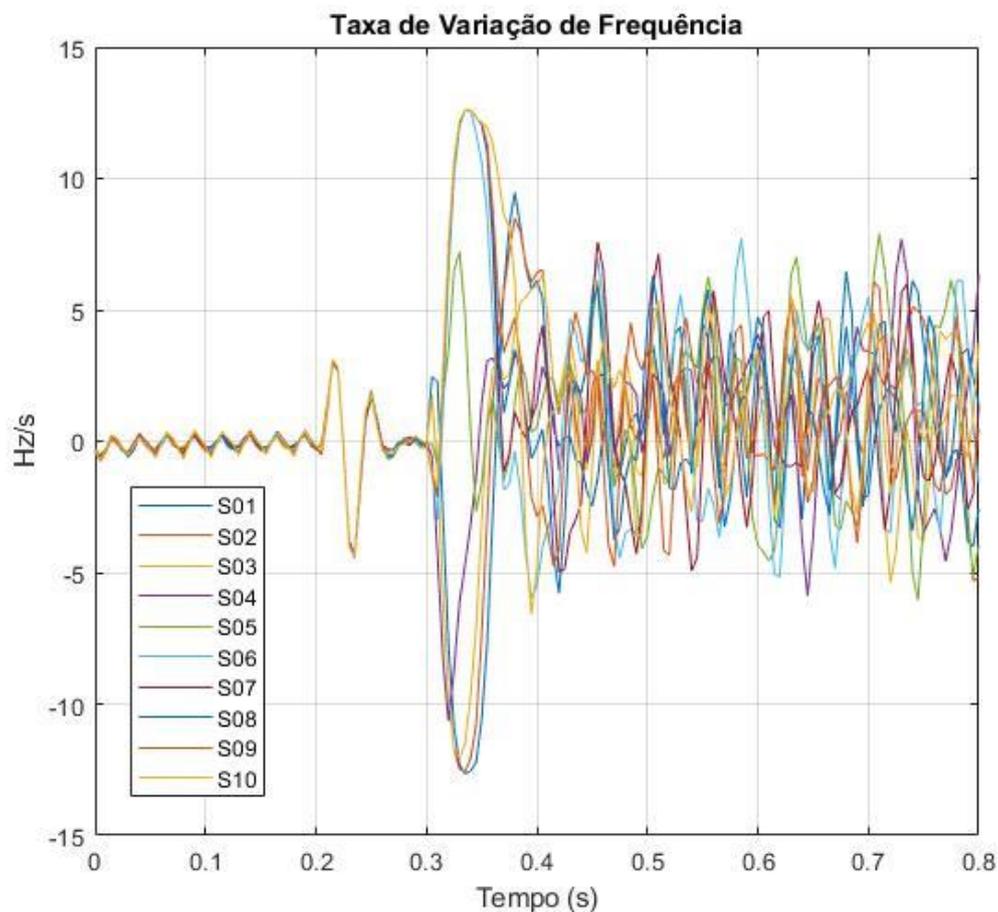


Figura 10 - Taxa de Variação de Frequência no Trecho Aéreo

Fonte: Autoria própria (obtido a partir das simulações no Simulink/Matlab).

A taxa de variação de frequência é uma das grandezas fundamentais para o acionamento do relé ROCOF. A figura acima traz um compilado do comportamento desta grandeza em todos os cenários aplicados ao trecho aéreo. Para verificação da comparação entre cada curva e seu respectivo cenário com mais detalhes de seu comportamento consulte figuras 20 a 39 no Apêndice.

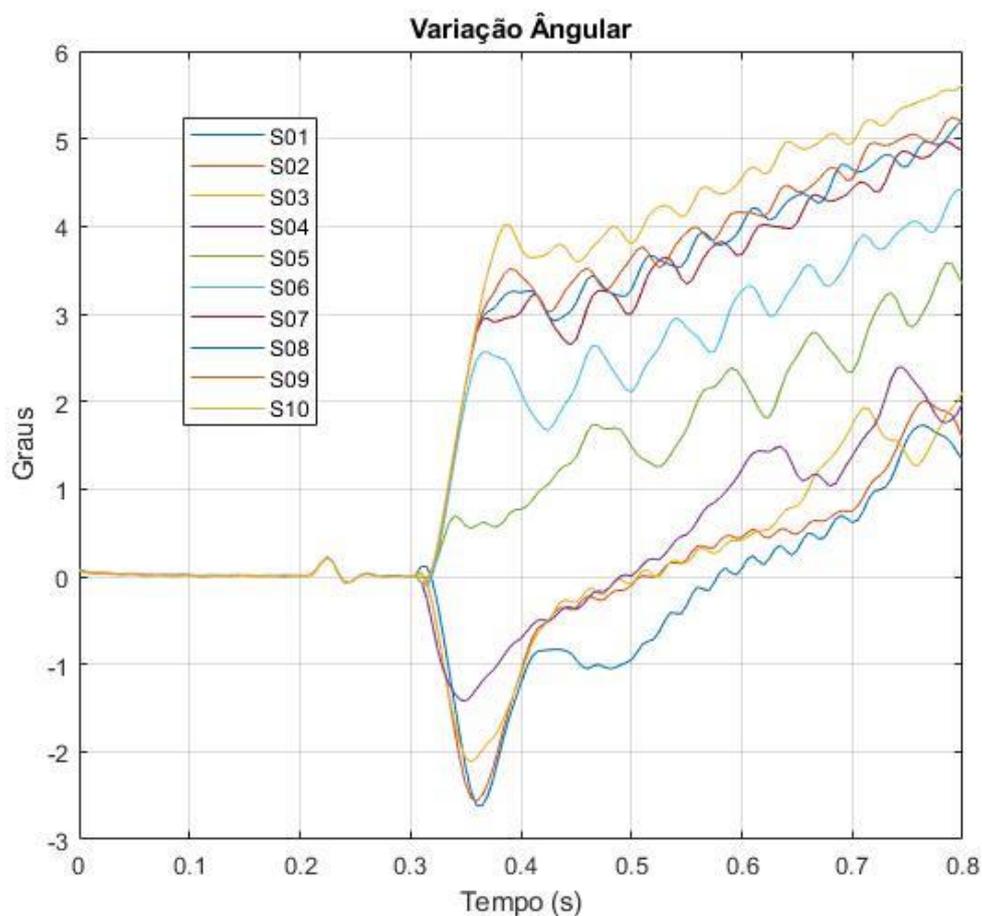


Figura 11 - Variação no Ângulo de Carga no Trecho Aéreo

Fonte: Autoria própria (obtido a partir das simulações no Simulink/Matlab).

A variação angular é uma das grandezas base para o acionamento do relé Salto Vetorial. A figura acima traz um compilado do comportamento desta grandeza em todos os cenários aplicados ao trecho aéreo. Para verificação da comparação entre cada curva e seu respectivo cenário com mais detalhes do comportamento de seu comportamento consulte figuras 20 a 39 no Apêndice.

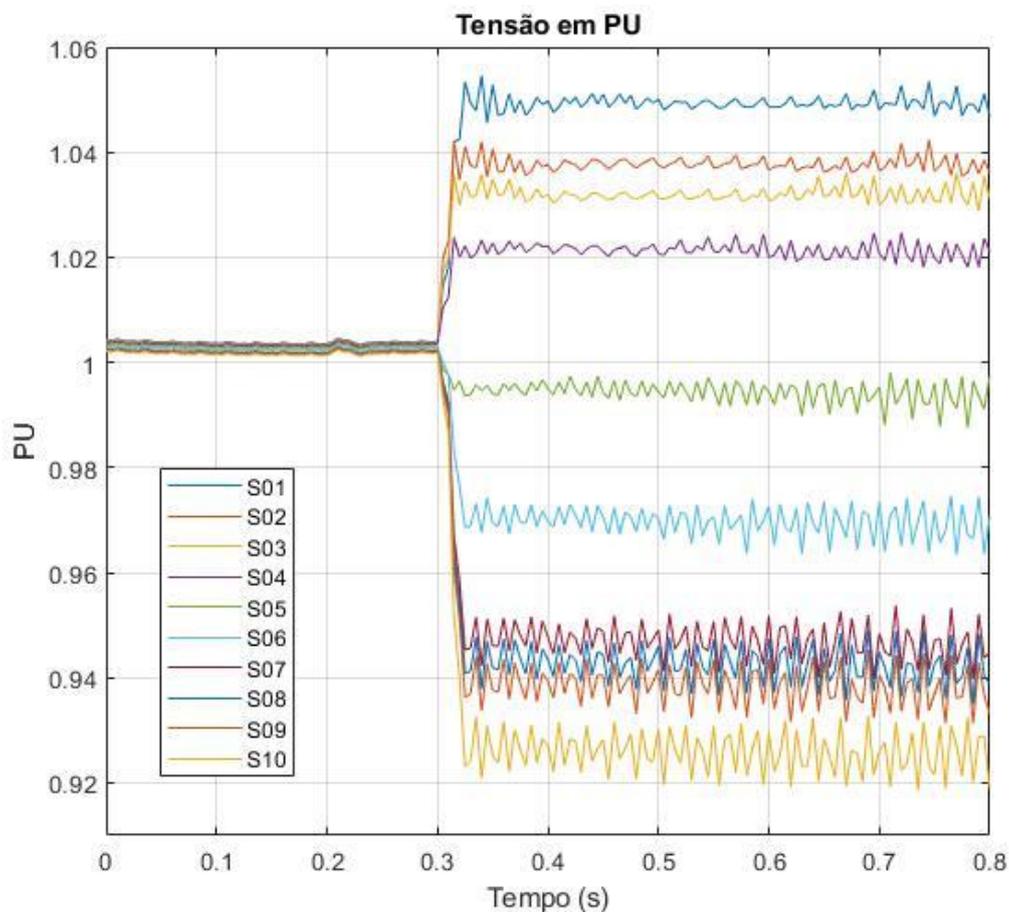


Figura 12 - Variação de Tensão Terminal do Gerador no Trecho Aéreo

Fonte: Autoria própria (obtido a partir das simulações no Simulink/Matlab).

Ambos os relés analisados neste trabalho realizaram a verificação do módulo da tensão como requisito de disparo da proteção. Nestes cenários e com base no que foi descrito nos itens 4.3.1 e 4.3.2 o valor de disparo de tensão foi devido entre 0,95 e 1,05 PU.

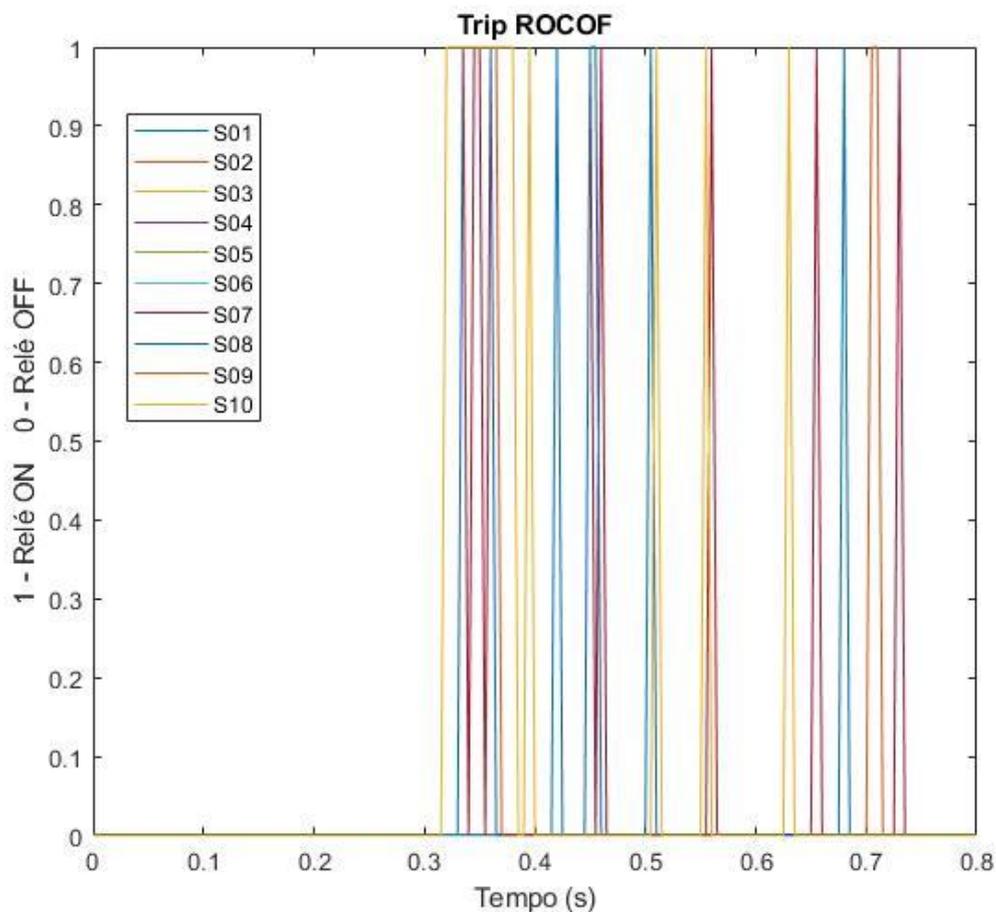


Figura 13 - Atuação do Relé ROCOF Trecho Aéreo

Fonte: Autoria própria (obtido a partir das simulações no Simulink/Matlab).

A figura 13 acima mostra os momentos de acionamento do relé ROCOF no trecho aéreo ao longo do tempo. O acionamento deste relé ocorre a partir do momento que existe a combinação de dois fatores: A taxa de variação de frequência ultrapassa ± 5 Hz/s e o módulo da tensão extrapola os limites de 0,95 a 1,05 pu.

