

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

MARCEL DA CRUZ STALTER

**INFLUÊNCIA DA RESPOSTA DOS ESTIMADORES DE FREQUÊNCIA
NO DESEMPENHO DA PROTEÇÃO CONTRA SOBRE-EXCITAÇÃO DO
GERADOR SÍNCRONO**

Alegrete

2019

MARCEL DA CRUZ STALTER

**INFLUÊNCIA DA RESPOSTA DOS ESTIMADORES DE FREQUÊNCIA
NO DESEMPENHO DA PROTEÇÃO CONTRA SOBRE-EXCITAÇÃO DO
GERADOR SÍNCRONO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação Stricto Sensu em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos

Alegrete
2019

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

S782i Stalter, Marcel

Influência da Resposta dos Estimadores de Frequência no
Desempenho da Proteção Contra Sobre-Excitação do Gerador
Síncrono / Marcel Stalter.

97 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, 2019.

"Orientação: Eduardo Machado dos Santos".

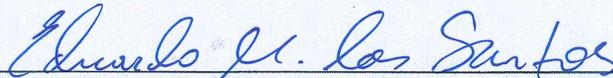
1. Sistemas Elétricos. 2. Sistemas de proteção. 3. Proteção
de Geradores Síncronos. I. Título.

MARCEL DA CRUZ STALTER

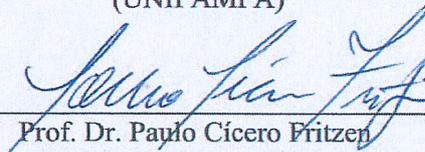
**INFLUÊNCIA DA RESPOSTA DOS ESTIMADORES DE FREQUÊNCIA
NO DESEMPENHO DA PROTEÇÃO CONTRA SOBRE-EXCITAÇÃO DO
GERADOR SÍNCRONO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação - Stricto Sensu em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

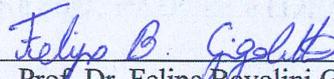
Dissertação defendida e aprovada em: 16 de abril de 2019.
Banca examinadora:



Prof. Dr. Eduardo Machado dos Santos
Orientador
(UNIPAMPA)



Prof. Dr. Paulo Cícero Fritzen
(UTFPR)



Prof. Dr. Felipe Bovolini Grigoletto
(UNIPAMPA)

Dedico esse trabalho a toda minha família e amigos,
os quais me apoiaram, incentivaram e deram força
para a conclusão do mesmo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente a Deus, aos meus pais João Carlos e Fátima pelo apoio, suporte e paciência durante esta etapa da minha vida.

A meus irmãos Guilherme e Thaís, os quais sempre demonstraram seu apoio, com quem pude compartilhar alegrias e tristezas.

Aos meus avós, José, Jandira e Wanda (in memoriam), por todo o apoio e incentivo durante minha jornada de estudos.

Em especial, a pessoa qual contribuiu para a realização desse trabalho, meu orientador e amigo Eduardo Machado dos Santos, pois sem sua paciência e dedicação não seria possível à realização do presente trabalho. A todo corpo docente da Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UNIPAMPA por todo o conhecimento transmitido durante os anos de mestrado.

Agradeço a todos os membros do grupo de pesquisa GESEP, por me acompanhar e apoiar durante o processo de realização deste trabalho.

Agraço a toda a turma da toca do grêmio que além de me acompanhar durante o caminho para a realização desse trabalho, quais também me acompanharam nos títulos conquistados pelo nosso grêmio durante o período da realização deste mesmo trabalho. Em especial aos amigos John Jefferson Saldanha, Arian Fagundes, Alex Itczak, Davi Bevilaqua e Paulo Ricardo Fiuza.

"Os que desprezam pequenos acontecimentos
nunca farão grandes descobertas. Pequenos
momentos mudam grandes rotas."
(Augusto Cury)

RESUMO

A crescente demanda por energia elétrica, ao longo dos anos, tornou os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) mais complexos, uma vez que a rede deve ser capaz de suprir tal demanda. Para isto, faz-se necessária a implantação de novas linhas de transmissão, inserção de novas plantas geradoras, bem como de novas tecnologias, de modo a garantir robustez e confiabilidade ao SEP. Nesse contexto, pode-se destacar a crescente inserção dos relés digitais no SEP, os quais permitem grandes evoluções nos sistemas de proteção, tanto em relação à atuação no sistema, quanto para a coordenação e seletividade dos dispositivos. Relés numéricos ou digitais, realizam diversas funções complexas, além de executar as funções básicas de proteção, através um microprocessador, o qual utiliza algoritmos baseados no processamento dos sinais de tensão e corrente. Contudo, novos e velhos problemas decorrentes das diversas condições operacionais do SEP e suas possíveis adversidades persistem, tornando essencial estudos na área de processamento de sinais aplicado à proteção digital. Assim, os geradores e transformadores estão sujeitos a grandes danos, que ocorrem durante falhas e operações indevidas do sistema, as quais devem ser rapidamente identificadas e eliminadas. Assim, a função ANSI 24 é utilizada para a proteção de transformadores e geradores contra a sobre-excitação, fenômeno que ocorre devido a um sobrefluxo magnético no núcleo de uma máquina. Uma vez que o fluxo magnético é diretamente proporcional à tensão nominal e inversamente proporcional à frequência nominal, o ajuste desta função de proteção se dá pelo valor percentual da razão volts/hertz (V/Hz) destes parâmetros. Ressalta-se que a função ANSI 24 é necessária para detectar situações em que as funções de sobretensão e variação de frequência não detectam o defeito. Ainda, vale ressaltar que o ajuste do relé 24 se faz com base na curva de dano de cada equipamento, a qual é normalmente fornecida pelo fabricante. Dessa forma, a literatura especializada recomenda ajustar a função 24 com uma curva de tempos de atuação 20% menores do que aqueles verificados na curva de dano do equipamento protegido. Tendo em vista que a frequência é um dos parâmetros utilizados pela função 24, pode-se concluir que a ferramenta computacional utilizada para a estimação da frequência do sistema influencia diretamente a atuação deste relé. Assim, este trabalho tem por objetivo demonstrar o comportamento da função 24 frente à utilização diferentes métodos de estimação de frequência recentemente divulgados na literatura especializada. Para isso, um sistema teste foi implementado no software DIgSilent Power Factory[®], com o intuito de simular eventos de sobre-excitação, a partir dos quais os sinais de tensão a serem processados pelos estimadores de frequência e pela respectiva lógica do relé 24 foram gerados. Para tal, tanto as lógicas de estimação de frequência, quanto o algoritmo da função 24, foram implementadas no software Matlab[®]. Por fim, ressalta-se que os resultados obtidos permitiram concluir que os estimadores de frequência influenciam diretamente o desempenho da função 24, podendo provocar atrasos na atuação, bem como a não operação ou a operação indevida dos relés que incorporem essa função.

Palavras-chave: Desempenho, Estimação da Frequência, Geradores, Operação, Relés, Sistemas Elétricos de Potência, Sobre-excitação.

ABSTRACT

The growing demand for electricity over the years has made the Power systems (SEP) more complex, since the network must be able to supply such demand. For this, it is necessary to implement new transmission lines, insertion of new generating plants, as well as new technologies, in order to ensure robustness and reliability to the SEP. In this context, the increasing insertion of the relays can be highlighted. In the SEP, which allow for major evolutions in the protection systems, both in relation to the performance in the system and for the coordination and selectivity of the devices. Numerical or digital relays, perform several complex functions, and perform the basic functions of protection, through a microprocessor, which uses algorithms based on the processing of the voltage and current signals. However, new and old problems arising from the various operational conditions of the SEP and their possible adversities persist, making essential studies in the area of signal processing applied to digital protection. In this context, generators and transformers are subjected to major damage, which occur during failures and improper operations of the system, which must be quickly identified and eliminated. Thus, the ANSI 24 function is used for the protection of transformers and generators against excitement, a phenomenon that occurs due to a magnetic overflow in the core of a machine. Since the magnetic flux is directly proportional to the nominal voltage and inversely proportional to the nominal frequency, the adjustment of this protection function is given by the percentage value of the volts/hertz (V/Hz) ratio of these parameters. It is noteworthy that the function ANSI 24 is necessary to detect situations in which the functions of overvoltage and frequency variation do not detect the defect. Furthermore, it is noteworthy that the adjustment of the relay 24 is based on the damage curve of each equipment, which is normally supplied by the manufacturer. In this way, the specialized literature recommends adjusting the function 24 with a curve of actuation times 20% lower than those verified in the damage curve of the protected equipment. Considering that the frequency is one of the parameters used by function 24, it can be concluded that the computational tool used to estimate the frequency of the system directly influences the performance of this relay. Thus, this work aims to demonstrate the behavior of function 24 in front of the use of different frequency estimation methods recently disclosed in the specialized literature. For this, a test system was implemented in the software DIgSILENT Power Factory[®], in order to simulate excitement events, from which the voltage signals to be processed by the frequency estimators and the respective logic of the relay 24 were generated. For this purpose, both the frequency estimation logic and the function 24 algorithm were implemented in the MATLAB[®] software. Finally, it is noteworthy that the results obtained allowed us to conclude that the frequency estimators directly influence the performance of function 24, which may lead to delays in performance, as well as the non-operation or improper operation of the relays that incorporate this Function.

Keywords: Economic, financial, photovoltaic, investment, viability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Subsistema do sistema de proteção.	34
Figura 2 – Diagrama unifilar de um sistema de proteção de gerador síncrono.	37
Figura 3 – Relé de proteção de geradores GPU2000R	41
Figura 4 – Relé de proteção de geradores SEPAM G87	41
Figura 5 – Relé de proteção SEL-300G	42
Figura 6 – Malha PLL.	47
Figura 7 – Sistema Teste	54
Figura 8 – Sinais do GS com sobre-excitação de 10%.	57
Figura 9 – Atuação do relé com PLL para 10%.	60
Figura 10 – Atuação do estimador de frequência PLL para 10%.	60
Figura 11 – Atuação do relé com ASSP para 10%.	61
Figura 12 – Atuação do estimador de frequência ASSP para 10%.	62
Figura 13 – Sinais do GS com sobre-excitação de 30%.	63
Figura 14 – Atuação do relé com MM para 30%.	65
Figura 15 – Atuação do estimador de frequência MM para 30%.	65
Figura 16 – Atuação do relé com ASSP para 30%.	66
Figura 17 – Atuação do estimador de frequência ASSP para 30%.	67
Figura 18 – Sinais do GS com sobre-excitação de 50%.	68
Figura 19 – Atuação do relé com MM para 50%.	70
Figura 20 – Atuação do relé com ASSP para 50%.	70
Figura 21 – Atuação do estimador de frequência MM para 50%.	71
Figura 22 – Atuação do estimador de frequência ASSP para 50%.	71
Figura 23 – Sinais do GS com sobre-excitação de 70%.	72
Figura 24 – Atuação do relé com MPH para 70%.	74
Figura 25 – Atuação do relé com ANB para 70%.	74
Figura 26 – Atuação do estimador de frequência MPH para 70%.	75
Figura 27 – Atuação do estimador de frequência ANB para 70%.	75
Figura 28 – Sinais do GS com sobre-excitação de 100%.	76
Figura 29 – Atuação do relé com MM para 100%.	78
Figura 30 – Atuação do relé com ASSP para 100%.	78
Figura 31 – Atuação do estimador de frequência MM para 100%.	79
Figura 32 – Atuação do estimador de frequência ASSP para 100%.	79
Figura 33 – Relação V/Hz do método MAC.	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais funções de proteção para um gerador síncrono	36
Tabela 2 – Aplicação da função 24 de proteção de geradores	38
Tabela 3 – Parâmetros Utilizados para cada frequência de amostragem do PLL. . .	48
Tabela 4 – Parâmetros do GS.	54
Tabela 5 – Parâmetros do transformador.	55
Tabela 6 – Parâmetros da linha de transmissão.	55
Tabela 7 – Parâmetros das cuvas.	56
Tabela 8 – Resultados para sobre-excitação de 10%.	59
Tabela 9 – Resultados para sobre-excitação de 30%.	64
Tabela 10 – Resultados para sobre-excitação de 50%.	69
Tabela 11 – Resultados para sobre-excitação de 70%.	73
Tabela 12 – Resultados para sobre-excitação de 100%.	77
Tabela 13 – Classificação dos resultados para cada caso.	82
Tabela 14 – Classificação geral das metodologias testadas.	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABB	<i>Asea Brown Boveri</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANB	Proposta de Aníbal
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
CAN	Proposta de Candan
ASSP	Método de Ajuste de Pontos para um Sinal Senoidal Puro
DPSZ	Método de detecção da passagem do sinal por zero
GPU	Unidade de Proteção de Gerador
GS	Gerador Síncrono
IED	Dispositivos Inteligentes
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
JAC	Proposta de Jacobsen e Kootsoolos
Hz	Hertz
LT	Linha de Transmissão
MAC	Proposta de Macleod
MM	Método baseado em Morfologia Matemática
MP	Método de Prony
MPB	Método de Prony utilizando janela de Blackman
MPH	Método de Prony utilizando janela de Haming
ms	Milisegundos
MW	Megawatt
ONC	Oscilador Numérico Controlado
PLL	Método do Laço Fechado de Fase Digital
s	Segundos