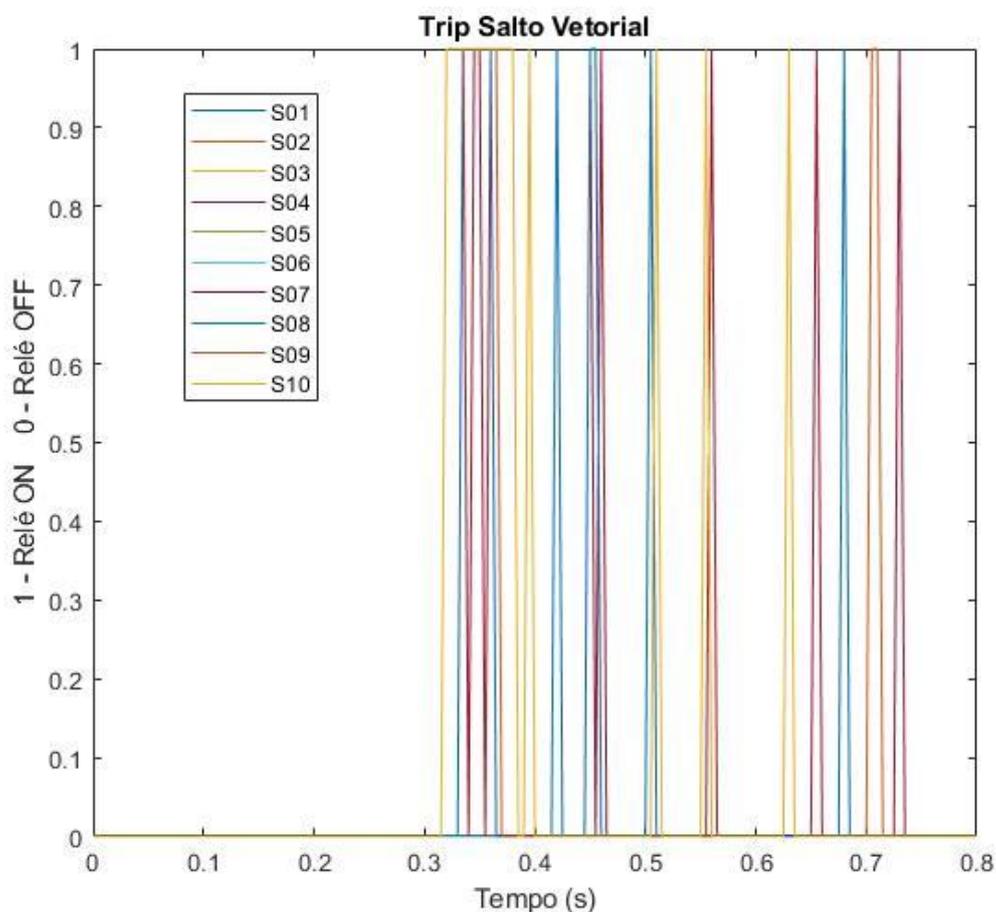


Figura 14 - Atuação do Relé de Deslocamento Vetorial - Trecho Aéreo

Fonte: Autoria própria (obtido a partir das simulações no Simulink/Matlab).

A figura 14 acima registra os momentos de acionamento do relé Taxa de Variação de Frequência ao longo do tempo. O acionamento deste relé ocorre a partir do momento que existe a combinação de dois fatores: O ângulo ultrapassa os $\pm 2^\circ$ e o módulo da tensão extrapola os limites de 0,95 a 1,05 pu.

Demais gráficos e comparativos entre os cenários em cada trecho do sistema de distribuição são apresentados no Apêndice A

5.1.2 Trecho Subterrâneo

Os diferentes cenários de variação de carga foram aplicados ao trecho subterrâneo do Sistema IEEE 13 barras, de modo a se observar a taxa de variação de frequência e ângulo de carga e tensão terminal do gerador. As figuras 6 a 9 apresentam respectivamente a grandezas neste trecho de acordo com os cenários S01 a S10 da tabela 1.

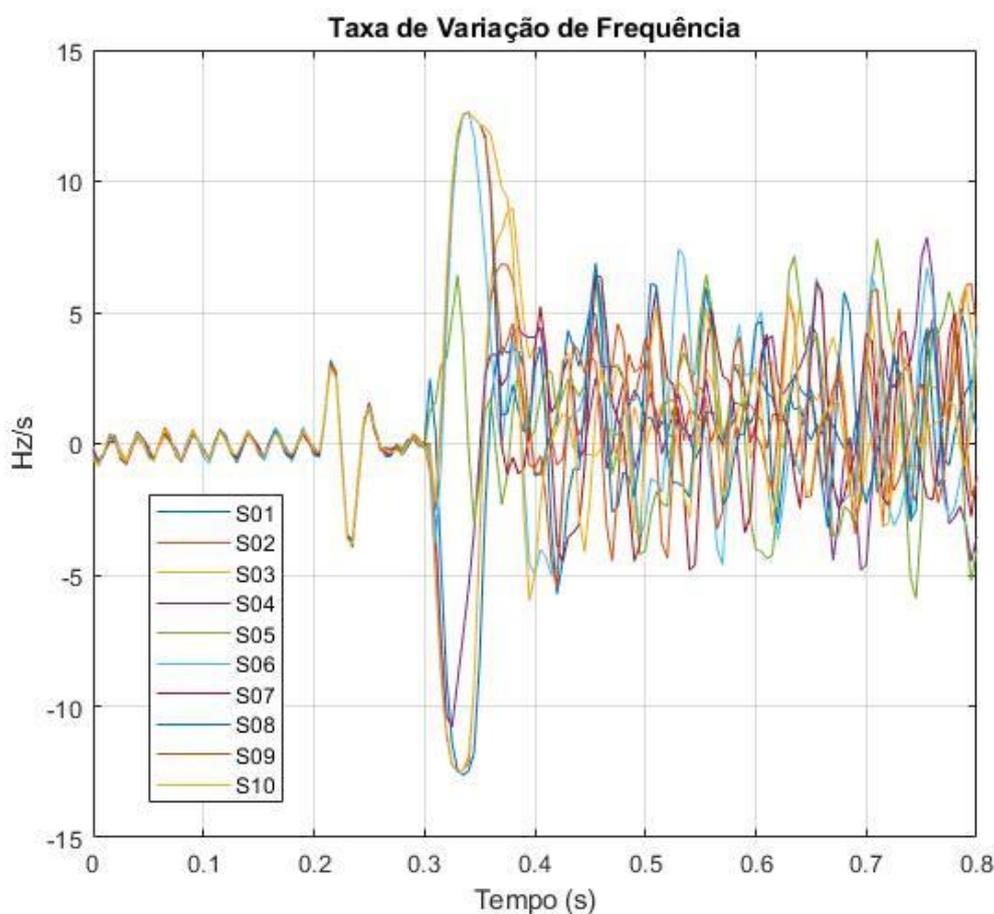


Figura 15 - Taxa de Variação de Frequência no Trecho Subterrâneo

Fonte: Autoria própria (obtido a partir das simulações no Simulink/Matlab).

Assim como apresentado na Figura 10, este gráfico apresenta a taxa de variação de frequência no tempo, porém aplicado ao trecho subterrâneo do sistema IEEE 13 barras. Para verificação da comparação entre cada curva e seu respectivo cenário com mais detalhes de seu comportamento consulte figuras 20 a 39 no Apêndice.

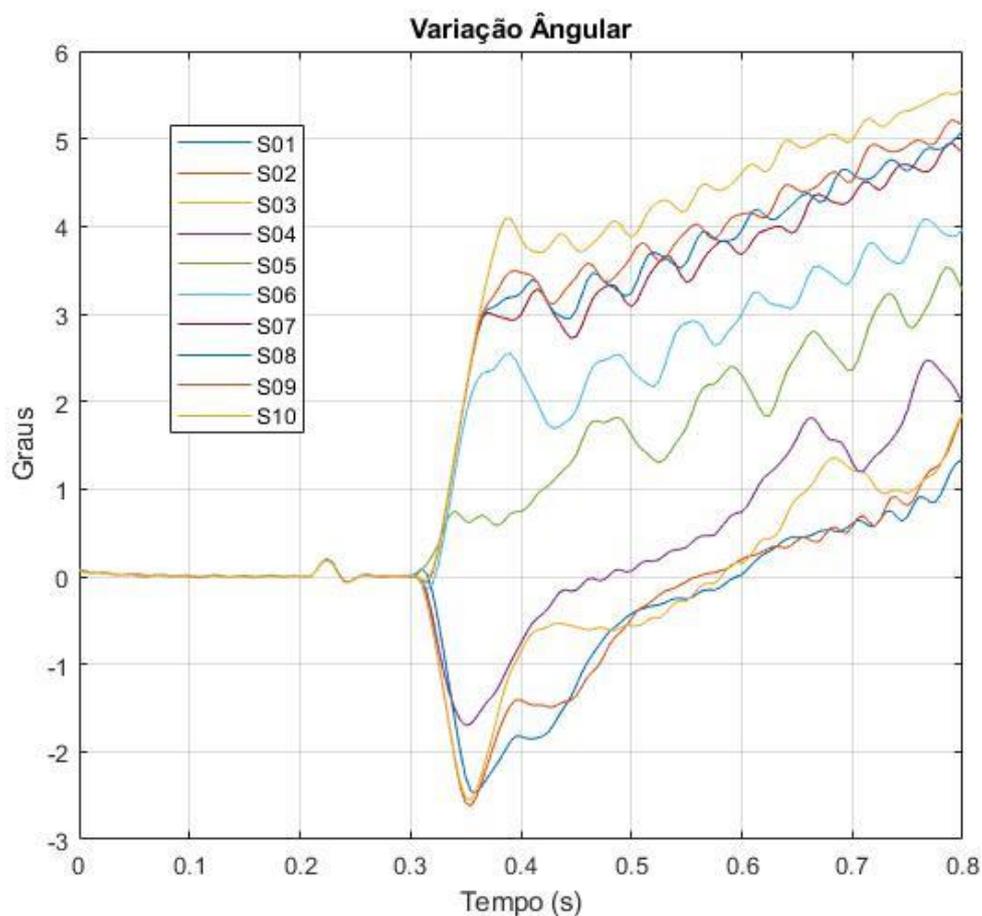


Figura 16 - Variação no Ângulo de Carga no Trecho Subterrâneo

Fonte: Autoria própria (obtido a partir das simulações no Simulink/Matlab).

A figura 16 acima apresenta a variação angular da tensão aplicada ao trecho subterrâneo. Para verificação da comparação entre cada curva e seu respectivo cenário com mais detalhes do comportamento de seu comportamento consulte figuras 20 a 39 no Apêndice.

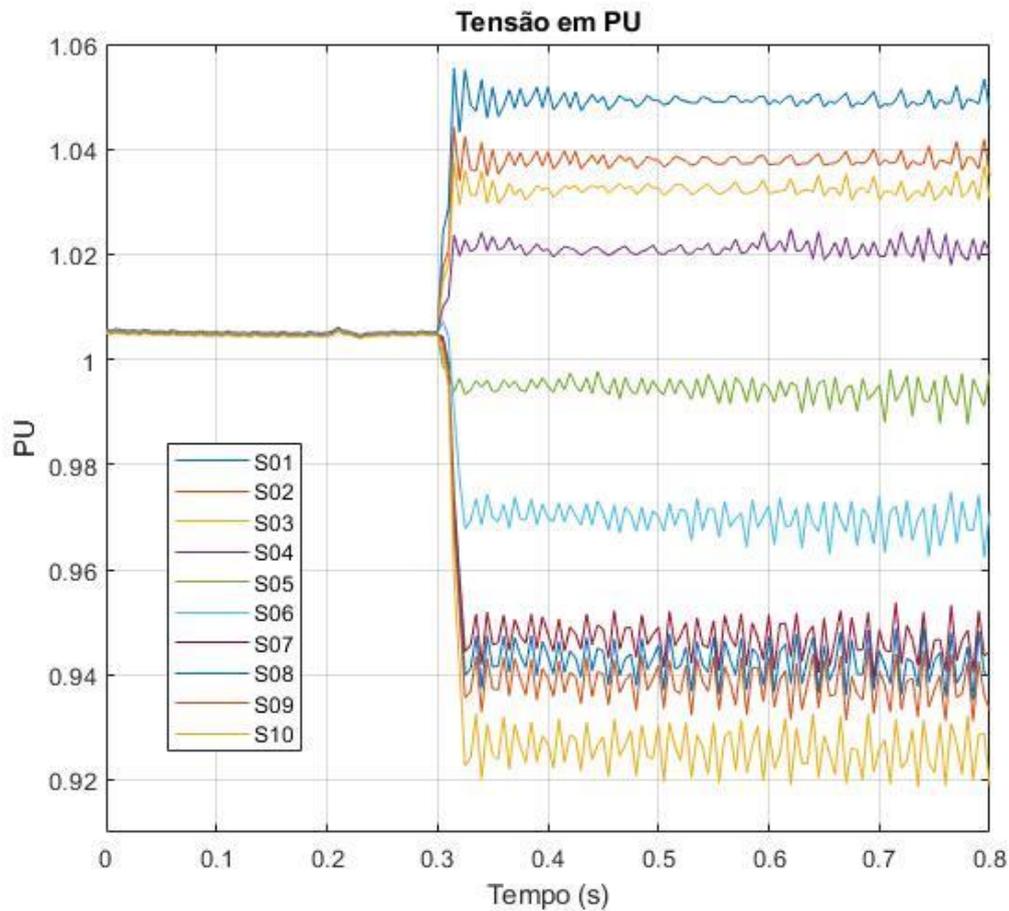


Figura 17 - Variação de Tensão Terminal do Gerador no Trecho Subterrâneo

Fonte: Autoria própria (obtido a partir das simulações no Simulink/Matlab).