SEL	<i>Schweitzer Engineering Laboratories</i>
SEP	Sistemas Eléctricos de Potência
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
TDF	Transformada Discreta de Fourier
V/Hz	Volts/Hertz

LISTA DE SÍMBOLOS

V	Tensão no terminal, expressa em volts;
N	Número de espiras;
f	Frequência
k	Fator de distribuição
φ	Fluxo magnético
t_{PZ}	Instante de tempo da última passagem por zero
t_k	Instante de tempo no momento que ocorre a passagem por zero da amostra
V_k	Tensão monofásica no momento em que ocorre a passagem por zero
$t_{PZ_{Atual}}$	Tempo da última passagem por zero
$t_{PZ_{Anterior}}$	Tempo da última passagem por zero antecedente
Δ_t	Diferença no intervalo de tempo
rn	Sinal Complexo
en	Erro de fase
V_A, V_B e V_C	Sinal de tensão de cada fase do sistema
$V_\alpha e V_\beta$	Sinal de tensão complexo
\oplus	Dilatação
\ominus	Erosão
ω	Frequência fundamental

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Considerações Gerais	25
1.2	Motivação	25
1.3	Justificativa	26
1.4	Objetivos	26
1.5	Revisão Bibliográfica	27
1.5.1	Proteção de Geradores Síncronos	27
1.5.2	Estimadores de Frequência	28
1.6	Estrutura do Trabalho	29
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
2.1	Considerações Gerais	31
2.2	Sistemas Elétricos de Potência (SEP)	31
2.3	Proteção de Sistemas Elétricos de Potência	32
2.4	Frequência no SEP	34
2.5	Geradores Síncronos	35
2.6	Relés de Proteção	38
2.7	Características volts/hertz (V/Hz)	42
2.8	Considerações Finais	44
3	MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DE FREQUÊNCIA	45
3.1	Considerações Gerais	45
3.2	Método de detecção da passagem do sinal por zero - (DPSZ)	45
3.3	Método de Ajuste de Pontos para um Sinal Senoidal Puro - (ASSP)	46
3.4	Método do Laço Fechado de Fase Digital - (PLL)	47
3.5	Método baseado em Morfologia Matemática - (MM)	48
3.6	Método de Prony - (MP)	49
3.7	Métodos baseados na Transformada Discreta de Fourier - (TDF)	51
3.7.1	Proposta de Macleod (1998) - (MAC)	51
3.7.2	Proposta de Aníbal (1999) - (ANB)	51
3.7.3	Proposta de Jacobsen e Kootsoolos (2007) - (JAC)	52
3.7.4	Proposta de Candan (2013) - (CAN)	52
3.8	Considerações Finais	52
4	RESULTADOS E AVALIAÇÕES	53
4.1	Considerações Gerais	53
4.2	Sistema teste	53

4.3	Característica volts/hertz (V/Hz) Analisada	55
4.4	Resultados	57
4.4.1	Caso 1: sobre-excitação de 10%	57
4.4.2	Caso 2: sobre-excitação de 30%	62
4.4.3	Caso 3: sobre-excitação de 50%	67
4.4.4	Caso 4: sobre-excitação de 70%	72
4.4.5	Caso 5: sobre-excitação de 100%	76
4.5	Avaliações	80
4.6	Considerações Finais	83
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	85
5.1	Conclusões	85
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	86
	REFERÊNCIAS	87
	ANEXOS	91
	ANEXO A – CURVA VOLTS/HERTZ 1	93
	ANEXO B – CURVA VOLTS/HERTZ 2	95
	ANEXO C – CURVA VOLTS/HERTZ 3	97

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

Para o desenvolvimento de uma sociedade moderna, os principais requisitos dizem respeito ao fornecimento contínuo e de qualidade da energia elétrica. Dessa forma, a expansão do sistema elétrico de potência se torna inevitável e, conseqüentemente, as condições anormais as quais os SEP são suscetíveis aumentam na mesma proporção. Sendo assim, um aperfeiçoamento da proteção é exigido, de modo a garantir a confiabilidade e a estabilidade do mesmo. Por isto, esse assunto sempre instigou estudos e pesquisas, tanto na área acadêmica, quanto na indústria.

Nesse contexto, pode-se salientar a proteção do gerador síncrono (GS), o qual é considerado um dos mais importantes, dentre os elementos que compõem um SEP, tendo em vista seu elevado custo. Assim, a necessidade de protegê-lo contra condições anormais resulta num grande conjunto de funções de proteção, as quais têm por objetivo proporcionar uma maior confiabilidade e segurança na operação deste equipamento.

Dentre as condições anormais que um GS está sujeito, destaca-se a sobre-excitação, sendo este um fenômeno que ocorre devido a um sobrefluxo no núcleo do GS, causando aquecimento, ruídos e vibração no mesmo, podendo levar o SEP a um colapso de tensão. Portanto, existe uma real necessidade de se prevenir danos dessa natureza, através da estimação da densidade de fluxo, a qual se dá pela medição da razão entre tensão e frequência (V/Hz).

Nesse contexto, a proteção contra sobre-excitação é feita pela função 24 (ANSI), a qual monitora a referida relação entre tensão e frequência, uma vez que essa relação é proporcional à densidade do fluxo. Assim, visando mitigar os impactos que uma condição de sobre-excitação provoca em um GS, é importante realizar o monitoramento da relação tensão e frequência, de forma que a atuação da função 24 e, conseqüentemente, o desligamento da máquina sobre-excitada, ocorra no menor intervalo de tempo possível.

1.2 Motivação

Pesquisas sobre proteção do GS vêm sendo desenvolvidas desde a década de 80. Trabalhos como Melsinger, Linders e Stranne (1983), Agee et al. (1995), Eberly e Schaefer (1995), CIGRÉ B34.05 (1997), Reimert (2005), Alves e Souza (2010), Won e Hyeon (2012) e Paiva e Silveira (2017) abordaram alguns tipos de proteções utilizadas no GS, em especial a proteção contra sobre-excitação.

Também é importante destacar que condições de sub e sobre frequência afetam diretamente o funcionamento do GS, assim como a qualidade da energia gerada. Assim, uma vez que a frequência é influenciada diretamente pelo nível de excitação da máquina, evidencia-se a importância das pesquisas a cerca de técnicas para estimação desse parâmetro,

como apontado por Friedman (1994), Lobos e Rezmer (1997), Macleod (1998), Pradhan, Routray e Basak (2005), Jacobsen e Kootsookos (2007), Barbosa et al. (2008), Sorrentino e Carvalho (2010), Stalter (2014) e Santos et al. (2015). Cabe ressaltar que estimadores de frequência são utilizados para determinar a razão V/Hz na proteção contra sobre-excitação, bem como na própria proteção de frequência. Dessa forma, as metodologias para estimação desse parâmetro devem ser robustas e suficientemente precisas para garantir o correto funcionamento das referidas proteções.

Como consequência das inovações, no que tange as metodologias para estimação de frequência, é possível afirmar que diversas funções de proteção vêm sendo testadas no GS, de forma a reduzir os danos causados à máquina quando em condições anormais de operação, bem como os impactos causados ao sistema elétrico por esses eventos. Nesse contexto, ainda não se encontram estudos apontando a influência do desempenho dos estimadores de frequência sobre a função 24.

Esses fatos motivaram a realização desse trabalho, onde o foco é analisar os impactos que os estimadores de frequência têm sobre a lógica da função 24, buscando determinar qual estimador de frequência provê o melhor desempenho à referida proteção.

1.3 Justificativa

Com o constante aumento da demanda energética no Brasil e no mundo, torna-se imprescindível remodelar os processos de geração de energia elétrica. Em decorrência da busca por modernização, diversos estudos vêm sendo realizados com o objetivo de aprimorar a confiabilidade e a robustez do SEP e dos elementos que integram sua estrutura.

Nesse cenário, inúmeras técnicas têm sido aplicadas com o objetivo de realizar o controle e o monitoramento eficiente dos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, bem como os equipamentos que o compõem, tais como máquinas síncronas, transformadores, entre outros.

Além disso, a complexidade do SEP se intensifica em decorrência da expansão deste aumento de demanda por energia, ocasionando novos problema de comportamento dinâmico, colocando em risco a continuidade de operação do SEP.

Dessa forma, resultante da importância dos geradores para o SEP, os sistemas de proteção utilizados nestes dispositivos tornam-se ainda mais sensíveis, exigindo maior confiabilidade, seletividade e velocidade na atuação da proteção, uma vez que, na ocorrência de falhas em um gerador, além deste permanecer longos períodos fora de operação, existe a possibilidade da ocorrência de danos irreparáveis a máquina.

Nesse contexto, surge a necessidade do avanço tecnológico e o desenvolvimento de novas metodologias de proteção, com o intuito de contribuir com segurança, maior eficiência, confiabilidade e disponibilidade do SEP.

1.4 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral analisar o funcionamento dos estimadores de frequência quando aplicados na função 24 de um relé digital, visando determinar qual dessas metodologias melhor se adequa a atuação desta proteção, de forma a beneficiar a operação do GS, garantindo uma melhor eficiência e segurança do mesmo.

Como objetivos específicos, citam-se:

- Realizar estudos sobre estimadores de frequência;
- Implementar algoritmos para estimação de frequência;
- Realizar estudos sobre a proteção do GS;
- Realizar estudos sobre a proteção contra sobre-excitação; e
- Implementar lógicas da função 24 de diferentes tipos de relés digitais;

1.5 Revisão Bibliográfica

1.5.1 Proteção de Geradores Síncronos

Na década de 80, começaram a surgir novos estudos para proteção de GS e transformadores, de forma que Melsing, Linders e Stranne (1983), descrevem o funcionamento de um novo relé de sobre-excitação, o qual possui curvas características de tempo inverso. Nesse trabalho, os autores descrevem os princípios de operação e aplicação do relé V/Hz. Ainda, apontam as causas de sobre-excitação que ocorrem em geradores e transformadores.

Nos anos 90, Agee et al. (1995), apresentam modelos de limitadores de sobre-excitação, sobretensão e sobrefluxo, adequados para uso em grandes máquinas síncronas. Ainda no ano de 1995, Mozina e Gardell (2011), desenvolveram o IEEE Guide For AC Generator Protection, no qual são descritas as formas de proteção digital aceitas pelo GS e seu sistema de excitação, de forma a garantir uma proteção adequada. Todas as funções de proteção apresentadas no referido documento podem ser implementadas em um relé digital. Tal referência também apresenta esquemas de proteção utilizados em GSs, apresentando as funções de proteção utilizadas pelo relé. Ainda, cita os efeitos prejudiciais de falhas e condições anormais que ocorrem em um GS e qual tipo de proteção a ser utilizada para detecção dessas condições.

No ano de 1997, o grupo de estudos CIGRÉ B34.05 (1997) apresentou uma pesquisa realizada com concessionárias de energia elétrica e fabricantes de proteção para GS, mostrando a variedade de proteções necessárias para cada gerador, assim como a aplicação de cada proteção, conforme sua capacidade de geração.

A partir dos 2000, novas publicações sobre o tema surgiram, como, por exemplo, o trabalho de Reimert (2005) que expõe detalhadamente os tipos de proteção utilizados em

um GS e em máquinas de indução, descrevendo qual a proteção a ser utilizada para um determinado defeito ou condição anormal.

Além disso, Alves e Souza (2010) apresentam uma revisão dos conceitos relacionados à sobre-excitação em GSs, evidenciando os problemas presentes no comissionamento de uma usina de energia no Brasil. Dessa forma, propuseram novas configurações para a função ANSI 24, coordenando a mesma com o regulador de tensão.

Won e Hyeon (2012) desenvolveram um algoritmo de compensação de ganho baseado em DFT para determinar a frequência, parâmetro o qual deve ser utilizado para a medição na proteção contra sobre-excitação.

Por fim, Paiva e Silveira (2017) realizaram uma análise da coordenação entre um dispositivo de controle e as funções de proteção do GS, onde foram descritas as diferenças entre coordenação estática e a coordenação dinâmica. Além disso, um exemplo completo da coordenação foi exposto.

1.5.2 Estimadores de Frequência

O funcionamento de um GS é afetado constantemente devido às condições de sub e sobre frequência, as quais prejudicam diretamente a qualidade da energia no SEP. Dessa forma, a necessidade de pesquisas sobre técnicas de estimação de frequência vem crescendo.

Nos anos 90, Friedman (1994) desenvolveu um algoritmo para a estimação de frequência utilizando uma única forma de onda senoidal, utilizando um filtro passa-baixas para eliminar os ruídos do sinal. Nessa proposta, é realizada uma interpolação para a determinação do instante exato pelo qual a forma de onda passa por zero e a frequência é estimada com base no intervalo entre duas passagens consecutivas por zero.

Além disso, Lobos e Rezmer (1997) descrevem a frequência como um parâmetro de grande importância para o SEP. Como qualquer incompatibilidade entre geração e carga causa desvios na frequência, surgindo a necessidade de uma estimativa da frequência de forma rápida e precisa. Nesse contexto, os autores apresentam uma metodologia baseada no método de Prony, utilizando um filtro fundamentado na TDF, de maneira a melhorar as propriedades do filtro. Essa proposta utiliza uma janela de suavização, de forma a obter uma melhor precisão na determinação da frequência.

Macleod (1998) apresenta um algoritmo iterativo, o qual é uma otimização não-linear computacionalmente menos onerosa. O método é baseado na TDF e faz a interpolação entre uma amostra central e suas duas amostras vizinhas para a determinação da frequência.

Também, Pradhan, Routray e Basak (2005) apresentaram um método de estimação de frequência utilizando filtros adaptativos, tendo por base o método dos mínimos quadrados. Tal técnica analisa um sinal complexo gerado pelas tensões trifásicas, pré-processadas pela transformada $\alpha\beta$, possibilitando uma convergência mais rápida, apresentando boa eficiência e robustez na estimação de frequência.

Jacobsen e Kootsookos (2007) realizaram uma pesquisa focada em reduzir o erro

médio da estimação, desenvolvendo um algoritmo preciso e de simples implementação, baseado na TDF. A referida proposta utiliza uma interpolação parabólica para a obtenção da frequência fundamental, apresentando bons resultados em sua resposta.

Ainda, Sorrentino e Carvalho (2010) avaliaram três diferentes métodos de estimação de frequência, comparando seus desempenhos transitórios. Os três algoritmos foram aplicados a sinais obtidos por simulações numéricas e ondas de tensão obtidas em casos experimentais. Ainda, demonstram os efeitos da utilização de filtros adicionais para eliminação de ruídos e oscilação numérica da resposta, os quais provocam atrasos na estimação da frequência.

Também, Stalter (2014) compara o desempenho de nove estimadores de frequência, fundamentados em diferentes técnicas. Assim, foram testados sob diferentes condições transitórias as quais o SEP é suscetível. Todos os métodos foram avaliados com base em índices de desempenho, apontando qual estimador apresenta melhor desempenho sob determinada condição.

Por fim, Santos et al. (2015) propuseram um estimador de frequência que utiliza morfologia matemática para a estimação das componentes α e β do sistema trifásico. A frequência é estimada pela diferença de fase entre o fasor trifásico estimado e o fasor medido. Tal metodologia apresenta elevado grau de precisão e grande robustez na estimação de frequência.

1.6 Estrutura do Trabalho

No Capítulo 2, são descritos aspectos inerentes aos sistemas de proteção de GSs, onde se destaca a relevância da proteção contra sobre-excitação, bem como as causas e consequências dos efeitos desse fenômeno. Também, são apresentados alguns dos relés digitais comerciais, os quais possuem a função de proteção contra sobre-excitação.

No Capítulo 3, são descritas as metodologias de estimação de frequência, as quais tiveram seu desempenho analisado perante a sua aplicação na função 24.

No Capítulo 4, é apresentado o sistema teste utilizado, bem como as características de cada tipo de relé simulado. Também, são apresentados os resultados obtidos, assim como as discussões a cerca dos mesmos.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros..

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Considerações Gerais

Esse Capítulo apresenta uma breve introdução sobre sistemas elétricos de potência e os sistemas de proteção, bem como descreve o impacto da operação de geradores síncronos sobrecitados na frequência do sistema, afetando a qualidade da energia elétrica. Também, são discutidos o funcionamento e as características dos relés numéricos, demonstrando suas vantagens quando utilizados para a proteção do sistema elétrico de potência.

2.2 Sistemas Elétricos de Potência (SEP)

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) pode ser definido como um conjunto de todas as instalações e equipamentos designados a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Sendo assim, o SEP tem como objetivo gerar, transmitir e distribuir energia elétrica a todos os consumidores, de forma a atender toda a demanda solicitada, com qualidade e confiabilidade (KEZUNOVIC; ABUR, 2005).

Com o aumento constante da demanda de energia elétrica no Brasil, fez-se necessário a modernização dos processos para a produção da mesma. Consequentemente, diversos estudos vêm sendo realizados com o propósito de melhorar a eficiência dos equipamentos que compõem o sistema elétrico. Para esse fim, diversas técnicas têm sido estudadas, as quais têm por objetivo controlar e monitorar de maneira eficiente o sistema elétrico, bem como os equipamentos que o compõem, tais como máquinas síncronas, transformadores, entre outros.

De acordo com Kundur, Balu e Lauby (1994), devido ao aumento da demanda por energia, ocorreu um aumento na complexidade do SEP, de forma que surgiram novos problemas de comportamento dinâmico, os quais colocam em risco a operação do sistema. Conforme Gaia et al. (2012), devido ao uso intenso dos recursos existentes, o SEP tende a operar próximo dos seus limites de segurança, de forma a passar por situações de operação crítica, tornando-o mais vulnerável a grandes perturbações, as quais podem causar problemas de instabilidade transitória, o que, por sua vez, pode provocar grandes blecautes.

Nesse contexto, a preocupação por parte das companhias elétricas e engenheiros vem crescendo cada vez mais, pois o SEP necessita operar de forma eficiente, confiável e segura, tanto em condições de regime permanente, quanto em condições transitórias, mantendo a melhor qualidade de energia possível.

Dessa forma, os SEPs estão passando por diversas modernizações, como a automação de seus processos, utilizando novas tecnologias digitais. Nesse contexto, a tecnologia digital utiliza componentes semicondutores de alta velocidade, em sistemas de comunicação, controle, proteção, dentre outras funções, além de permitir a análise e o processamento

de sinais (KEZUNOVIC; ABUR, 2005). Tais tecnologias são aplicadas com o objetivo de buscar e resolver os problemas que podem ocorrer no SEP, como desligamentos indevidos, por exemplo.

2.3 Proteção de Sistemas Elétricos de Potência

Para o desenvolvimento da sociedade a energia elétrica é um elemento de grande importância. Dessa forma, a ampliação do SEP é essencial, o que, conseqüentemente pode comprometer a qualidade, a confiabilidade e a segurança do SEP, uma vez que eventos não desejados aumentam na mesma proporção. Portanto, a proteção de SEP tem como tarefa isolar equipamentos com defeito, de forma a prevenir que todo o sistema fique sem energia. Nesse contexto, o desenvolvimento de novas tecnologias e metodologias de proteção se faz necessário para garantir uma melhor eficiência, confiabilidade e segurança na operação da rede elétrica (STALTER et al., 2017).

O objetivo principal da proteção é garantir, de forma econômica, a qualidade dos serviços, garantindo a segurança das instalações, bem como o fornecimento da energia elétrica até os consumidores finais. Ressalta-se que, mantendo o sistema protegido, o SEP pode operar com máxima eficiência (WARRINGTON, 2012).

Como o SEP é suscetível a defeitos e perturbações de diversas naturezas, tais como curtos-circuitos, descargas atmosféricas, sobrecargas, sobre tensões, entre outras, a proteção deve manter o SEP estável para que, caso ocorra algum defeito, este seja eliminado no menor tempo possível. Para isso, os elementos de proteção monitoram constantemente o SEP para que atuem de forma a assegurar a estabilidade da rede, evitando possíveis danos aos equipamentos (STALTER; SANTOS; SALDANHA, 2017).

A ideia principal dos sistemas de proteção é limitar as perturbações durante a ocorrência dos defeitos a uma pequena área e preservar a distribuição de energia nas demais. De acordo com Hewitson, Brown e Balakrishnan (2004), tais sistemas devem respeitar três requisitos básicos:

- Salvar todo o sistema, de forma a manter a continuidade do serviço;
- Minimizar os danos e os custos dos equipamentos danificados pelos defeitos; e
- Garantir a segurança e a confiabilidade da instalação.

Nesse contexto, para se projetar um sistema de proteção, as principais propriedades são (ALMEIDA, 2000):

- Seletividade: reconhecer e selecionar as condições em que se deve operar, desconectando somente a parte do sistema elétrico com defeito, de forma a reduzir as conseqüências causadas por esta perturbação;

- Confiabilidade: garantir o correto funcionamento do sistema com segurança, sob qualquer situação;
- Sensibilidade: detectar por menor que seja o defeito, ou seja, deve saber distinguir as situações de defeito daquelas que não são;
- Velocidade: reduzir a duração das falhas, possibilitando o desligamento do trecho ou equipamento defeituoso no menor tempo possível;
- Economia e simplicidade: a utilização de um sistema de proteção é justificado tanto por motivos técnicos como econômicos, pois muitos recursos podem ser adicionados a ele, dos quais implicam em um maior custo inicial, porém os benefícios em longo prazo também são maiores.