Ambos os relés analisados neste trabalho realizaram a verificação do módulo da tensão como requisito de disparo da proteção. Nestes cenários e com base no que foi descrito nos itens 4.3.1 e 4.3.2 o valor de disparo de tensão foi devido entre 0,95 e 1,05 PU.

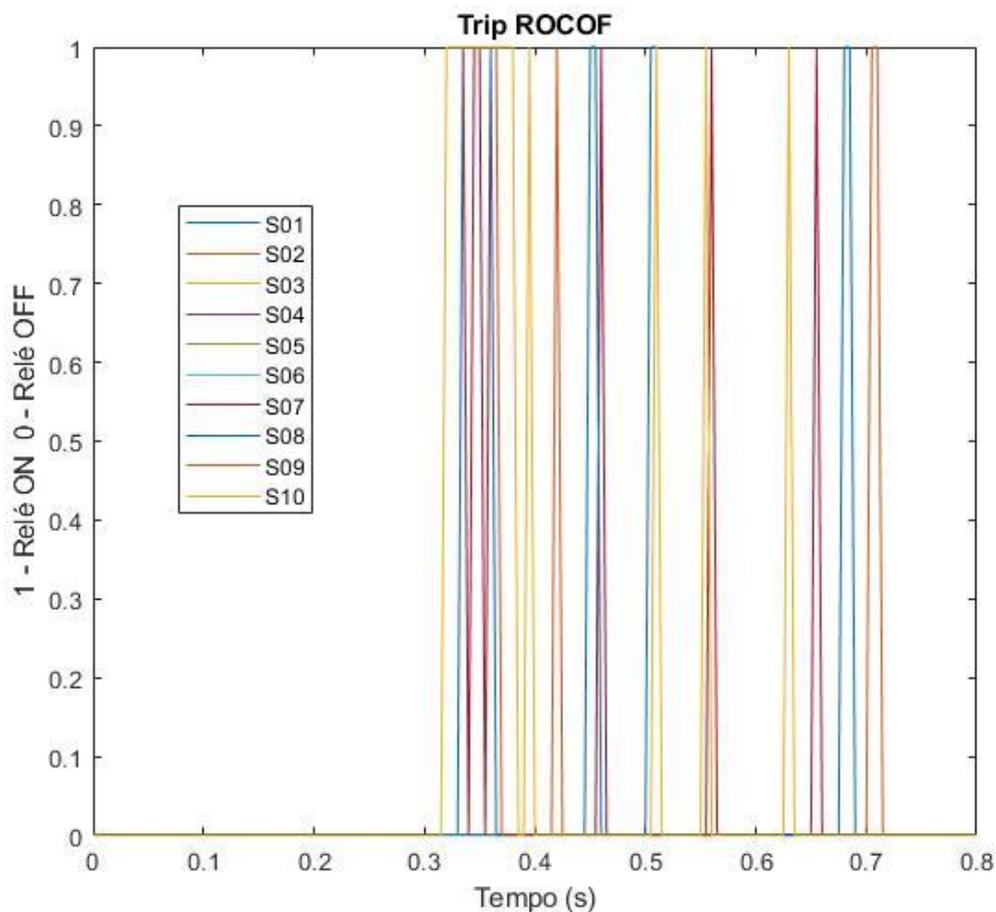


Figura 18 - Atuação do Relé ROCOF Trecho Subterrâneo

Fonte: Autoria própria (obtido a partir das simulações no Simulink/Matlab).

A figura 13 acima mostra os momentos de acionamento do relé ROCOF no trecho aéreo ao longo do tempo. O acionamento deste relé ocorre a partir do momento que existe a combinação de dois fatores: A taxa de variação de frequência ultrapassa ± 5 Hz/s e o módulo da tensão extrapola os limites de 0,95 a 1,05 pu.

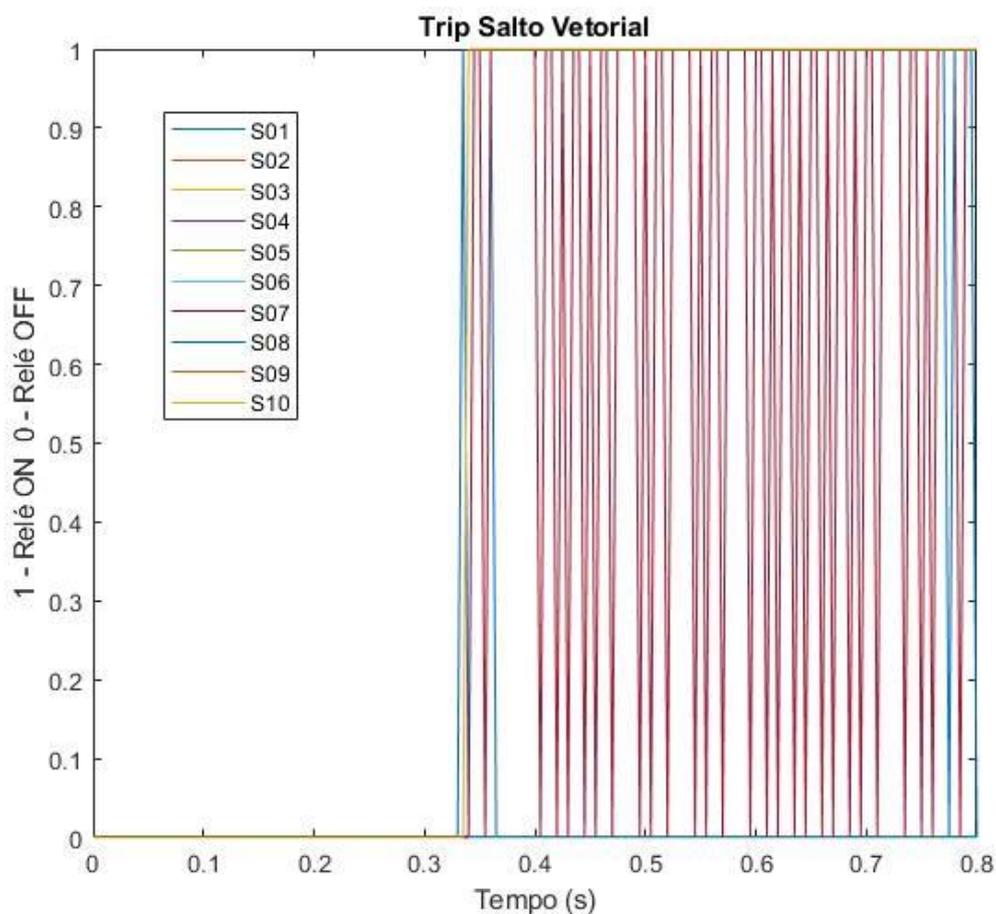


Figura 19 - Atuação do Relé Deslocamento Vetorial Trecho Subterrâneo
 Fonte: Autoria própria (obtido a partir das simulações no Simulink/Matlab).

A figura 19 acima registra os momentos de acionamento do relé Taxa de Variação de Frequência no trecho subterrâneo ao longo do tempo. O acionamento deste relé ocorre a partir do momento que existe a combinação de dois fatores: O ângulo ultrapassa os $\pm 2^\circ$ e o módulo da tensão extrapola os limites de 0,95 a 1,05 pu.

Com base nos resultados das simulações foi confeccionada a tabela 2 com o momento em que ocorreu a sensibilização dos relés em cada cenário.

Tabela 2 - Tempo de Atuação das Proteção Anti-ilhamento
 Fonte: Autoria Própria

| Cenário | Potência Transferida para a concessionária (%PG*) | Trecho Aéreo | | Trecho Subterrâneo | |
|---|---|--------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| Cenário | Pt | ROCOF (s) | SALTO VETOR (s) | ROCOF (s) | SALTO VETOR (s) |
| S01 | 10 | 0,3171 | 0,3422 | 0,3158 | 0,3345 |
| S02 | 8 | N/A | N/A | N/A | N/A |
| S03 | 7 | N/A | N/A | N/A | N/A |
| S04 | 5 | N/A | N/A | N/A | N/A |
| S05 | 0 | N/A | N/A | N/A | N/A |
| S06 | -5** | N/A | N/A | N/A | N/A |
| S07 | -10** | N/A | 0,3451 | N/A | 0,3453 |
| S08 | -11** | 0,3177 | 0,3423 | 0,3191 | 0,3421 |
| S09 | -12** | 0,3368 | 0,3177 | 0,3191 | 0,3408 |
| S10 | -15** | 0,3174 | 0,3366 | 0,3189 | 0,3377 |
| PG = 100 kW | | | | | |
| **Carga ilhada possui potência superior à potência fornecida pelo gerador em x %. | | | | | |
| N/A – Relé não acionado | | | | | |

6. Análise dos Resultados

A análise dos resultados partirá da verificação do comportamento do Relé ROCOF, iniciando-se pela análise da figura 20, que se encontra no Apêndice. Esta figura registra o cenário 01 que está fora da zona de não detecção. É possível observar que existe diferença no comportamento das grandezas taxa de variação de frequência, bem como no módulo da tensão quando comparado o mesmo cenário de desbalanço de potência ativa nos trechos aéreos e subterrâneos.

Porém ao se verificar a curva de acionamento do Relé (Trip) se constata que o comportamento deste acionamento se manteve o mesmo para os trechos em questão. Demonstrando assim, neste caso que, muito embora haja alteração no comportamento das grandezas analisadas, estas alterações não foram significativas para se alterar o comportamento do relé, pois quando ocorre o ilhamento ambas as curvas cruzam os limites pré-determinados ao mesmo tempo. Este comportamento se repete ao se analisar o outro ponto fora da ZND, o cenário S10, onde há também alterações no comportamento das grandezas analisadas, porém as curvas de acionamento do relé se sobrepõem demonstrando assim a similaridade em seu acionamento.

Ao se verificar a curva de teste do relé ROCOF nos cenários dentro da ZND, (Figuras 21 a 29) outro padrão é verificado. Em toda a ZND a grandeza Taxa de variação de frequência atinge os valores de acionamento do Relé, porém como é necessário que a tensão também ultrapasse valores pré-determinados, não há o acionamento da proteção.

Explorando os comportamentos do Relé Salto Vetorial nos cenários fora da ZND é constatado o mesmo verificado com o relé ROCOF, há alteração no comportamento das grandezas analisadas, neste caso o ângulo da tensão e o módulo da tensão em PU, porém essa alteração de comportamento que ocorre entre os trechos aéreo e subterrâneo, não alteram a capacidade do relé em detectar o fenômeno de ilhamento. Dentro da ZND a tensão se mostra mais uma vez como a grandeza que fez com que não houvesse o disparo do relé, uma vez que o ângulo da tensão também extrapolou dos limites pré-definidos.

Apesar do módulo da tensão impedir a atuação do relé dentro da ZND, esta grandeza também atua de modo a evitar falsos disparos em situações onde podem haver alterações tanto no ângulo, quanto na variação de frequência, sendo indispensável para se dar confiabilidade aos relés aqui analisados, conforme descrito nos itens 4.3.1 e 4.3.2.

A partir disso pode-se concluir que na situação de ilhamento, o tipo de rede de distribuição não é fator predominante para determinar a zona de não detecção de

ilhamento, uma vez que apesar de haver sutis mudança no comportamento das grandezas monitoradas pelos relés, tais mudanças não foram suficientes para que houvesse alterações na sensibilidade dos relés quando analisados os resultados obtidos comparando o trecho aéreo e o trecho subterrâneo. Por consequência a zona de não detecção das proteções analisadas neste trabalho se mantem a mesma em ambos os trechos.

7. Considerações Finais

O objetivo principal deste trabalho foi verificar a influência do tipo de redes de distribuição nos relés de taxa de variação de frequência e deslocamento de fase para a detecção de ilhamento em um sistema a presença de geração distribuída. Para atingir tal objetivo precedeu-se a realização de revisão bibliográfica sobre o tema para que a partir disso fossem realizados de testes de sensibilidade dos relés de proteção anti-ilhamento citados, utilizando a ferramenta do SimPowerSystems (Matlab). A modelagem dos relés de taxa de variação de frequência e deslocamento de fase mostraram-se precisas para a realização das simulações de sensibilidade da proteção. A partir das simulações realizadas e da análise de cada cenário proposto, observou-se a dificuldade de ambos os relés em detectar variações pequenas de carga, apresentando uma zona de não detecção, sendo assim é recomendado a combinação destes relés com outros dispositivo de modo a se reduzir a ZND devido às perturbações geradas no sistema elétrico não serem expressivas e ao fato que configurações mais sensíveis podem fazer com que a proteção atue em situação como chaveamento de carga reduzindo a confiabilidade do sistema elétrico.

Por fim conclui-se que a detecção de ilhamento dos relés de taxa de variação de frequência e deslocamento de fase não são afetados por alterações no tipo da rede de distribuição, por si só. Dessa forma, este relés pode ser utilizado em ambos os cenários com objetivo de detectar o fenômeno de ilhamento.

7.1 Sugestões Para Trabalhos Futuros

- Cenários de teste de estabilidade com grandes variações de frequência (devido a oscilações na rede elétrica);
- Simulações onde ocorrem alterações na topologia da rede de distribuição
- Implementação de outros relés de proteção para serem aplicados a geração distribuída
- Cenários de simulação onde ocorre variações de potência reativa no sistema elétrico

Referências

ANEEL. Regras e Procedimentos de Distribuição (Prodist). **gov.br**, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/prodist>>. Acesso em: 08 ago. 2022.