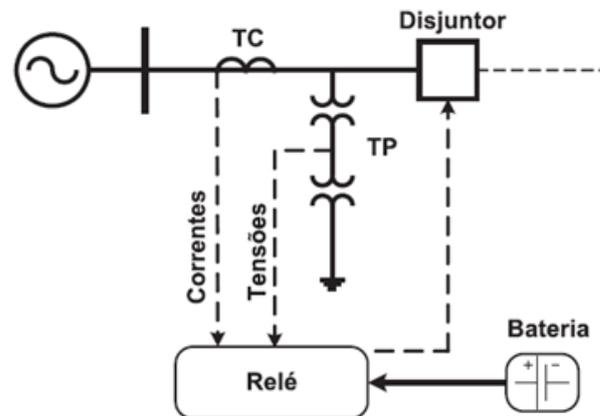
Segundo Barbosa (2007), os sistemas de proteção são compostos por:

- Relés: encarregados pela lógica de atuação do sistema de proteção;
- Disjuntores: chaves responsáveis pela interligação do sistema, que atuam através dos comandos dos relés e têm por função isolar o trecho com defeito. Para isso abrem seus contatos, interrompendo o fluxo de corrente;
- Transformadores de instrumentação: têm por função reduzir os níveis de tensão e corrente, além de isolar os equipamentos de alta tensão; e
- Baterias: utilizadas como alimentação auxiliar.

Na estrutura apresentada pela Figura 1, o componente principal do sistema de proteção é o relé, o qual pode ser visto como o cérebro da proteção. Quando sua lógica de atuação é satisfeita, o relé envia um sinal para abertura dos disjuntores, isolando assim os trechos com defeito do restante do SEP. Segundo Warrington (2012), os relés, devido a sua importância para a proteção, devem ser equipamentos robustos e confiáveis, os quais são projetados para responder a variações nas grandezas elétricas, tais como tensões, correntes, frequência, entre outras, quando estas estão atuando fora de suas condições nominais de operação.

De forma geral, a proteção não elimina a possibilidade de defeitos. Porém, reduz a probabilidade de prejuízos. E é capaz de auxiliar na localização e na identificação do defeito, possibilitando uma manutenção de forma ágil (STALTER, 2014).

Figura 1 – Subsistema do sistema de proteção.



Fonte: Barbosa (2007).

2.4 Frequência no SEP

O SEP é operado de modo a atender às necessidades de energia elétrica dos consumidores, levando uma energia com qualidade da forma segura e econômica. Sendo assim, a obtenção de uma energia com boa qualidade se dá quando suas formas de onda não aprestam nenhum tipo de distorção, assim como suas tensões e frequências não apresentam nenhum tipo de variação (UDAETA; GRIMONI; GALVÃO, 2004).

Nesse contexto, um dos problemas relacionados às condições ideais de operação do SEP está associado às variações de frequência do sistema. A frequência, quando fora de seus limites determinados, afeta diretamente na eficiência dos equipamentos conectados à rede, tais como, geradores, banco de capacitores, transformadores, entre outros, comprometendo o equilíbrio do SEP como um todo. Portanto, faz-se necessário manter a frequência do sistema próxima ao seu valor nominal (BARBOSA et al., 2008).

Conforme Dugan, McGranaghan e Beaty (1996), devido à interligação do sistema brasileiro, as oscilações de frequência vêm diminuindo, ficando por volta de $\pm 0,02$ Hz. Porém, oscilações acima desse valor ocorrem devido a condições de desequilíbrio entre geração e carga. Quando a variação de frequência é pouco significativa, os reguladores dos geradores corrigem o problema. Porém, no instante em que ocorre uma grande variação de frequência, os reguladores não atuam, comprometendo a qualidade da energia. Se o acréscimo ou decréscimo na frequência não for corrigido em tempo hábil de operação, o sistema pode ser levado à situações extremas, como um blecaute, por exemplo.

Vale ressaltar que, de acordo com o ANEEL (2018):

- Para a operação normal e em regime permanente, os limites de frequência encontram-se dentro da faixa de 59,9 e 60,1 Hz. Tais valores são exigidos para o sistema de distribuição e as instalações de geração ligadas ao referido sistema;

- De forma a recuperar o equilíbrio entre carga e geração, as instalações de gerações conectadas ao sistema de distribuição, possuem o prazo de trinta segundos para garantir que a frequência retorne para faixa de 59,5 a 60,5 Hz; e
- Ocorrendo a necessidade de corte de carga, ou desligamento da geração para que ocorra a reabilitação do equilíbrio carga-geração, durante os distúrbios no sistema de distribuição, a frequência não pode ser maior que 66 Hz e nem pode ser menor que 56,5 Hz, para condições extremas. Ainda, pode ser superior a 62 Hz por no máximo 30 segundos e superior a 63,5 Hz por até dez segundos. Além disso, pode ser inferior a 58,5 Hz por até dez segundos, e inferior a 57,5 no máximo, por cinco segundos.

Em um sistema de grande porte, a oscilação da carga pode ser ampla e o valor de coeficiente de amortecimento costuma ser relativamente pequeno, o que pode causar oscilações na frequência que excederiam com facilidade os limites impostos. Assim, faz-se de extrema necessidade que o controle automático da geração seja capaz de compensar as oscilações de carga, de modo a manter a frequência nominal no SEP (FILHO, 1984).

De acordo com STALTER et al. (2017), verifica-se que as oscilações de frequência afetam diretamente na qualidade da energia elétrica, ocasionando funcionamento indevido do sistema, diminuindo a eficiência de equipamentos, causando falhas de operação dos mesmos, além de prejudicar o desempenho dos sistemas de proteção e dos processos industriais.

2.5 Geradores Síncronos

Geradores síncronos são equipamentos que compõem o sistema elétrico, sendo considerados componentes de suma importância para o SEP. Por serem equipamentos caros, existe uma grande preocupação em garantir que a sua proteção atue de forma eficaz, uma vez que estes estão sujeitos a uma gama maior de distúrbios do que os demais componentes do SEP. Assim, a necessidade de protegê-los contra condições anormais resulta num grande conjunto de funções de proteção (CAMINHA, 1977).

Devido a grande importância dos geradores para o SEP, os sistemas de proteção empregados a eles tornam-se ainda mais críticos, pois é exigido alto grau de confiabilidade, seletividade e rapidez na sua atuação, uma vez que, quando ocorrem falhas em um gerador, além deste poder permanecer longos períodos fora de operação, ainda podem surgir grandes danos à máquina (MANDIM, 2013).

De um modo geral, quando um gerador síncrono for conectado ao SEP, a sua proteção deve ser projetada contra dois tipos de defeitos (CAMINHA, 1977):

- Defeito de isolamento, o qual produz curtos-circuitos entre espiras, fase-fase, fase-terra ou trifásico. Tal defeito ocorre devido a sobretensões ou sobreaquecimentos; e

- Condições anormais de funcionamento, como desequilíbrio de cargas, sobrecargas, perda de sincronismo, sub ou sobre-excitação, entre outras.

Sobre as condições anormais de funcionamento, ressalta-se que estas, normalmente, não exigem que o gerador seja desligado no mesmo instante, pois elas podem ser corrigidas enquanto o gerador permanece em operação, uma vez que as anormalidades são sinalizadas através de alarmes. Porém, existem algumas situações em que a atuação da proteção deve ocorrer de forma ágil, retirando a máquina de operação o mais breve possível.

O sistema de proteção dos geradores é composto de painéis onde os relés de proteção e circuitos elétricos ficam alocados. Atualmente os relés utilizados são conhecidos como relés digitais ou dispositivos inteligentes (IED), por possuírem diversos recursos adicionais como controle, comunicação, autossupervisão, entre outros.

Com o objetivo de evitar a ocorrência de distúrbios nos geradores síncronos sob qualquer condição anormal de operação, são implementadas diversas funções de proteção nos relés digitais. Tais funções estão listadas na Tabela 1 (MOZINA; GARDELL, 2011).

Tabela 1 – Principais funções de proteção para um gerador síncrono

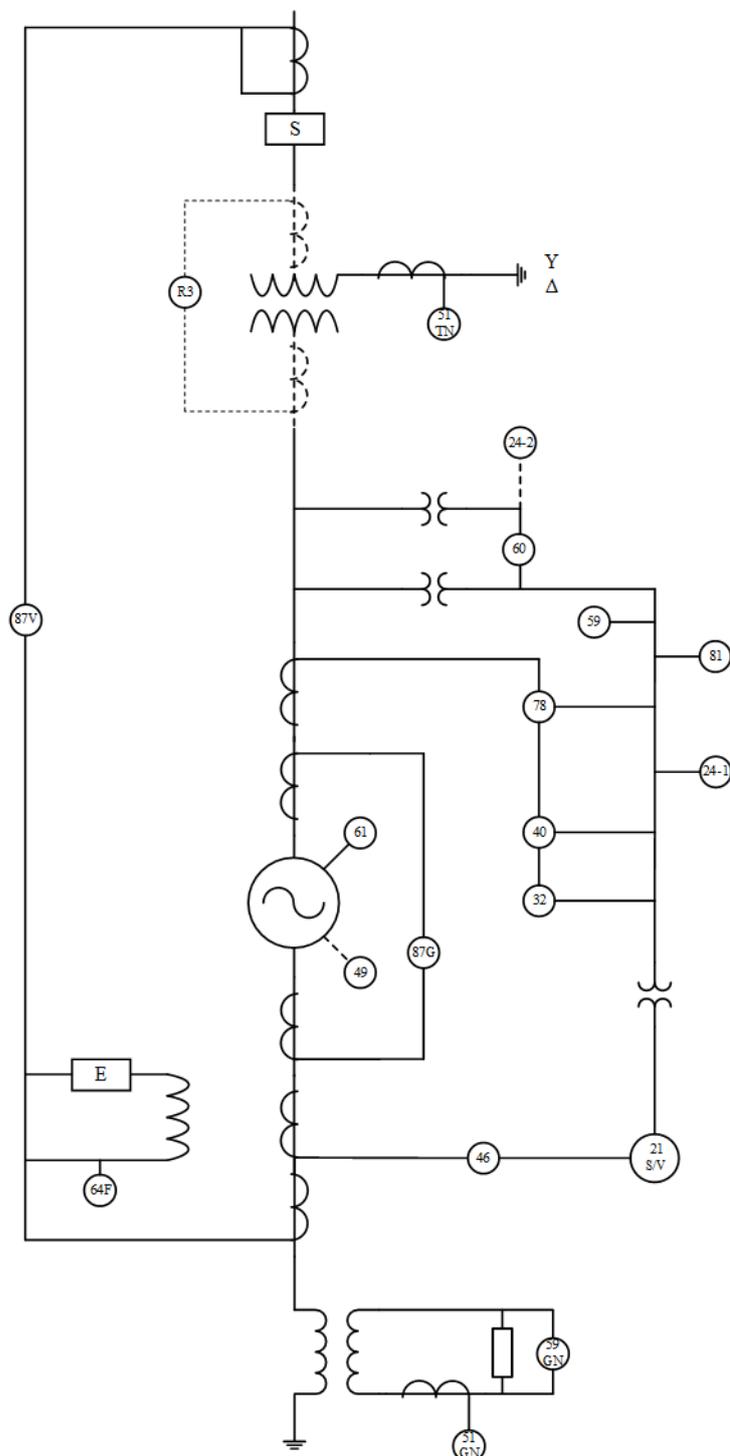
Número ANSI	Descrição
21	Proteção de mínima impedância ou distância
24	Proteção contra refluxo ou V/Hz
32	Proteção contra potência inversa ou motorização
40	Proteção contra perda de excitação
46	Proteção contra carga desequilibrada
49	Proteção contra sobrecarga
51V	Proteção de sobrecorrente de fase com restrição por tensão
51GN	Proteção de sobrecorrente no neutro do gerador
51TN	Proteção de sobrecorrente no neutro do transformador elevador
59	Proteção contra sobretensão
59GN	Proteção contra sobretensão de neutro do gerador
60	Proteção contra desequilíbrios de tensão
61	Proteção contra falhas entre espiras do gerador
64F	Proteção contra falha a terra no rotor
64-1	Proteção contra falha a terra no estator 100%
64-2	Proteção contra falha a terra no estator 95%
76	Proteção contra sobrecorrente no circuito de campo
78	Proteção contra perda de sincronismo
81	Proteção contra subfrequência e sobrefrequência
87G	Proteção diferencial do gerador
87T	Proteção diferencial do transformador elevador
87U	Proteção diferencial do grupo gerador - transformador

Fonte: Mozina e Gardell (2011).