BACELAR, Marianna N. **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ESTÁTICO E DINÂMICO DE UMA MICRORREDE NA OCORRÊNCIA DE ILHAMENTOS INTENCIONAIS.**

BORBELY, Anne-Marie; KREIDER, Jan F. **Distributed Generation: The power paradigm for the new millenium.**

BORGES, T. H. **Panorama da Geração Distribuída de Energia Elétrica no Brasil: Avanços e Desafios.**

BRIGHT, C. G. C. **Comparison of rate of change of frequency protection. A solution to the detection of loss of mains.**

CIGRÉ WORKING GROUP, Report O. W. G. B. 3. **The impact of renewable energy sources and distributed generation on substation protection and automation.**

DE MELLO CAMPOS, André M. **Introdução à geração distribuída no Brasil.**

DECRETO N° 2.003. **Planalto**, 1996. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/D2003.htm#:~:text=DECRETO%20N%C2%BA%202.003%2C%20DE%2010,Autoprodutor%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%AAsncias.>. Acesso em: 08 ago. 2022.

DECRETO N° 2.335. **Planalto**, 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/D2335.htm#:~:text=D2335&text=DECRETO%20N%C2%BA%202.335%2C%20DE%206,Confian%C3%A7a%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%AAsncias.>. Acesso em: 08 ago. 2022.

DECRETO N° 2.655. **Planalto**, 1998. Disponível em: <2022>. Acesso em: 08 ago. 2022.

ENERGISA. NDU 013. **ENERGISA**, 2022. Disponível em: <<https://www.energisa.com.br/Documents/Normas%20t%C3%A9cnicas/NDU%20013%20-%20Crit%C3%A9rios%20para%20a%20Conex%C3%A3o%20em%20Baixa%20Tens%C3%A3o%20de%20Acessantes%20de%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Distribu%C3%ADa%20ao%20Sistema%20de%20Distribui%C3%A7%C3%A3o.pdf>>. Acesso em: 08 ago. 2022.

EPE, Empresa D. P. E. **Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional – BEN 2021.**

FUNABASHI, T.; KOYANAGI, K.; YOKOYAMA, R. **A review of islanding detection methods for distributed resources.**

GONÇALVES, Luiz F. **Contribuições para o estudo teórico e experimental de sistemas de geração distribuída.**

GROUP, CIGRÉ W. **Impact of increasing contribution of dispersed generation on the power system.**

HYDRO-QUÉBEC. User's Guide (Specialized Power Systems). **MathWorks**, 2022. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/sps/powersys_ug.pdf>. Acesso em: 23 set. 2022.

INEE. Geração distribuída e conexão ao sistema elétrico – Proposta de revisão da resolução ANEEL 281/99. **Instituto Nacional de Eficiência Energética**, 2002. Disponível em: <http://www.inee.org.br/down_loads/forum/Res281_proposta_alteracao_INEE_01_04.pdf>. Acesso em: 08 ago. 2022.

ISHIBASHI, A. et al. **New type of islanding detection system for distributed generation based on voltage angle difference between utility network and distributed generation site.**

JENKINS, Nick et al. **Embedded generation.**

JOHN, V.; YE, Zhihong; KOLWALKAR, A. **Investigation of anti-islanding protection of power converter based distributed generators using frequency domain analysis.**

JR, José C. D. M. V. **Detecção de Ilhamento de Geradores Distribuídos: Uma Revisão Bibliográfica Sobre o Tema.**

JR., José C. D. M. V. **DETECÇÃO DE ILHAMENTO DE GERADORES DISTRIBUÍDOS: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE O TEMA.**

KIM, J.E.; HWANG, J.S. **Islanding detection method of distributed generation units connected to power distribution system.**

LEI N° 9.074. **Planalto**, Brasília, 1995. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19074cons.htm>. Acesso em: 08 ago. 2022.

LEI N° 9.427. **Planalto**, 1996. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19427compilada.htm>. Acesso em: 2022 ago. 08.

LEI N° 9.648. **Planalto**, 1998. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19648cons.htm>. Acesso em: 08 ago. 2022.

LORA, Electo E. S.; HADDAD, J. **Geração distribuída: aspectos tecnológicos, ambientais e institucionais.**

MARCHESAN, Gustavo E. A. **Deteção de ilhamento em sistemas de distribuição com geração síncrona distribuída.**

MARCO legal da GD. **Portal Solar**, 2022. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/noticias/mercado/geracao-distribuida/marco-legal-da-gd-confira-a-linha-do-tempo-da-regulacao-e-legislacao-do-mercado-no-brasil>>. Acesso em: 08 ago. 2022.

MATHWORKS. **Reference (Electronics, Mechatronics, and Power Systems).**

MATHWORKS. Detailed Model of a 100-kW Grid-Connected PV Array. **MathWorks**, 2022. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/sps/ug/detailed-model-of-a-100-kw-grid-connected-pv-array.html;jsessionid=58f6f8a3df05b69d3f4f09c5a319>>. Acesso em: 01 out. 2022.

MATHWORKS, The. IEEE 13 Node Test Feeder. **MathWorks**, 2022. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/sps/ug/ieee-13-node-test-feeder.html;jsessionid=6ca44249455944a5f031167a6d9f>>. Acesso em: 26 nov. 2022.

MOACYR A. G. DE BRITO, Leonardo P. S. L. G. J. . G. A. E. M. C. A. C. . 2. I. C. O. C. E. P. (. Detailed Model of a 100-kW Grid-Connected PV Array. **MathWorks**, 2011. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/sps/ug/detailed-model-of-a-100-kw-grid-connected-pv-array.html>>. Acesso em: 26 nov. 2022.

MOTOHASHI, J. et al. **Comparison of digital simulation and field test results of islanding detection system for synchronous generators.**

MULHAUSEN, John E. A. **Anti-Island Today, Successful Islanding in the Future.**

NAISANI, Pouria et al. **Protection of Distributed Generation (DG) interconnection.**

NICOLOTTI, Rafael D.; SILVA, Ricardo M. C. D.; JORGE, Thyago D. M. **Avaliação do desempenho dos relés de proteção anti-ilhamento em um sistema com geração distribuída.**

NREL. National Renewable Energy Laboratory. **System Advisor Model (SAM)**, 2017. Disponível em: <<https://sam.nrel.gov/>>. Acesso em: 01 out. 2022.

O'KANE, P.; FOX, B. **Loss of mains detection for embedded generation by system impedance monitoring.**

ONS. Procedimentos de Rede. **ONS**, 2022. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>>. Acesso em: 08 ago. 2022.

PITOMBO, Sérgio O.; JÚNIOR, Vieira; MELO, José C. D. **Proteção adaptativa anti-ilhamento de geradores síncronos distribuídos.**

PL 2829. **Câmara dos Deputados**, 2019. Disponível em: <<https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2228151>>. Acesso em: 08 ago. 2022.

POSHARP. SPR-305E-WHT-D. **Posharp**, 2022. Disponível em: <http://www.posharp.com/spr-305e-wht-D-solar-panel-from-sunpower_p1621616600d.aspx>. Acesso em: 01 out. 2022.

PUJHARI, Truptimayee. **Islanding detection in distributed generation.**

REN 482. **ANEEL**, 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 08 ago. 2022.

REN 687. **ANEEL**, 2015. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 08 ago. 2022.

REZENDE, Jaqueline O. **Geração Distribuída: Legislação Brasileira, Perspectivas e Estudo de Casos via ATP.**

ROPP, M.E. et al. **Using power line carrier communications to prevent islanding.**

SAHA, Shammya; JOHNSON, Nathan. **Modeling and Simulation in XENDEE IEEE 13 Node Test Feeder.**

SAHA, Shammya; JOHNSON, Nathan. **Modeling and Simulation in XENDEE IEEE 13 Node Test Feeder.**

SILVEIRA, Eddie M. **Estudo de técnicas anti-ilhamento ativas e passivas com foco na redução da zona de não detecção.**

STEVENS, J. et al. **Development and Testing of an Approach to Anti-Islanding in Utility-Interconnected Photovoltaic Systems.**

TRINDADE, Fernanda C. L. et al. **Control systems analysis of industrial plants with synchronous generators during islanded operation.**

VENDRUSCOLO, Miréli B. **ANÁLISE COMPARATIVA DAS TÉCNICAS CLÁSSICAS DE MPPT.**

VIEIRA, José C. D. M. J. . F. W. E. F. A. L. M. **Análise Comparativa Sobre a Eficácia de Relés Baseados em Medidas de Frequência para Detecção de Ilhamento de Geradores Distribuídos.**

VIEIRA, José C. D. M. J. E. S. D. **Um método prático para a definição dos ajustes de relés baseados em medidas de frequência usados para a detecção de ilhamento de geração distribuída.**

VIEIRA, Jose C. M. et al. **An Investigation on the Nondetection Zones of Synchronous Distributed Generation Anti-Islanding Protection.**

XU, W.; MAUCH, K.; MARTEL, S. **An Assessment of Distributed Generation Islanding Detection Methods and issues for Canada.**

YE, Z.; DAME, M.; KROPOSKI, B. **Grid-Connected Inverter Anti-Islanding Test Results for General Electric Inverter-Based Interconnection Technology.**

YE, Zhihong et al. **Evaluation of anti-islanding schemes based on nondetection zone concept.**

YIN, Jun; CHANG, Liuchen; DIDUCH, C. **Recent developments in islanding detection for distributed power generation.**

APÊNDICE A

GRAFICOS CONFORME CENÁRIOS DA SIMULAÇÃO

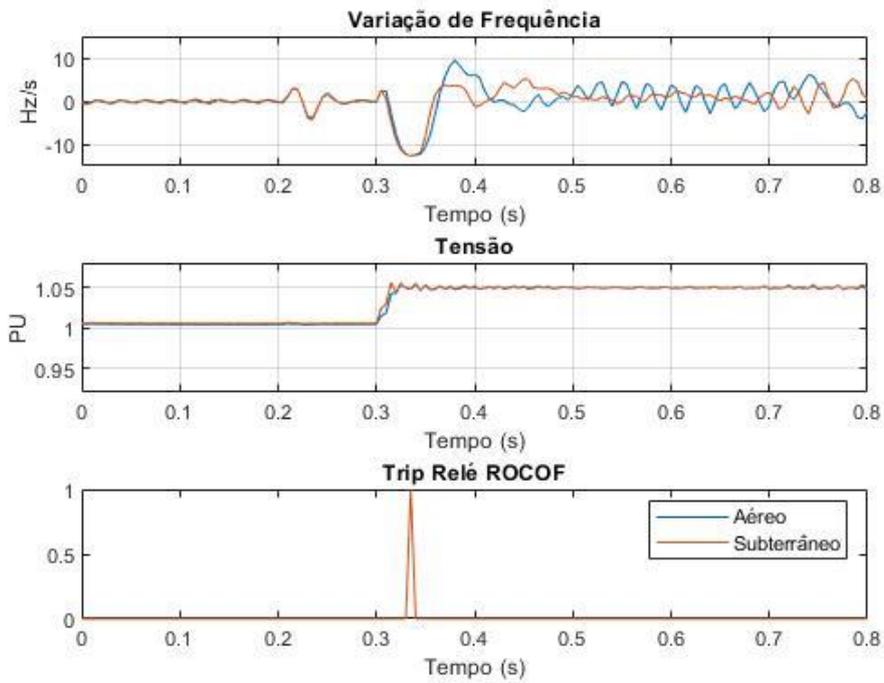


Figura 20 - Comparação entre Cenários S01 - Relé ROCOF

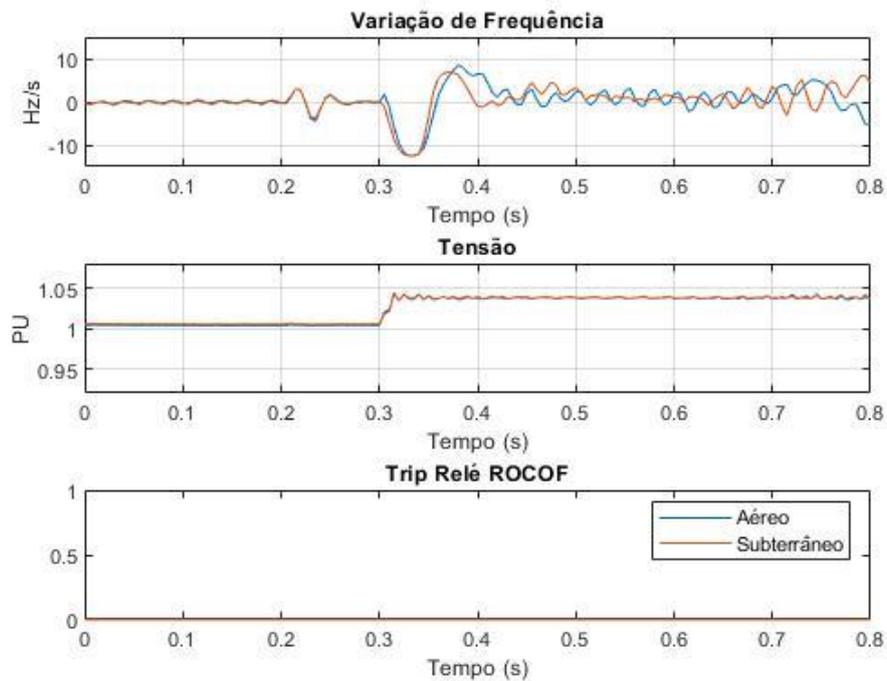


Figura 21 - Comparação entre Cenários S02 - Relé ROCOF

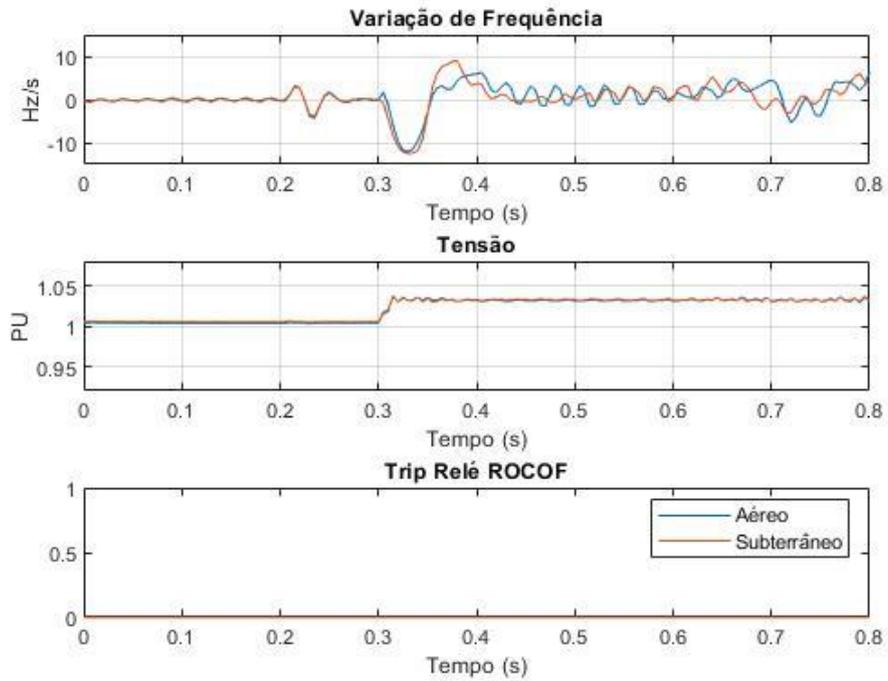


Figura 22 - Comparação entre Cenários S03 - Relé ROCOF

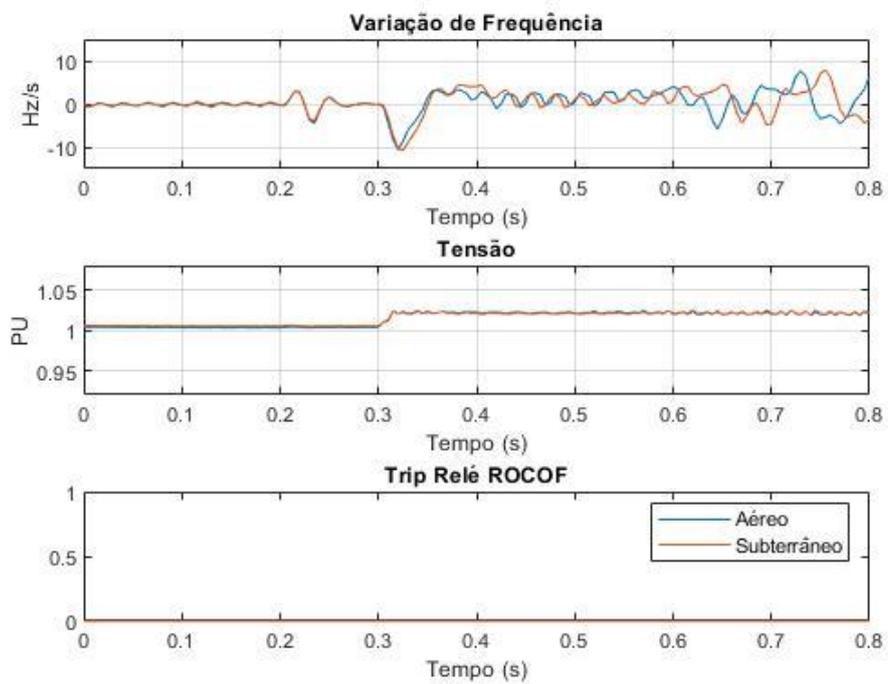


Figura 23 - Comparação entre Cenários S04 - Relé ROCOF

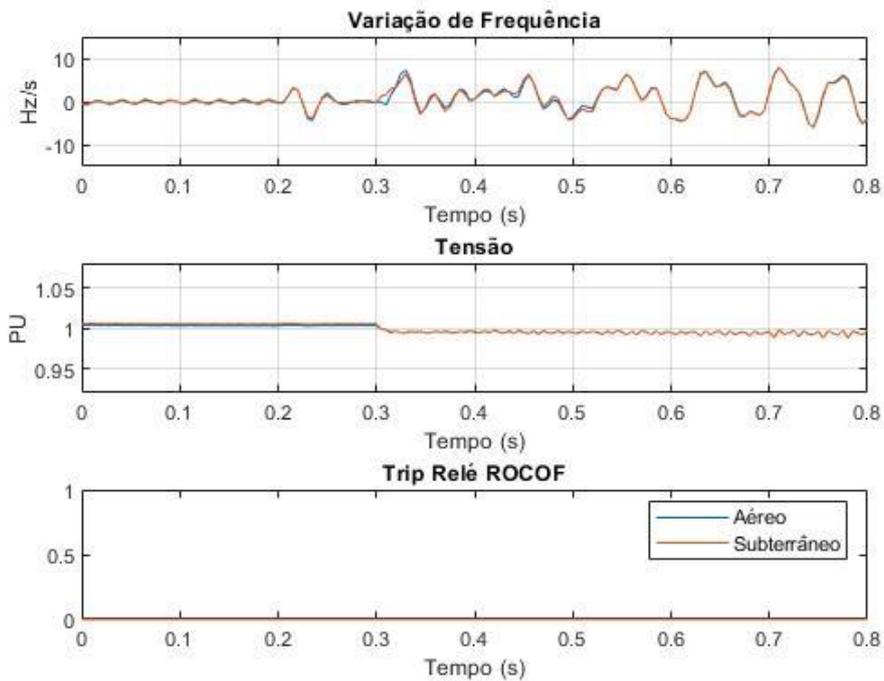


Figura 24 - Comparação entre Cenários S05 - Relé ROCOF

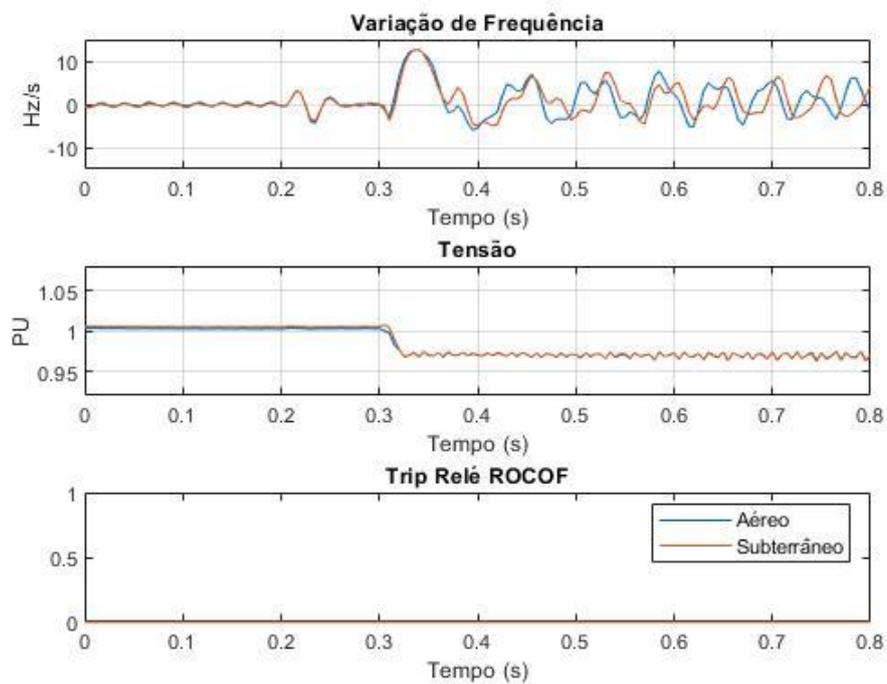


Figura 25 - Comparação entre Cenários S06 - Relé ROCOF

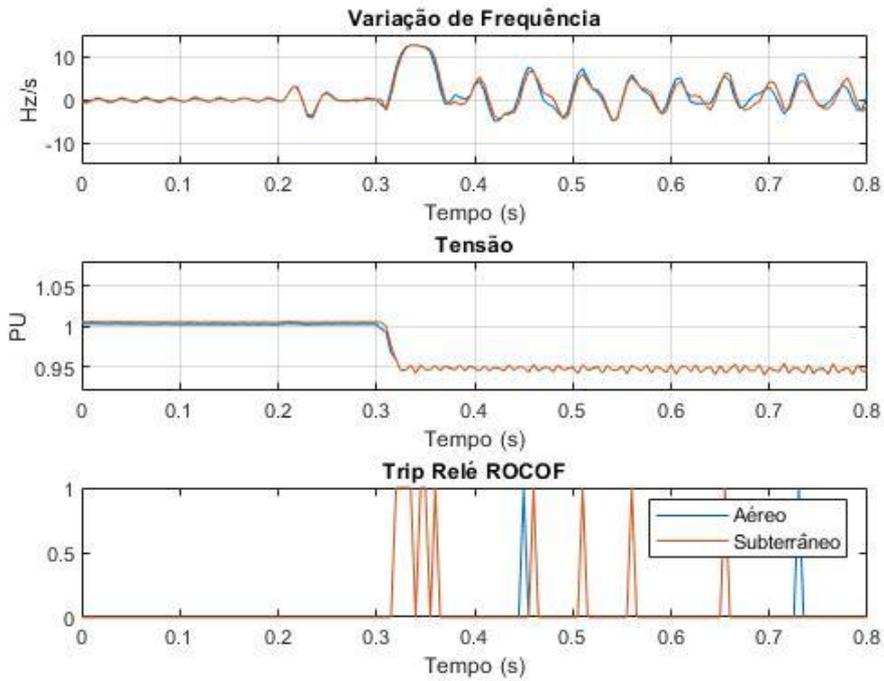


Figura 26 - Comparação entre Cenários S07 - Relé ROCOF

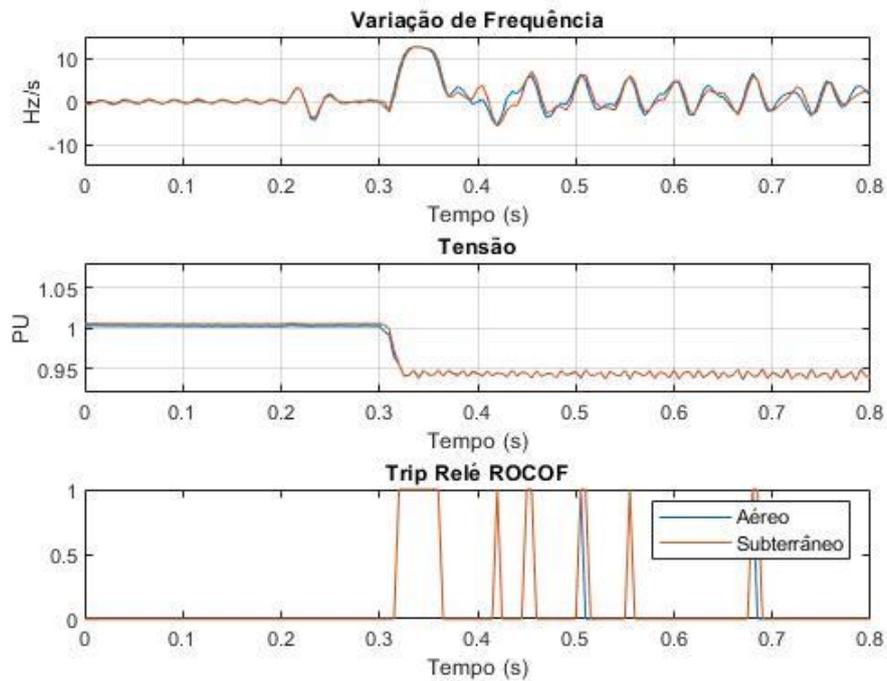


Figura 27 - Comparação entre Cenários S08 - Relé ROCOF

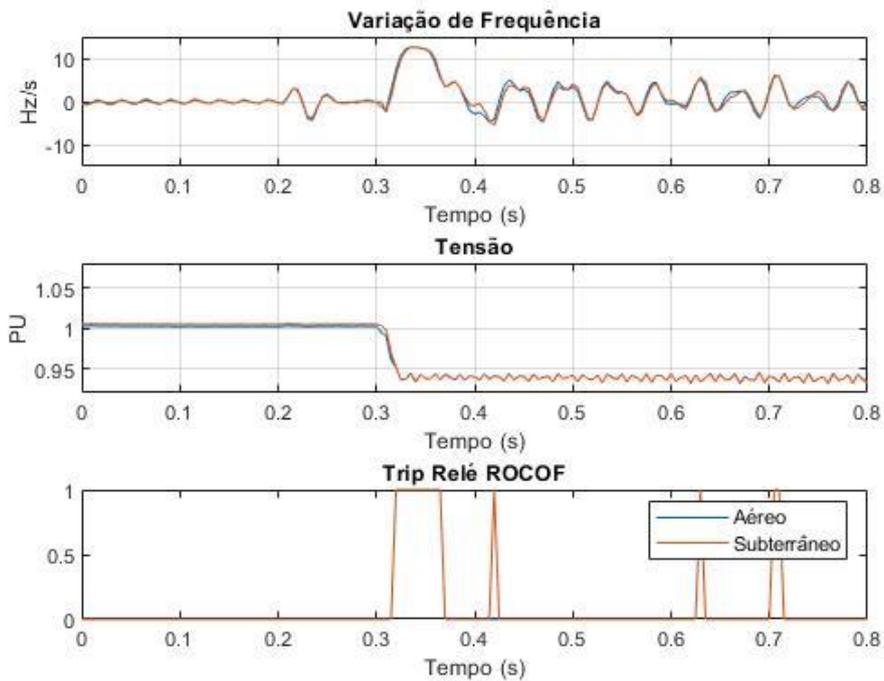


Figura 28 - Comparação entre Cenários S09 - Relé ROCOF

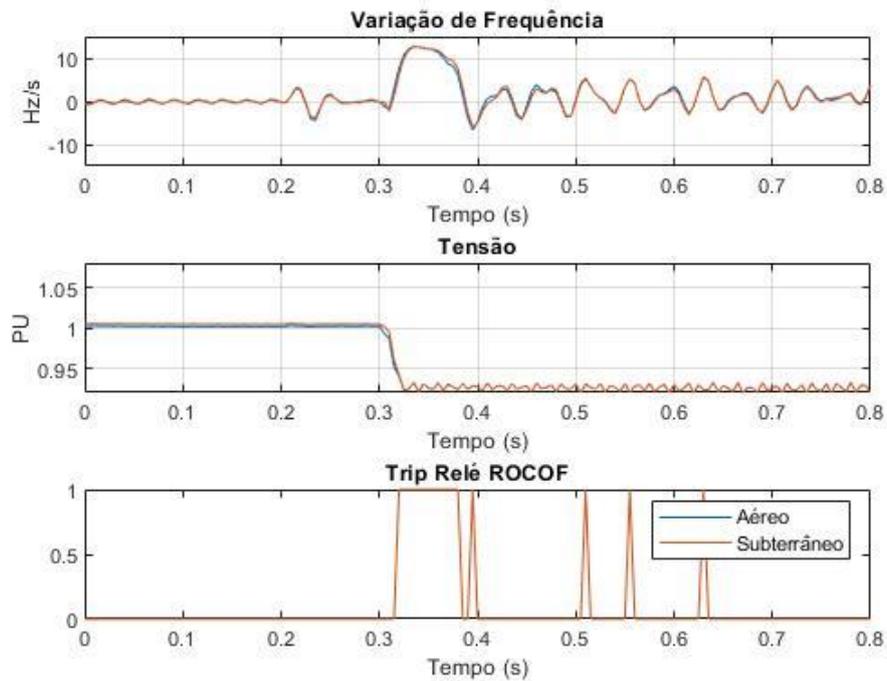


Figura 29 - Comparação entre Cenários S10 - Relé ROCOF

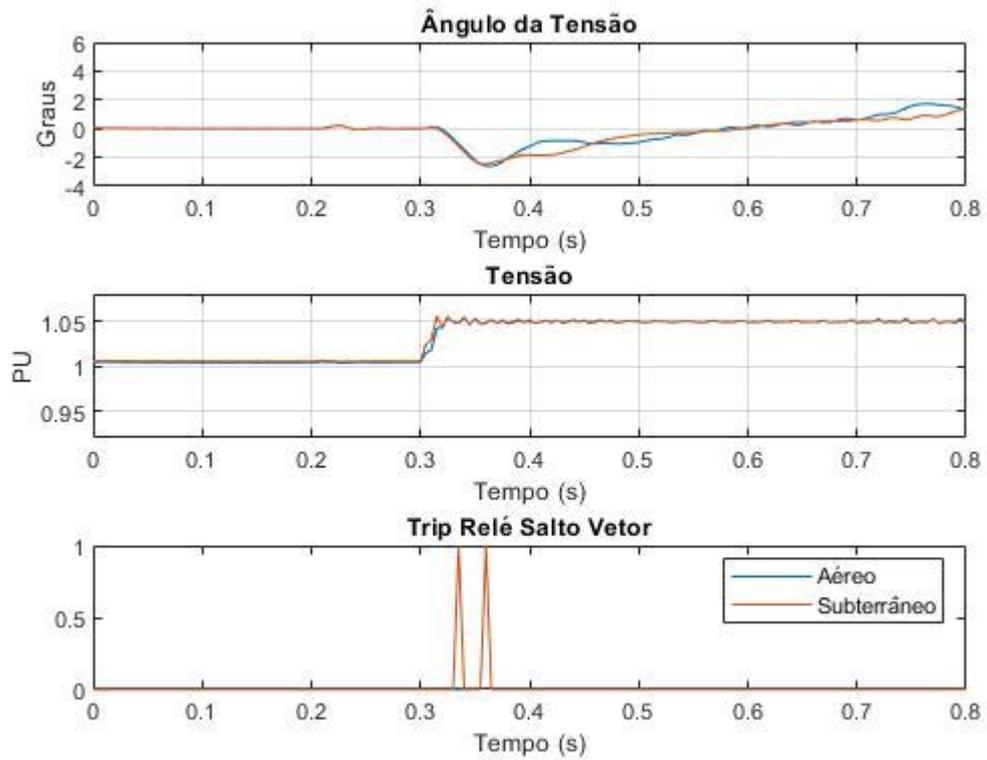


Figura 30 - Comparação entre Cenários S01 - Relé Salto Vetor

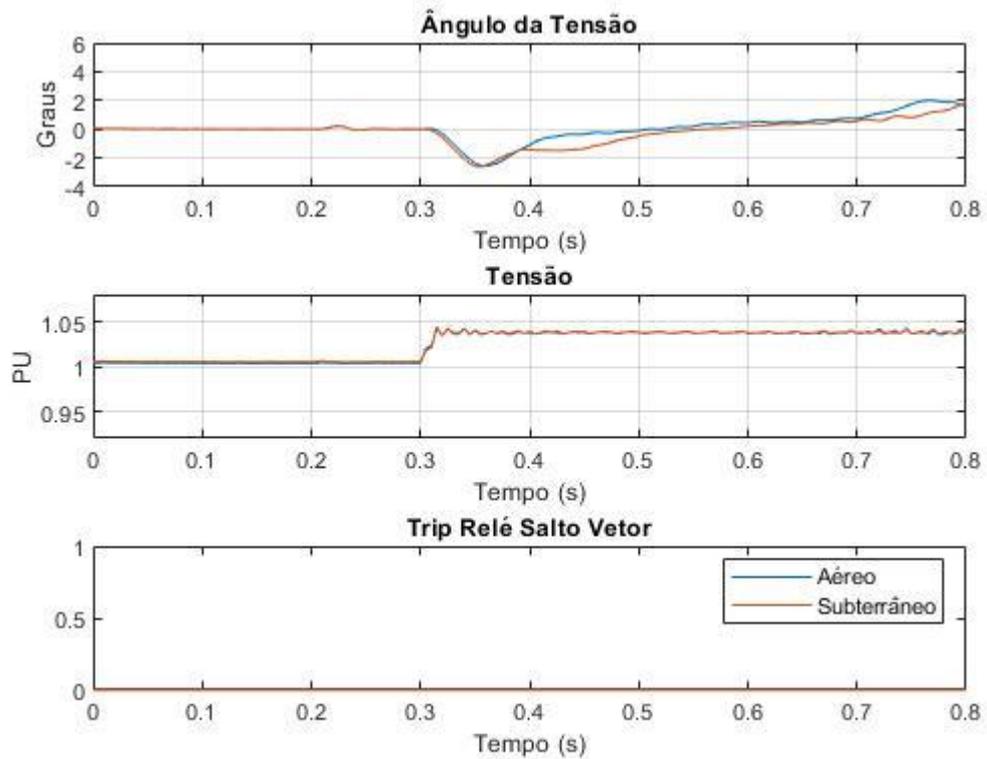


Figura 31 - Comparação entre Cenários S02 - Relé Salto Vetor

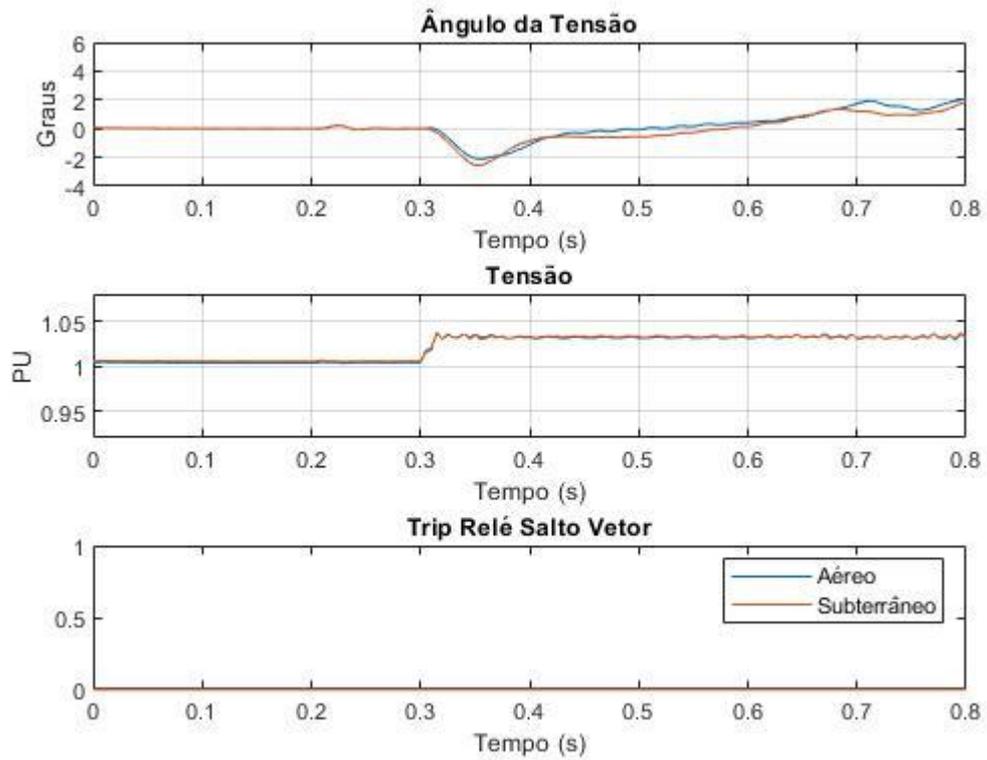


Figura 32 - Comparação entre Cenários S03 - Relé Salto Vetor

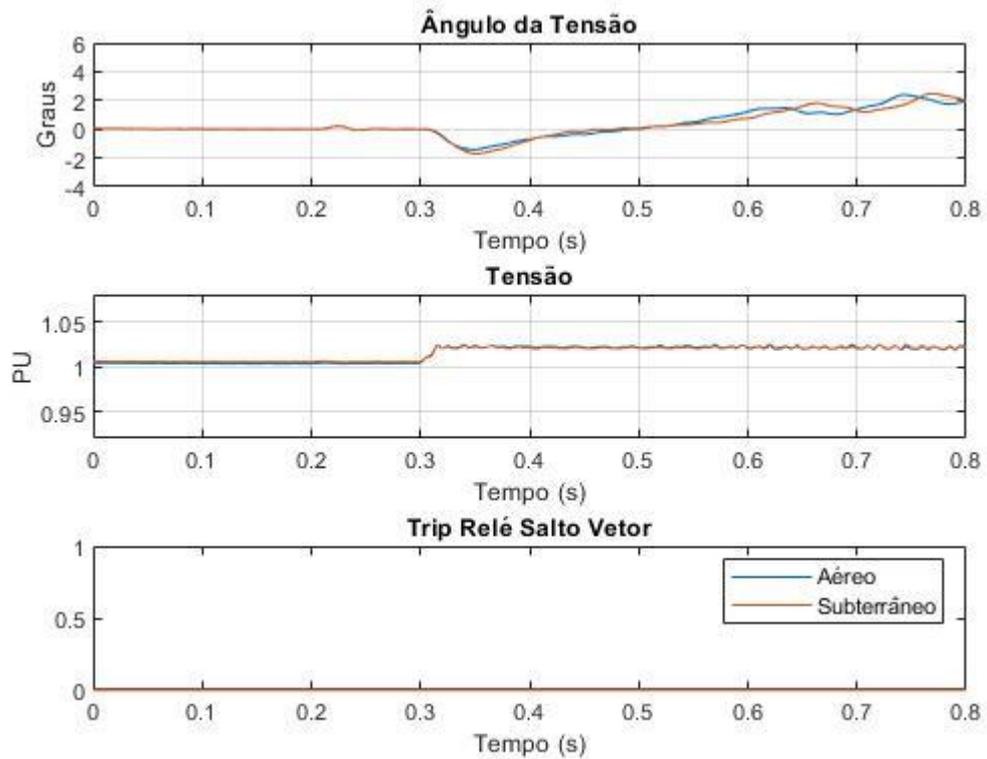