A Figura 2, representa um diagrama unifilar de um sistema de proteção para geradores síncronos de médio a grande porte, onde estão identificadas as funções de

proteção apresentadas na Tabela 1.

Figura 2 – Diagrama unifilar de um sistema de proteção de gerador síncrono.



Fonte: Mozina e Gardell (2011).

Dentre as condições anormais de operação a que o gerador está sujeito quando conectado ao SEP, destaca-se a condição de sobre-excitação ou sobrefluxo. A condição de sobre-excitação além de provocar danos ao gerador, reflete mudanças na temperatura,

devido ao aquecimento excessivo nos enrolamentos, conectores, cabos, além de provocar ruído e vibração, podendo levar o SEP a um colapso de tensão. Portanto, existe uma real necessidade de se prevenir danos dessa natureza, através da estimação da densidade de fluxo (IEEE C37.102, 2006).

De acordo com o CIGRÉ B34.05 (1997), uma pesquisa realizada pelo grupo de estudos 34.05, onde questionários foram respondidos por concessionárias de energia elétrica e fabricantes de proteção para geradores, demonstra a visão dos questionados com relação à importância de cada função de proteção aplicada ao gerador síncrono, levando em conta o tamanho e a capacidade do gerador, bem como seu tipo e importância para o SEP. Para a realização da pesquisa os geradores foram classificados conforme sua capacidade, e os resultados são apresentados na Tabela 2. A partir dessa tabela, pode-se verificar a grande importância da proteção contra sobre-excitação (24).

Tabela 2 – Aplicação da função 24 de proteção de geradores

Número ANSI	Gerador pequeno porte (5-20 MW)		Gerador porte moderado (20-50 MW)		Gerador médio porte (50-350 MW)		Gerador grande porte (>350 MW)	
	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
21	32%	68%	48%	52%	75%	25%	78%	22%
24	20%	80%	46%	54%	84%	16%	85%	15%
32	83%	17%	88%	12%	87%	13%	72%	28%
40	67%	33%	88%	12%	94%	6%	100%	0%
46	68%	32%	92%	8%	100%	0%	100%	0%
51V	75%	25%	58%	42%	53%	47%	50%	50%
59	85%	15%	87%	13%	81%	19%	80%	20%
60	28%	72%	48%	52%	65%	35%	43%	57%
64-1(Injeção)	0%	100%	7%	93%	40%	60%	42%	58%
64-1(3º Harmônico)	7%	93%	13%	87%	58%	42%	42%	58%
64-2	78%	22%	85%	15%	80%	20%	81%	19%
64F	79%	21%	95%	5%	90%	10%	94%	6%
78	22%	78%	47%	53%	37%	63%	59%	41%
81	69%	31%	68%	32%	74%	26%	64%	36%
87G	85%	15%	91%	9%	96%	4%	88%	12%
87U	65%	35%	77%	23%	83%	17%	87%	13%

Fonte: CIGRÉ B34.05 (1997).

Ressalta-se que a função 24 é também conhecida como limitador V/Hz, uma vez que monitora a relação entre tensão e frequência, a qual é proporcional a densidade do fluxo.

2.6 Relés de Proteção

Conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1981), o relé pode ser definido como um dispositivo que tem por função realizar a proteção do SEP, ou seja, é um equipamento que monitora e analisa todas as grandezas elétricas do SEP. Dentre suas funções de proteção, este deve evitar ou eliminar qualquer tipo de perturbação a qual o SEP é sujeito, de forma a corrigir o problema ou até mesmo retirar de serviço qualquer elemento que esteja dentro da sua zona de proteção, evitando danos aos equipamentos e interferências ao resto do sistema. Nesse contexto, relés são dispositivos que detectam condições anormais que ocorrem no sistema, além de realizarem comandos para a abertura dos disjuntores, com intenção de desconectar o equipamento com defeito ou isolar o trecho faltoso, conservando a plenitude da rede (SANDERSON, 1989).

Sendo assim, um SEP é projetado de modo a permitir que os relés de proteção possam realizar a leitura dos valores de tensão e corrente, de forma a isolar rapidamente os defeitos, limitando o tempo de duração das interrupções no fornecimento de energia elétrica. Tais relés são classificados de acordo com a variável a qual monitoram, ou pela função que executam, as quais são indicadas por números de dispositivos no padrão ANSI (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI, 2007; ALMEIDA, 2000).

Atualmente os relés de proteção mais usuais são os eletromecânicos, estáticos e os digitais. A seguir são listadas as características de cada tipo de relé (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI, 2007; ALMEIDA, 2000):

- Eletromecânicos: possuem somente uma função, lentos e apresentam baixa confiabilidade. É formado por uma bobina, uma armadura, contatos e terminais. O recebimento do sinal ocorre através de um circuito magnético com movimentação mecânica;
- Estático: ou relé de estado sólido, composto por componentes eletrônicos. Possui diversas vantagens sobre os relés eletromecânicos, como alto grau de confiabilidade, tamanho reduzido e longa vida útil; e
- Digitais: apresentam um desempenho igual ou superior aos relés eletromecânicos e estáticos por possuir um microprocessador, permitindo a execução de diversas funções de proteção em um único dispositivo, ou até mesmo todas as proteções necessárias para um determinado tipo de equipamento.

Na década de 1980 surgiram os dispositivos conhecidos como relés digitais, devido aos avanços tecnológicos com microprocessadores. Dessa forma, começaram a ganhar espaço para sua implementação na proteção de SEP, trazendo diversas vantagens, uma vez que os relés digitais concentram várias funções de proteção no mesmo dispositivo. De acordo com (STALTER, 2014), as principais vantagens da utilização de relés digitais são:

- Maior confiabilidade;
- Menor custo de manutenção;
- Auto monitoração;
- Maior exatidão nas medições;
- Intervalos de ajuste amplos;
- Flexibilidade no projeto das características operacionais, devido ao uso de filtragem digital e técnicas numéricas de medição;
- Sistemas compactos e econômicos;
- Integração das funções de proteção com funções adicionais, como monitoração de carga, eventos e registro de ocorrências;
- Armazenamento de informação;
- Possibilidade de ajuste remoto e acesso à informação armazenada através canais de comunicação digital; e
- Integração de relés digitais em proteção coordenada e sistemas de controle das subestações.

Apesar das diversas vantagens ainda podemos citar algumas desvantagens apresentadas pelos relés digitais, tais como:

- Apresentam baixa vida útil, devido aos seus circuitos integrados;
- Sofrem com interferências eletromagnéticas;
- São rapidamente defasados tecnologicamente, visto a evolução dos dispositivos devido aos crescentes avanços tecnológicos.

Os relés digitais do ponto de vista da operação, apresentam menores tempos de operação quando da ocorrência de defeitos, pois os algoritmos de cálculos rápidos permitem a rápida detecção de condições anormais de operação, conseqüentemente, eliminando os defeitos em um menor tempo.

Nesse contexto, a inserção da tecnologia digital trouxe melhorias para a proteção de geradores síncronos. Porém, este é um assunto que ainda recebe muita atenção dos pesquisadores, uma vez que sempre estão em busca do desenvolvimento de novas técnicas para a solução de problemas apresentados pelas diversas proteções existentes, implementando novas funções, reduzindo custos, aumentando a confiabilidade e flexibilidade dos sistemas de proteção aplicados em GSS. Dessa forma, destaca-se a função 24 dos

relés digitais, ou seja, proteção contra sobre-excitação ou limitador V/Hz, a qual possui grande importância na proteção de geradores síncronos, principalmente, para os de médio e grande porte, conforme discutido anteriormente.

<https://www.overleaf.com/project/5cb6a97679e49943aff96317>Atualmente, existem diversos relés que são utilizados na proteção contra sobre-excitação de geradores, dentre os quais podem-se descrever:

- GPU2000R: fabricado pela ABB, seus ajustes são baseados nas relações dos transformadores de medição, nos valores da placa de características do gerador e nos outros parâmetros do sistema, conseqüentemente, ajustando suas proteções e alarmes. Possui diversas funções de proteção dentre elas a função 24. Para tal, oferece três curvas de tempo inverso e uma de tempo definido. Para obtenção da relação V/Hz é utilizada a tensão de fase A-B. Sua interface pode ser observada na Figura 3.

Figura 3 – Relé de proteção de geradores GPU2000R



Fonte: ABB (2002).

- SEPAM G87: desenvolvido pela Schneider Electric, possui função de controle local de fechamento e abertura de todos dispositivos por ele controlados. Suas medições podem ser visualizadas de forma numérica com unidades ou em gráficos de barras. Utiliza a proteção contra sobre-excitação, utilizando uma curva de tempo inverso. A Figura 4 ilustra esse relé.

Figura 4 – Relé de proteção de geradores SEPAM G87



Fonte: SCHEIDER (2013).

- SEL-300G: fabricado pela *Schweitzer Engineering Laboratories*. Para utilização da proteção contra sobre-excitação, oferece dois estágios, um de tempo inverso e outro de tempo definido. Seu modelo está representado na Figura 5.

Figura 5 – Relé de proteção SEL-300G



Fonte: Ferrer e Schweitzer (2010).

Vale ressaltar que o desenvolvimento de algoritmos aplicados em relés digitais é um grande desafio, vistas as constantes mudanças das características do SEP e suas respectivas cargas, além da presença de conteúdo harmônico, as quais interferem diretamente na eficiência dos relés. Assim, faz-se necessário que os dispositivos de proteção sejam constantemente evoluídos, de modo a garantir sua confiabilidade (STALTER, 2014).

2.7 Características volts/hertz (V/Hz)

A condição de sobre-excitação de um gerador ocorre quando há um sobrefluxo magnético no núcleo do mesmo. A densidade do fluxo magnético é proporcional a tensão e inversamente proporcional a frequência aplicada no núcleo do gerador. Assim a ocorre a sobre-excitação quando o fluxo no núcleo atinge valores elevados, resultando em um acréscimo na corrente de excitação e da força magnetomotriz, que satura o núcleo do gerador, de modo que o fluxo atinge valores superiores ao joelho da curva característica de excitação da máquina (MARDEGAN, 2012).

Portanto a função 24 de um relé digital, ou limitador V/Hz, é utilizada na proteção contra danos decorrentes de sobrefluxos, o qual pode ser provocado devido à baixa frequência ou sobretensões, resultando em sérios danos ao gerador.

Sendo assim, sabe-se que o fluxo magnético é diretamente proporcional a tensão produzida por uma bobina, e inversamente proporcional à frequência da mesma, conforme as Equações 2.1 e 2.2 (GIRGIS; VU, 1995).

$$V = 4,44.N.f.k.\varphi \quad (2.1)$$

$$\varphi = \frac{V}{4,44.N.f.k} \quad (2.2)$$

Em 2.1 e 2.2:

- V - tensão no terminal, expressa em volts;
- N - número de espiras;
- f - frequência, expressa em hertz;
- k - fator de distribuição; e
- φ - fluxo magnético.

Como k e N são constantes, chega-se a Equação 2.3.

$$\varphi \propto \frac{V}{f} \quad (2.3)$$

Portanto, por meio das medições dos valores RMS da tensão e da medição da frequência, é possível determinar se o fluxo aumenta verificando se a relação V/Hz aumenta. Por exemplo, se a frequência cai, a tensão é mantida constante devido ao regulador de tensão, gerando um aumento no fluxo, o que provocará sobreaquecimento no núcleo do gerador (FERRER; SCHWEITZER, 2010).