Figura 33 - Comparação entre Cenários S04 - Relé Salto Vetor

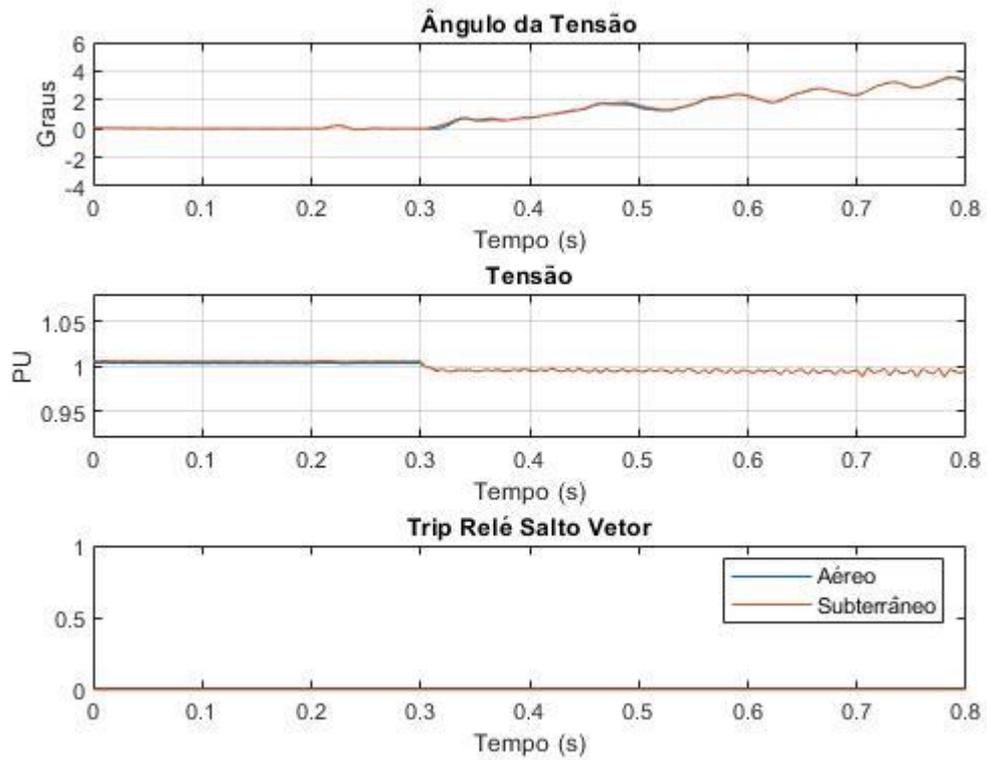


Figura 34 - Comparação entre Cenários S05 - Relé Salto Vetor

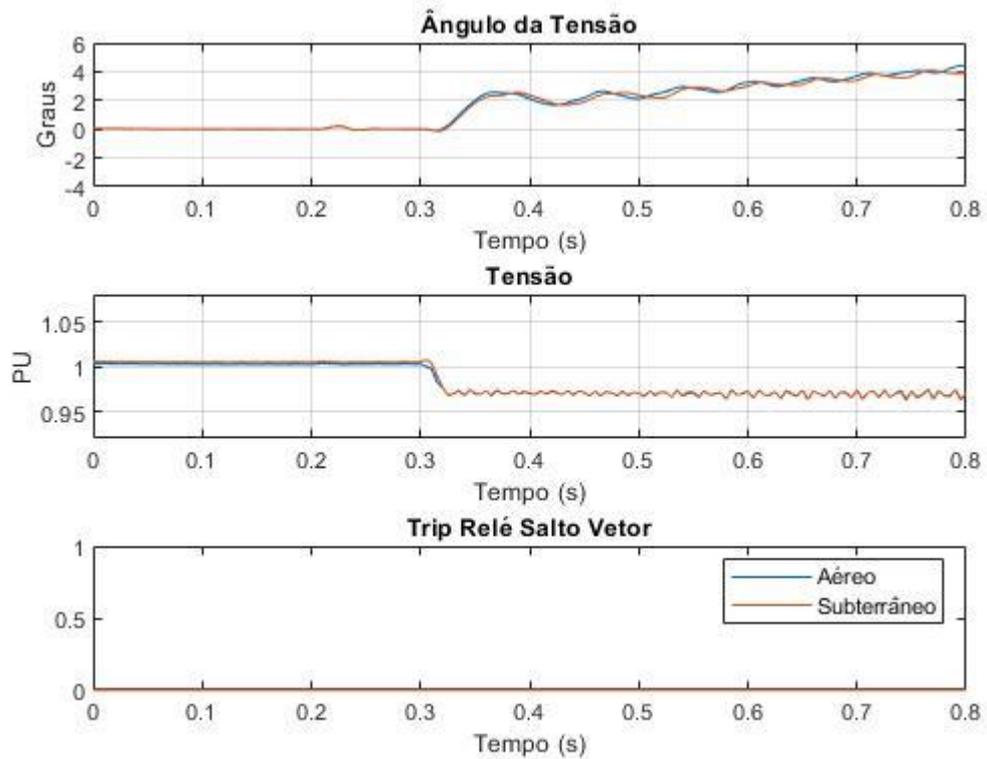


Figura 35 - Comparação entre Cenários S06 - Relé Salto Vetor

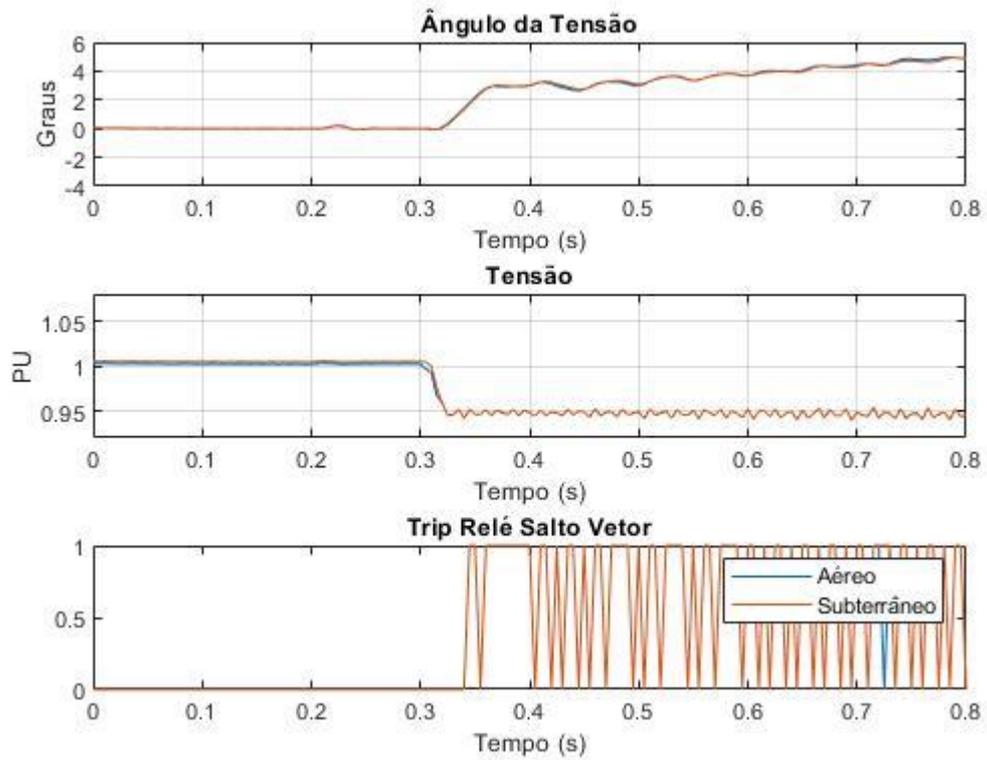


Figura 36 - Comparação entre Cenários S07 - Relé Salto Vetor

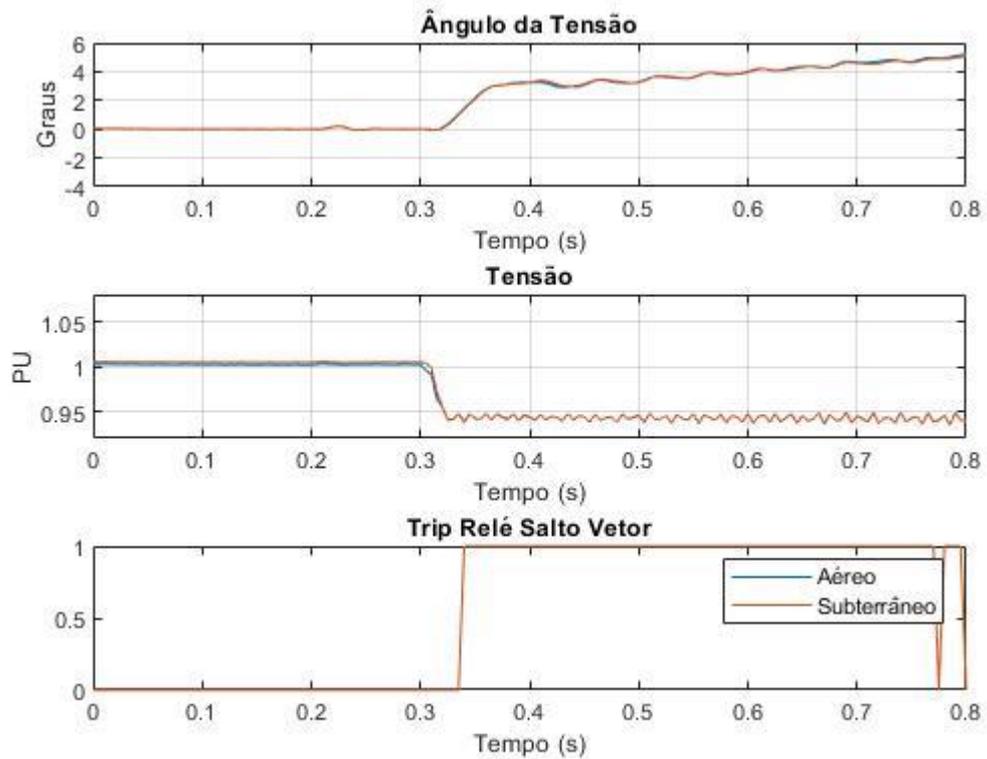


Figura 37 - Comparação entre Cenários S08 - Relé Salto Vetor

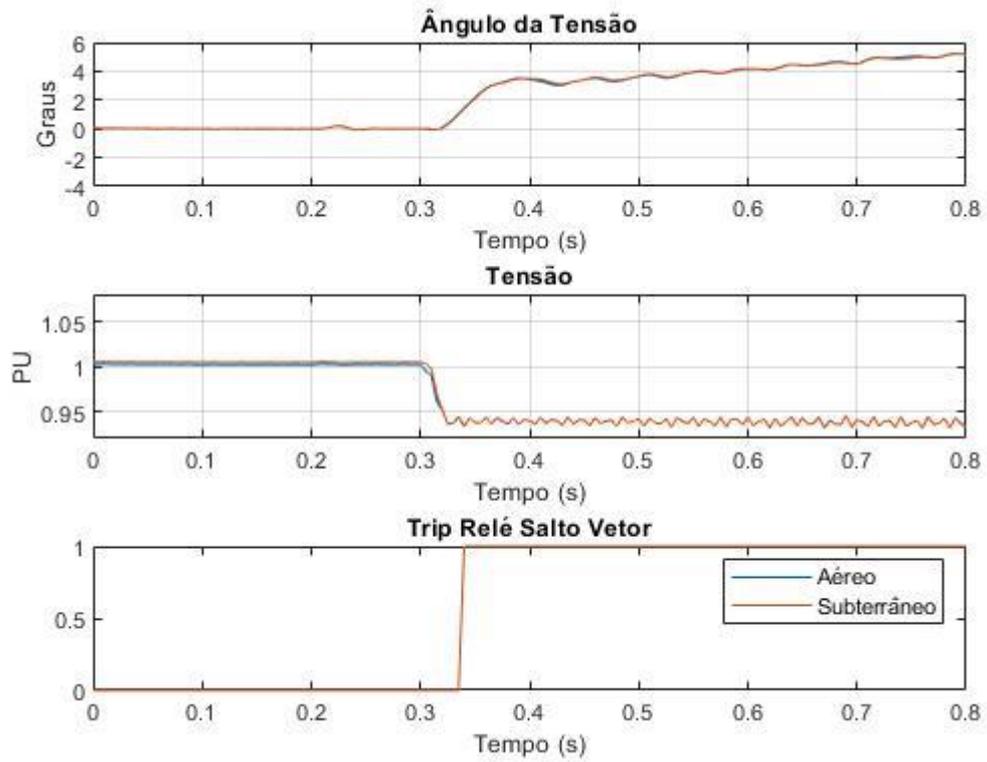


Figura 38 - Comparação entre Cenários S09 - Relé Salto Vetor

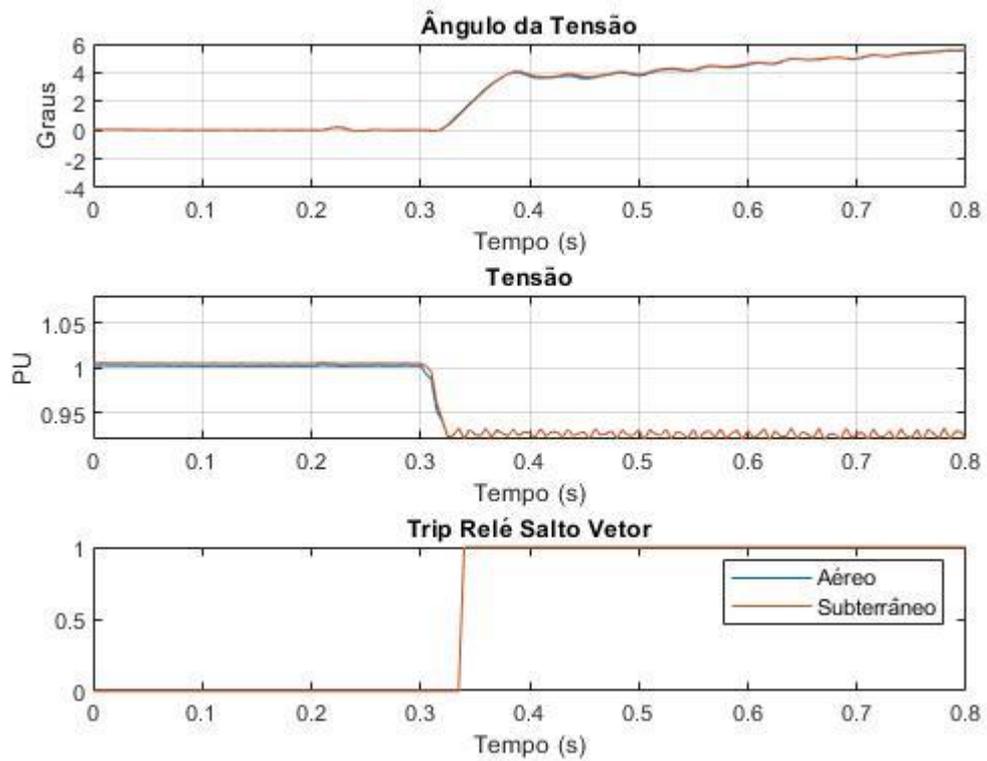


Figura 39 - Comparação entre Cenários S10 - Relé Salto Vetor

ANEXO

Parâmetros de configuração do sistema modelado

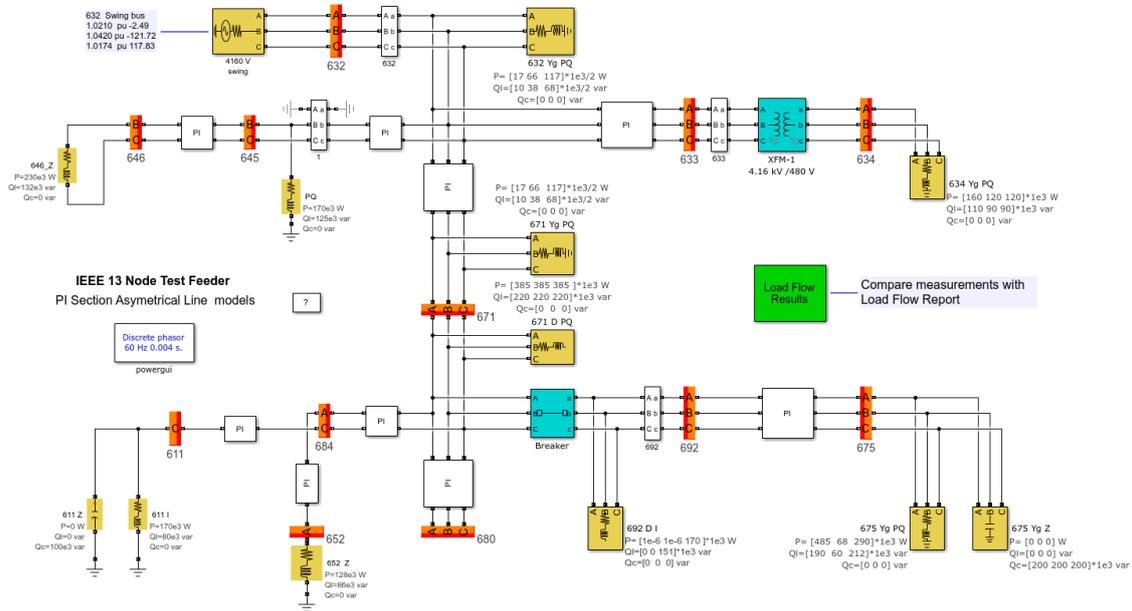


Figura 40 - Diagrama Trifilar IEEE 13 Barras Fonte: (MATHWORKS, 2022)

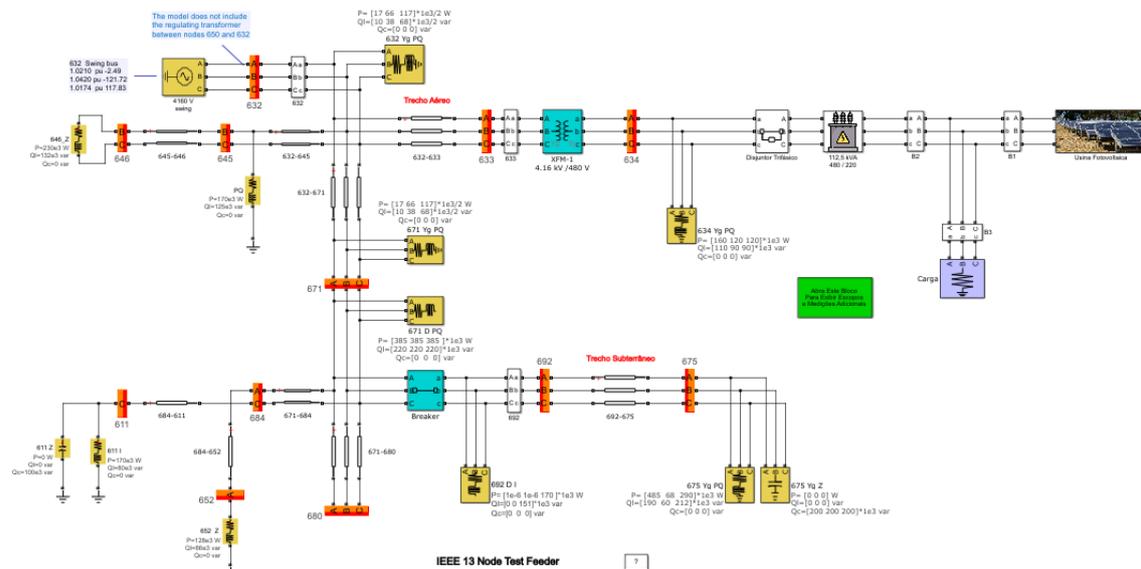


Figura 41 - Conexão da GD no Trecho Aéreo Fonte: (MATHWORKS, 2022)

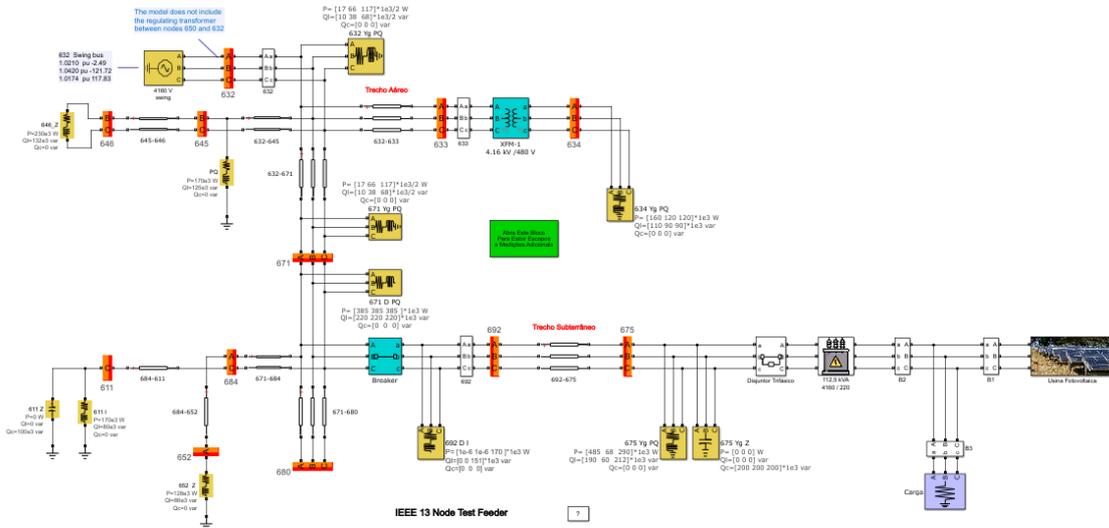


Figura 42 - Conexão da GD no Trecho Subterrâneo Fonte: (MATHWORKS, 2022)

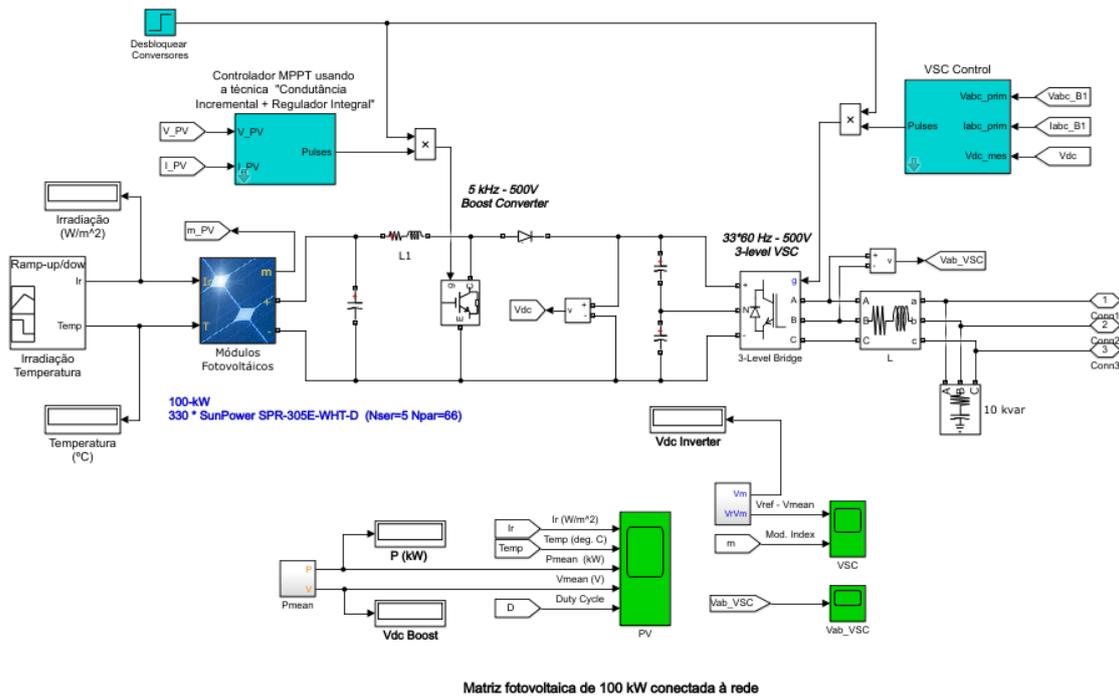


Figura 43 - Detalhes Matriz Fotovoltaica (MOACYR A. G. DE BRITO, 2011)

Os dados referentes ao sistema elétrico simulado são apresentados nas tabelas 3 a 10

Tabela 3 - Dados de configuração da linha aérea

| Config. | Phasing | Fase | Neutro | Espaçamento |
|---------|---------|-----------------|---------|-------------|