Uma condição de sobre-excitação, pode ocorrer devido a diversos fatores, tais como (FERRER; SCHWEITZER, 2010):

- Durante a partida manual do gerador, pode ocorrer um aumento excessivo da excitação de campo;
- A queima de um fusível do Transformador de Potencial (TP) pode provocar uma leitura incorreta de algum valor pelo controle de realimentação;
- Conexão incorreta dos TPs que alimentam o circuito de controle de sobre-excitação;
- Perda de um grande bloco gerador; e
- Conexão de uma grande carga.

Além disso, quando o núcleo encontra-se saturado, sua forma de onda não possui natureza senoidal, e suas correntes induzidas são ricas em conteúdos harmônicos, os quais aumentam os efeitos do aquecimento na máquina.

Nesse contexto, um relé que possa medir a relação V/Hz está medindo indiretamente o fluxo da máquina. Assim, a utilização de limitadores V/Hz para a proteção de geradores síncronos pode ser justificada devido a possibilidade de operação do gerador em condições de sobretensões e subfrequências. A ação do limitador ocorre quando o erro gerado pelo mesmo após a comparação dos níveis de tensão e frequência nos terminais, relação V/Hz, ultrapassa o limite ajustado. Quando isso ocorre, o limitador força a redução da tensão terminal de forma que a relação tensão/frequência retorne a faixa de operação permitida, abrindo o disjuntor do sistema de excitação (GIRGIS; VU, 1995).

De acordo com as normas ANSI/IEEE C50.13, os limites estabelecidos para a relação V/Hz de geradores em condições de operação contínua é de 1,05 pu na sua base. Normalmente, cada gerador possui seus limites para a relação V/Hz especificadas pelo seu fabricante (MOZINA; GARDELL, 2011).

De acordo com Kindermann (2008), os ajustes para essa proteção são realizados através dos valores nominais da razão da tensão pela frequência, expressa em porcentagem. Este valor pode estar entre 5% e 20% com ajuste de tempo definido ou inverso. Caso as curvas limites de sobre-excitação sejam fornecidas pelos fabricantes, é recomendável replicá-la de acordo com a curva limite, porém deslocada 20% para baixo.

Quando uma sobre-excitação é detectada pelo esquema de proteção, o mesmo ordena a abertura do disjuntor principal e do circuito de excitação do gerador. Os esquemas empregados nos limitadores V/Hz para proteção contra sobre-excitação, são descritos a seguir (CARRASCO, 2009):

- No sistema de excitação: funciona de forma independente dos outros esquemas de proteção contra sobre-excitação, limitando a saída do gerador a um valor máximo para a relação V/Hz;
- Tempo definido: opera quando a sobre-excitação permanece por um intervalo de tempo previamente definido, ajustado para uma determinada relação V/Hz. Pode utilizar também dois elementos de tempo definido, um para operações rápidas, quando ocorrem grandes desvios na relação V/Hz e outro com um ajuste mais lento, utilizado para desvios menos severos; e
- Tempo inverso: atua mais rápido para valores maiores da relação V/Hz, pois é baseado em uma operação de uma curva de tempo inverso. Geralmente os fabricantes de relés digitais fornecem quatro tipos de curvas.

2.8 Considerações Finais

Nesse Capítulo, foi apresentada a importância da proteção para o SEP, assim como para os geradores síncronos, devido às diversas condições anormais a qual estão sujeitos. Foram destacadas as principais funções de proteção para um gerador síncrono, as quais podem ser incorporadas a um relé digital, dando-se ênfase a função 24.

Além disso, foi discutida a característica V/Hz, a qual mede indiretamente o nível de excitação da máquina. Os conceitos aqui apresentados compõem a base para o estudo realizado no trabalho.

O Capítulo seguinte apresenta as metodologias para estimação de frequência analisadas, demonstrando a fundamentação e as respectivas lógicas, as quais foram implementadas em software Matlab[®].

3 MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DE FREQUÊNCIA

3.1 Considerações Gerais

Nesse Capítulo, são apresentadas as metodologias de estimação de frequência, as quais foram aplicadas na função ANSI 24, de modo a determinar o desempenho desta em consequência da atuação dos estimadores de frequência. As técnicas aplicadas foram:

- Método de Detecção da Passagem do Sinal por Zero (DPSZ);
- Método de Ajuste de Pontos para um Sinal Senoidal Puro (ASSP);
- Método do Laço Fechado de Fase Digital (PLL);
- Método Baseado em Morfologia Matemática (MM);
- Métodos de Prony's (MP);
 - Utilizando janela de Blackman (MPB); e
 - Utilizando janela de Haming (MPH).
- Método baseado na Transformada Discreta de Fourier de Macleod (MAC);
- Método fundamentado na Transformada Discreta de Fourier de Anibal (ANB);
- Método fundamentado na Transformada Discreta de Fourier de Jacobsen e Kootsoolos (JAC); e
- Método fundamentado na Transformada Discreta de Fourier de Candan (CAN);

Tais metodologias foram implementadas no software Matlab[®], as quais foram aplicadas na função de proteção contra sobre-excitação de um relé digital, de forma a analisar e avaliar seu desempenho na proteção de um GS, quando este se encontra submetido a uma condição de sobre-excitação.

3.2 Método de detecção da passagem do sinal por zero - (DPSZ)

Segundo Friedman (1994), essa metodologia baseia-se na medição do intervalo de tempo entre duas passagens do sinal de tensão por zero, relacionando a frequência (f) ao período (T), conforme a Equação 3.1.

$$f = \frac{1}{T} \quad (3.1)$$

O instante do cruzamento no qual ocorre a passagem por zero (t_{PZ}) é dado através da interpolação linear entre duas amostras consecutivas de tensão (V_k e V_{k-1}), conforme Sorrentino e Carvalho (2010).

A utilização de uma interpolação linear torna-se de simples implementação, pois sua forma de onda é aproximadamente igual a uma reta em um intervalo curto de tempo, de acordo com a Equação 3.2. A estimativa da frequência é recalculada a toda nova passagem por zero, conforme a Equação 3.3. Durante o intervalo de tempo entre os dois cruzamentos consecutivos por zero, o valor de frequência é igual ao último valor calculado.

$$t_{PZ} = \frac{T_{k-1} \cdot V_k \cdot T_k \cdot V_{k-1}}{V_k - V_{k-1}} \quad (3.2)$$

$$f_k = \frac{1}{t_{t_{PZ} \text{ Atual}} - t_{t_{PZ} \text{ Anterior}}} \quad (3.3)$$

Nas Equações 3.2 e 3.3, tem-se que:

- t_{PZ} – é o instante de tempo da última passagem por zero, em segundos;
- t_k – é o instante de tempo no momento que ocorre a passagem por zero da amostra, em segundos;
- V_k – representa a tensão monofásica no momento em que ocorre a passagem por zero da amostra, em volts;
- T_{k-1} – equivale ao instante de tempo no momento k-1 da amostra anterior a passagem por zero, em segundos;
- V_{k-1} – é a tensão monofásica no momento k-1, para a amostra anterior a passagem por zero, em volts;
- f_k – representa a frequência atual, em hertz;
- $t_{PZ \text{ Atual}}$ – indica o instante de tempo da última passagem por zero, em segundos; e
- $t_{PZ \text{ Anterior}}$ – o instante da passagem por zero antecedente, em segundos.

3.3 Método de Ajuste de Pontos para um Sinal Senoidal Puro - (ASSP)

Proposta por Sorrentino e Carvalho (2010), para determinar a frequência, essa técnica é baseada em relações trigonométricas, as quais são obtidas a partir de três amostras consecutivas de um sinal de tensão (V_{k-2} , V_{k-1} , V_k). Como o sistema apresenta uma frequência constante e os valores de tensão são medidos também em uma frequência constante, a diferença entre as duas amostras também deve apresentar frequência constante. Assim, a frequência é calculada através da Equação 3.4.

$$f = \frac{1}{2\pi\Delta t} \arccos \left(\frac{V_{k-2} + V_k}{2V_{k-1}} \right) \quad (3.4)$$

Em 3.4, tem-se que:

- f - frequência;
- Δt - representa o intervalo de amostragem;
- V_k - a amostra de tensão no instante k ;
- V_{k-1} - a amostra de tensão no instante $k-1$; e
- V_{k-2} - a amostra de tensão no instante $k-2$.

3.4 Método do Laço Fechado de Fase Digital - (PLL)

Apresentado por Sithamparanathan (2008), esse método emprega um laço, o qual é composto por um detector de erro de fase, um multiplicador complexo e uma função tangente. Sendo assim, o PLL estima a frequência partir de um sinal complexo. Ainda, a técnica conta com um filtro e um ONC (oscilador numérico controlado). Onde o filtro é dado pela função de transferência $D(z)$, conforme a Equação 3.5. Já o ONC é dado por um oscilador controlado por tensão $V(z)$, conforme a Equação 3.6.

$$D(z) = \frac{az}{z - (1 - a)} \quad (3.5)$$

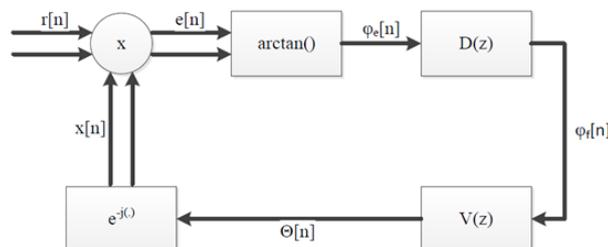
$$V(z) = \frac{k}{z - 1} \quad (3.6)$$

Em 3.5, a variável a é obtida pela Equação 3.7.

$$a = \frac{4k}{k^2 + 2k + 2} \quad (3.7)$$

O laço utilizado pelo PLL é representado pela Figura 6, onde o sinal complexo ($r[n]$) é multiplicado pela saída do sintetizador numérico, gerando o erro de fase ($e[n]$). O erro será a entrada de uma função arco-tangente que estima a diferença de fase entre o sinal recebido e o sinal local. O erro de fase, então, passa pelo filtro e pelo acumulador de fase. O valor da fase do sinal é então utilizado para sintetizar o sinal local completando a malha (SANTOS, 2015) .

Figura 6 – Malha PLL.



Fonte: Santos (2015).

Tabela 3 – Parâmetros Utilizados para cada frequência de amostragem do PLL.

$f_{\text{amostragem}}[\text{Hz}]$	k	N
960	0,3	48
1920	0,1	96
3840	0,1	192
5760	0,1	288
7680	0,1	384
15360	0,05	768

Fonte: Santos (2015)

Dessa forma, o cálculo da frequência estimada para esse sinal é dado pela Equação 3.8.

$$f(t) = \frac{k}{2\pi N \Delta T} \sum_{n=1}^{l+N} \varphi f(n) \quad (3.8)$$

Em 3.8, os valores dos parâmetros k e N são dados pela Tabela 1 (SANTOS, 2015). Já o parâmetro ΔT equivale ao valor do intervalo de amostragem em segundos.

3.5 Método baseado em Morfologia Matemática - (MM)

Técnica baseada na estimação morfológica das componentes de Clarke, obtidas através da Transformada $\alpha\beta$, essa técnica foi proposta por Santos et al. (2015). Utiliza os sinais de tensão de cada fase, onde as componentes α e β são dadas de acordo com a Equação 3.9 (SANTOS et al., 2015).

$$\begin{pmatrix} v_{\alpha}(n) \\ v_{\beta}(n) \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} v_A(n) \\ v_B(n) \\ v_C(n) \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

De maneira que:

- v_A , v_B e v_C : Sinal de tensão de cada fase do sistema; e
- v_{α} e v_{β} : Sinal de tensão complexo.

Sendo assim, o sinal complexo da Transformada $\alpha\beta$ é dado conforme a Equação 3.10

$$u(n) = i_a(n) + j \times i_{\beta}(n) \quad (3.10)$$

A frequência estimada é dada a partir da Equação 3.11, a qual é obtida como função da diferença de fase entre o sinal complexo obtido pela Transformada $\alpha\beta$.

$$f(n) = \frac{f_{\text{samp}}}{2\pi} \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}[\Delta\varphi(n)]}{\text{Re}[\Delta\varphi(n)]} \right) \quad (3.11)$$

Onde $\Delta\varphi$ é o número complexo dado pela Equação 3.12 e f_{samp} é dada pela frequência de amostragem do sistema.

$$\Delta\varphi(n) = u_{\text{est}}(n) \times u(n)^* \quad (3.12)$$

O parâmetro $u(n)^*$ é dado pelo conjugado de $u(n)$. Já para a obtenção de $u_{\text{est}}(n)$ é realizado o cálculo de P_α e P_β , os quais são dados pela Equação 3.13, respectivamente, para dados do sinal α ou β .

$$P(n) = \frac{1}{2}(w \oplus SE + w!SE) \quad (3.13)$$

Segundo Wu et al. (2007), um SE é definido como um valor ou conjunto de valores utilizados para realizar uma comparação dos elementos do SE com o termo central de uma janela de dados. Sendo que, nesse caso, o SE é definido pela Equação 3.14.

$$SE = \cos(2\pi f \Delta t) \quad (3.14)$$

Onde:

- f - Frequência nominal do SEP; e
- Δt - Intervalo de amostragem.

Em 3.13, w é obtido através de janelas móveis com três amostras cada, sendo uma para cada sinal (α e β), onde, a cada nova amostra, ambas as janelas são atualizadas, de maneira que os elementos das posição $n-2$ sejam descartados e os elementos restantes sejam deslocados para a esquerda. Assim, a nova amostra é alocada na posição n . As referidas janelas são dadas pelas Equações (3.15 e 3.16).

$$w_\alpha = [i_\alpha(n-2) \quad i_\alpha(n-1) \quad i_\alpha(n)] \quad (3.15)$$

$$w_\beta = [i_\beta(n-2) \quad i_\beta(n-1) \quad i_\beta(n)] \quad (3.16)$$

Por fim, o cálculo do valor de $u_{\text{est}}(n)$, é obtido a partir da Equação 3.17.

$$u_{\text{est}}(n) = P_\alpha + jP_\beta \quad (3.17)$$

3.6 Método de Prony - (MP)

Essa técnica utiliza um filtro baseado na Transformada Discreta de Fourier (TDF), que a cada amostra da janela realiza o cálculo de um fasor no instante k , conforme a Equação 3.18 (LOBOS; REZMER, 1997).

$$g_k = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v_{k+n-N+1} e^{jn\omega T} \quad (3.18)$$

Onde:

- k - Instante de tempo;
- $v_{k+n-N+1}$ - Tensão amostrada no instante k ;
- ω - Frequência fundamental; e
- T - Intervalo de amostragem.

A cada novo ciclo de amostragem, a nova tensão é calculada, isto é, o valor g_k , o qual é inserido na janela de dados, enquanto a amostra mais antiga desta janela é descartada. Após a filtragem realizada pela Equação 3.18, a frequência instantânea é determinada pelo cálculo da diferença angular entre dois fasores consecutivos, calculada através da Equação 3.19. O cálculo da velocidade angular instantânea do fasor é dado pela Equação 3.20.

$$f_k = \frac{\arg[g_{k+1}] - \arg[g_k]}{2\pi T} \quad (3.19)$$

$$\arg[g_k] = \arctan\left(\frac{\text{Im}[g_k]}{\text{Re}[g_k]}\right) \quad (3.20)$$

Em 3.20, $\text{Im}[g_k]$ representa a parte imaginária de g_k e $\text{Re}[g_k]$, a parte real.

De maneira a melhorar o desempenho de tal metodologia, Lobos e Rezmer (1997) propuseram filtrar a componente fundamental da tensão, tendo como base a TDF, dada pela Equação 3.21. Ainda, buscando o melhor desempenho para rastrear valores de frequência fora da nominal, os autores sugerem a utilização de uma janela de Hamming (Equação 3.22) ou uma janela de Blackman (Equação 3.23), sendo que cada janela influencia de forma diferente cada amostra processada pelo filtro de Fourier.

$$G_k = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v_{k+n-N+1} \cos(n\omega T) \quad (3.21)$$

$$\omega_H = 0,54 - 0,46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \quad (3.22)$$

$$\omega_B = 0,42 - 0,5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + 0,08 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right) \quad (3.23)$$

Nas Equações 3.21 a 3.23, tem-se:

- k - Instante de tempo;
- $v_{k+n-N+1}$ - Tensão amostrada no instante k ;
- ω - Frequência fundamental;

- T - Intervalo de amostragem; e
- N - Taxa de amostragem.

Por fim, Lobos e Rezmer (1997), utilizam o valor da tensão amostrada pelo filtro G_k para determinar o valor da frequência conforme a Equação 3.24. Ainda, os autores realizaram testes para diferentes valores de M e N , de forma que, quando $M=15$ e N igual o número de amostras por ciclo, obtiveram o melhor desempenho utilizando a janela de Hamming ou de Blackman, assim, justificando o uso desses valores neste trabalho.

$$f_m = \frac{1}{2\pi T} \cos^{-1} \left(\frac{\sum_{m=2}^{M-1} (g_{m-1} + g_{m+1})^2}{2 \sum_{m=2}^{M-1} g_m (g_{m-1} + g_{m+1})} \right) \quad (3.24)$$

3.7 Métodos baseados na Transformada Discreta de Fourier - (TDF)

Os métodos abaixo listados para realizar o cálculo da frequência utilizam a Equação 3.25, sendo que cada uma das diferentes propostas se diferencia na forma de obtenção do valor do parâmetro δ , conforme detalhado nas Subseções seguintes.

$$f_{(t)} = \frac{(k_{max} + \delta)fa}{N} \quad (3.25)$$

3.7.1 Proposta de Macleod (1998) - (MAC)

De acordo com Macleod (1998), a utilização de componentes superiores do espectro é justificada devido a maior parte da energia espectral de uma senóide ser obtida nas três maiores componentes do espectro $(A_{máx}, A_{máx-1}, A_{máx+1})$, mesmo para o pior caso encontrado, onde δ igual a 0,5. De modo, a estimar a frequência pela Equação 3.25, essa metodologia utiliza as três componentes superiores do espectro para obtenção do valor de γ através da Equação 3.26. Por fim, o valor de δ é determinado segundo a Equação 3.27.

$$\gamma = \frac{\text{Real}(A_{máx-1} \cdot A_{máx}^* - A_{máx+1} \cdot A_{máx}^*)}{\text{Real}(2|A_{máx}|^2 + A_{máx-1} \cdot A_{máx}^* + A_{máx+1} \cdot A_{máx}^*)} \quad (3.26)$$

$$\delta = \frac{\sqrt{1 + 8\gamma} - 1}{4\gamma} \quad (3.27)$$

3.7.2 Proposta de Aníbal (1999) - (ANB)

Através da modelagem de um sinal senoidal no domínio da frequência, Aníbal (1999) desenvolveu um algoritmo para estimação de frequência, que utiliza uma estimativa de amplitude e de fase, aplicando uma TDF em um sinal de tensão, a qual é dada pela Equação 3.28. A obtenção do parâmetro δ , é dada através da Equação 3.29.

$$V(a) = \sum_{n=0}^{1+N} h(n)V(n)e^{\frac{-2j\pi n(K+0,5)}{N}} \quad (3.28)$$

$$\delta = \frac{3}{\pi} \tan^{-1} \frac{\sqrt{3}}{1 + 2 \left[\frac{A_{max-1}}{A_{max+1}} \right]^{\frac{1}{G}}} \quad (3.29)$$

Onde:

- $k = 0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots, N-1$; e
- $n = 0 \leq n \leq N-1$.

Para reduzir o erro máximo da estimativa, Aníbal (1999) define G como sendo igual a 1,37. Ainda, com a finalidade de diminuir o efeito de aliasing, o autor utiliza uma derivada da janela de Hamming, de maneira a melhorar a seletividade do espectro. Sendo assim, $h(n)$ é dado pela Equação 3.30.

$$h(n) = \text{sen} \frac{(n + 0,5)\pi}{N} \quad (3.30)$$

3.7.3 Proposta de Jacobsen e Kootsoolos (2007) - (JAC)

Jacobsen e Kootsoolos (2007) desenvolveram uma metodologia baseada na TDF, onde o parâmetro δ é dado através de uma interpolação parabólica, dada pela Equação 3.31. O parâmetro δ tem por objetivo reduzir o erro médio da estimação, a qual é feita segundo a Equação 3.25.

$$\delta = -\text{Real} \left(\frac{A_{max+1} - A_{max-1}}{2A_{max} - A_{max-1} + A_{max+1}} \right) \quad (3.31)$$

3.7.4 Proposta de Candan (2013) - (CAN)

Candan (2013) propôs um fator de correção para o cálculo do parâmetro δ proposto por Jacobsen e Kootsoolos (2007), o qual apresentou uma resposta com menor erro estático, de modo que, utilizar um método de correção se faz eficiente para valores pequenos e médios de N . Sendo assim, δ é dado pela Equação 3.32.

$$\delta = \text{Real} \left(\frac{\tan \frac{\pi}{N}}{\frac{\pi}{N}} \right) \left(\frac{A_{max+1} - A_{max-1}}{2A_{max} - A_{max-1} + A_{max+1}} \right) \quad (3.32)$$

3.8 Considerações Finais

O presente Capítulo descreve cinco metodologias utilizadas para estimação da frequência elétrica em SEP. Tais metodologias tiveram suas lógicas implementadas no software Matlab[®] e aplicadas na função ANSI 24, também implementada em Matlab[®], de forma a comparar como cada metodologia para estimação de frequência influencia neste tipo de proteção. Tal comparação é dada em relação a um sinal de frequência de referência

obtido por simulação, o qual é assumido como sendo o ideal. Os resultados obtidos neste estudo são discutidos no Capítulo seguinte.

4 RESULTADOS E AVALIAÇÕES

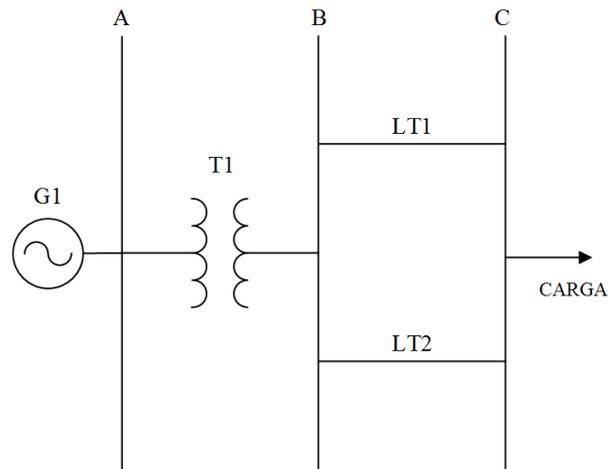
4.1 Considerações Gerais

O presente Capítulo apresenta os resultados para a análise do desempenho da função de proteção contra sobre-excitação de um relé digital atuando com diferentes metodologias destinadas à estimação de frequência. As metodologias em análise são as mesmas descritas no Capítulo 3, as quais têm por finalidade estimar a frequência do sinal de tensão do GS, a qual é utilizada para determinar o valor da razão V/Hz que, por sua vez, determina a atuação do relé 24. Os métodos analisados tiveram seu desempenho avaliado para uma taxa de amostragem de dezesseis (16) amostras por ciclo. Para isso, foi implementado um sistema teste, onde foram simulados diferentes casos de sobre-excitação em um GS.