| | | ACSR | ACSR | ID |
| 601 | B A C N | 556,500 26/7 | 4/0 6/1 | 500 |
| 602 | C A B N | 4/0 6/1 | 4/0 6/1 | 500 |
| 603 | C B N | 1/0 | 1/0 | 505 |
| 604 | A C N | 1/0 | 1/0 | 505 |
| 605 | C N | 1/0 | 1/0 | 510 |

Tabela 4 - Dados de configuração da linha subterrânea

| Config. | Phasing | Cabo | Neutro | ID espacial |
|---------|---------|----------------|--------|-------------|
| 606 | A B C N | 250.000 AA, CN | Nenhum | 515 |
| 607 | A N | 1/0 AA, TS | 1/0 | 520 |

Tabela 5 - Dados do segmento da linha

| Nó A | Nó B | Comprimento (ft.) | Config. |
|------|------|-------------------|-------------|
| 632 | 645 | 500 | 603 |
| 632 | 633 | 500 | 602 |
| 633 | 634 | 0 | XFM-1 |
| 645 | 646 | 300 | 603 |
| 650 | 632 | 2000 | 601 |
| 684 | 652 | 800 | 607 |
| 632 | 671 | 2000 | 601 |
| 671 | 684 | 300 | 604 |
| 671 | 680 | 1000 | 601 |
| 671 | 692 | 0 | Interruptor |
| 684 | 611 | 300 | 605 |
| 692 | 675 | 500 | 606 |

Tabela 6 - Dados dos Transformadores

| | Kva | kV-high | kV-baixo | R - % | X - % |
|-------------|-------|-----------------|-----------------|-------|-------|
| Subestação: | 5,000 | 115 - D | 4.16 Gr. Y | 1 | 8 |
| XFM -1 | 500 | 4.16 – Gr.W. | 0.48 – Gr.W. | 1.1 | 2 |

Tabela 7 - Dados dos Capacitores

| Nodo | Ph-A | Ph-B | Ph-C |
|-------|------|------|------|
| | Kvar | Kvar | Kvar |
| 675 | 200 | 200 | 200 |
| 611 | | | 100 |
| Total | 200 | 200 | 300 |

Tabela 8 - Dados do regulador

| | | | |
|------------------------------|-----------|------|------|
| Regulator ID: | 1 | | |
| Segmento de linha: | 650 - 632 | | |
| Localização: | 50 | | |
| Fases: | A - B -C | | |
| Conexão: | 3-Ph,LG | | |
| Fase de monitoramento: | A-B-C | | |
| Largura de banda: | 2.0 volts | | |
| Razão PT: | 20 | | |
| Classificação ct primária: | 700 | | |
| Configurações compensadoras: | Ph-A | Ph-B | Ph-C |
| R - Configuração: | 3 | 3 | 3 |
| X - Configuração: | 9 | 9 | 9 |
| Nível voltage: | 122 | 122 | 122 |

Tabela 9 - Dados de carga

| Node | Carga | Ph-1 | Ph-1 | Ph-2 | Ph-2 | Ph-3 | Ph-3 |
|------|--------|------|------|------|------|------|------|
| | Modelo | Kw | Kvar | Kw | Kvar | Kw | Kvar |
| 634 | Y-PQ | 160 | 110 | 120 | 90 | 120 | 90 |
| 645 | Y-PQ | 0 | 0 | 170 | 125 | 0 | 0 |
| 646 | D-Z | 0 | 0 | 230 | 132 | 0 | 0 |
| 652 | Y-Z | 128 | 86 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 671 | D-PQ | 385 | 220 | 385 | 220 | 385 | 220 |
| 675 | Y-PQ | 485 | 190 | 68 | 60 | 290 | 212 |
| 692 | D-I | 0 | 0 | 0 | 0 | 170 | 151 |
| 611 | Y-I | 0 | 0 | 0 | 0 | 170 | 80 |
| | TOTAL | 1158 | 606 | 973 | 627 | 1135 | 753 |

Tabela 10 - Dados de carga distribuídos

| Nó A | Nó B | Carga | Ph-1 | Ph-1 | Ph-2 | Ph-2 | Ph-3 | Ph-3 |
|------|------|--------|------|------|------|------|------|------|
| | | Modelo | Kw | Kvar | Kw | Kvar | Kw | Kvar |
| 632 | 671 | Y-PQ | 17 | 10 | 66 | 38 | 117 | 68 |