4.2 Sistema teste

O sistema teste, representado pela Figura 7, foi implementado no software DigSI-LENT Power Factory[®]. Tal sistema é composto por três barras, possuindo um GS, um transformador elevador, duas linhas de transmissão e uma carga. Para cada caso simulado, o GS foi submetido a um determinado nível de sobre-excitação e os sinais de tensão das fases a, b e c do gerador, bem como a resposta de frequência em seus terminais, foram salvos. Tais sinais compuseram o banco de dados posteriormente processados pela lógica da função 24, atuando com diferentes estimadores de frequência. Ainda, ressalta-se que esse sistema teste conta com controladores de tensão e frequência. Tais controladores são coordenados com os dispositivos de proteção em um intervalo de 30 segundos. Caso a atuação desses controladores não elimine uma sobre-excitação superior a 1,05 p.u. (norma ANSI/IEEE C50.13) nesse intervalo de tempo, então o relé 24 deve atuar segundo sua curva característica, desconectando o sistema de excitação da máquina.

Figura 7 – Sistema Teste



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nos casos simulados, foi considerado um gerador de grande porte com potência de 390 MVA. Os parâmetros do GS simulado são apresentados na Tabela 4

Tabela 4 – Parâmetros do GS.

Parâmetro	Valor/Descrição
P	390 MVA
V_n	13,8 kv
FP	0,96
f_n	60 Hz
x_d	0,9 p.u.
x_q	0,54 p.u.
x_d'	0,26 p.u.
x_d''	0,24 p.u.
x_q''	0,26 p.u.
x_0	0,13 p.u.
r_0	0 p.u.
x_2	0,26 p.u.
r_2	0 p.u.
rstr	0.0021 p.u.
T_{d0}'	5,4 s
T_{d0}''	0,0374 s
T_{q0}''	0,09 s
Tipo de rotor	Polo Saliente
Conexão	YN

Fonte: GAZEN et al. (2010) e autor.

Além disso, as Tabelas 5 e 6 apresentam os parâmetros simulados para o transformador e para as linhas de transmissão, respectivamente (GAZEN et al., 2010).

Tabela 5 – Parâmetros do transformador.

Parâmetro	Valor/Descrição
P	510 MVA
LV_{side}	13,8 kv
HV_{side}	500 kv
f_n	60 Hz
x1	0,19 p.u.
x2	0 p.u.
Conexão LV_{side}	Δ
Conexão HV_{side}	YN

Fonte: GAZEN et al. (2010).

Tabela 6 – Parâmetros da linha de transmissão.

Parâmetro	Valor/Descrição
V_n	500 kV
I_n	0,963 kA
f_n	60 Hz
Z1, Z2	0,0212+50,1162389 Ω
Z0	0,0848+j0,4649556 Ω
B1, B2	72,25663 $\mu s/km$
B0	72,44513 $\mu s/km$
Material	Cobre

Fonte: GAZEN et al. (2010).

Por fim, foram simulados diversos casos , sendo cada um para os respectivos níveis de sobre-excitação (1,10 p.u. até 2,00 p.u.). Em todos os casos, a sobre-excitação se inicia no instante 0,5 s e perdura por 300 segundos.

4.3 Característica volts/hertz (V/Hz) Analisada

Para o desenvolvimento dos testes, escolheu-se a característica V/Hz do relé GPU2000R, fabricado pela ABB. Esse relé oferece três curvas de tempo inverso e uma curva de tempo definido para a função 24 (Anexo). Os eventos de sobre-excitação normalmente ocorrem durante os períodos de operação fora da frequência nominal, ou seja, na partida ou na parada do gerador, devido ao ajuste do sistema de excitação, o qual mantém a saída de tensão nominal. A função V/Hz utiliza a tensão de fase A-B e a frequência elétrica medida a partir do sinal de tensão entre as fases AB nos terminais da máquina para medição da relação. As curvas de temporização para esse relé são dadas pela Equação 4.1 (ABB, 2002).

$$t = e^{\left(\frac{A_k+B-x}{C}\right)} \quad (4.1)$$

Onde.

- t – Tempo de disparo em minutos;
- k – Ajuste de controle de tempo, ajustado entre 0 e 9;
- x – Valor aplicado V/Hz em por cento dos V/Hz nominal;

Os parâmetros A, B e C da Equação 4.1 possuem valores diferentes para cada família de curvas, sendo possível a escolha de apenas uma curva k dentro de uma família, a qual determina a atuação do relé 24. Os parâmetros A, B e C, para cada família de curvas, são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros das curvas.

	A	B	C
Curva 1	2,5	115	4,886
Curva 2	2,5	113,5	3,040
Curva 3	2,5	108,75	4,443

Fonte: ABB (2002).

Ainda, deve-se destacar que, nos testes realizados, optou-se pela curva $k = 0$ da família da Curva 1, a qual retorna os menores tempos de atuação para a função 24.

Por fim, cabe ressaltar que o desempenho da função V/Hz depende diretamente da atuação do estimador de frequência, cuja performance foi avaliada em termos do erro relativo percentual absoluto da estimação, o qual é dado pela Equação 4.2.

$$erro(n) = \frac{|f_{estimada}(n) - f_{gerador}(n)|}{|f_{gerador}(n)|} \cdot 100\% \quad (4.2)$$

Em 4.2, $f_{estimada}$ e $f_{gerador}$ representam, respectivamente, a frequência estimada pela respectiva metodologia para estimação de frequência e o valor de referência para o mesmo parâmetro, o qual é medido nos terminais do gerador, ambos para a amostra atual (n).

Nas análises, foram determinadas as razões V/Hz, sendo uma obtida com o sinal de frequência de referência (medido nos terminais do gerador) e a outra utilizando o sinal de frequência obtido pelo respectivo estimador. Dessa forma, o tempo de atuação obtido considerando a primeira razão V/Hz foi considerado ideal, para a comparação com aquele obtido segundo a razão V/Hz conseguida a partir do sinal de frequência do estimador. Por fim, alguns dos resultados obtidos são mostrados na Seção seguinte.

Sendo assim, destaca-se que a avaliação das metodologias foi feita comparando os resultados considerados ideais com aqueles obtidos através da atuação de cada estimador de frequência., Nessa avaliação, foram considerados os seguintes parâmetros, em crescente de importância:

1. Instante de atuação;

2. Instante de sensibilização.
3. Tempo de atuação; e
4. Relação V/Hz;

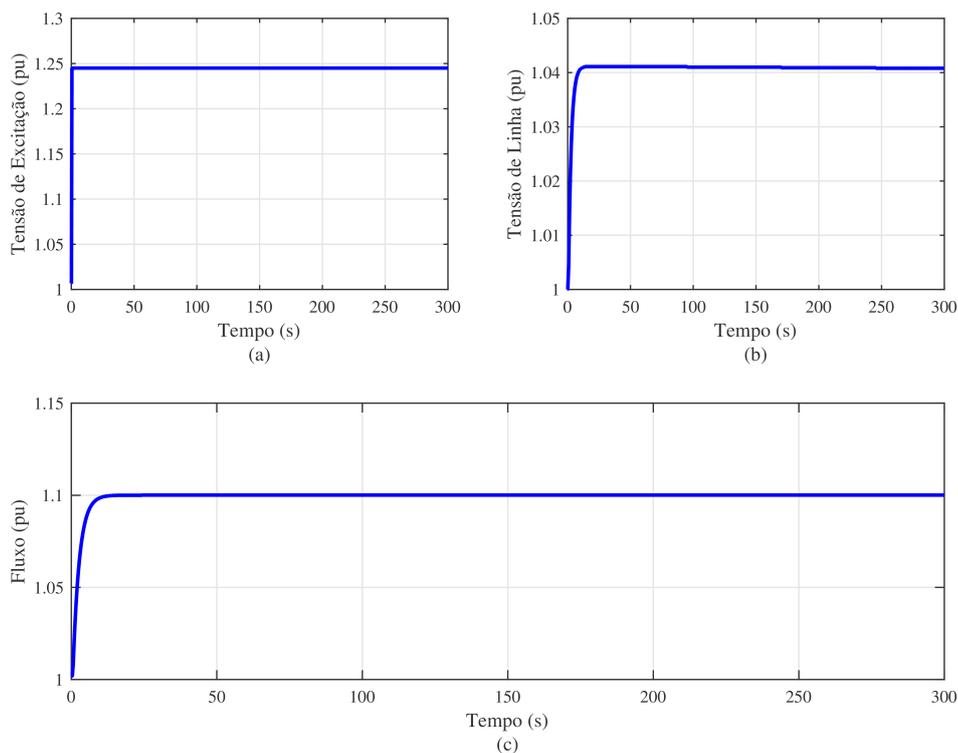
Dessa forma, o instante de atuação é o parâmetro de maior relevância para este estudo, sendo que, para um respectivo método se mostrar eficiente, sua resposta não deve apresentar uma diferença de 30 ms para mais ou para menos em relação ao instante de atuação considerado ideal. Assim, os métodos que apresentam valores fora dessa faixa são considerados ineficientes. Os demais parâmetros são dados como um fator desempate.

4.4 Resultados

4.4.1 Caso 1: sobre-excitação de 10%

Para esse caso, o GS é submetido a uma tensão de excitação de 1,245 p.u., permanecendo neste estado por 300 s, a qual pode ser observada na Figura 8a, gerando uma tensão de linha (Figura 8b) de 1,0451 p.u. Essa tensão de excitação produz uma sobre-excitação de 1,10 p.u. no GS, ou seja, um sobrefluxo de 10% na máquina (Figura 8c). Ressalta-se ainda que a incidência deste evento ocorre no instante $t=0,5$ s.

Figura 8 – Sinais do GS com sobre-excitação de 10%.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando a Tabela 8, destacam-se quatro metodologias: PLL, MM, MPH e MPB. Estas apresentaram resultados muito parecidos e próximos aos valores ideais, apresentando uma boa eficiência na detecção do sobrefluxo ocorrido no GS. Destaca-se a atuação da função 24 associada ao estimador PLL, para a qual sua atuação ocorre muito próxima ao instante considerado ideal, operando 0,0031 s antes do tempo ideal. Ressalta-se ainda que, sua relação V/Hz apresenta uma diferença de 0,0005% , enquanto sua sensibilização ocorreu 0,0230 s antes da sensibilização ideal do relé, fazendo com que a atuação ocorra em um tempo menor que o ideal.

Em relação aos métodos ASSP, DPSZ, CAN, ANB, JAC e MAC, pode-se afirmar que estes não apresentaram bons resultados quando submetidos a condição de sobre fluxo de 10%, sendo assim considerados ineficientes frente a esta situação. O método ASSP, além de ser ineficiente, apresentou o pior desempenho, por atuar 136,2396 s antes do tempo ideal, o que poderia provocar uma descoordenação entre a proteção e os controles da máquina. Além disso, apresenta uma relação V/Hz superior a 87M% em relação ao valor ideal, tendo sensibilizado a função 24 em 17,5593 s atrasado em relação ao tempo ideal. Já a operação do relé, ocorreu 152,3954 s antes do tempo de atuação ideal do relé. Esses resultados podem ser observados na Tabela 1 que resume a atuação da função 24 associada a cada metodologia para estimação de frequência.

Com base na Tabela 8, pode-se observar que, frente uma sobre-excitação de 10%, o método do PLL apresentou o melhor resultado. Nesse contexto, uma melhor visualização de sua atuação superior é mostrada na Figura 9, onde em “a” apresenta-se o instante de atuação (trip) ideal, assim como a instante de atuação do relé utilizando o PLL, mostrando, também, o instante de sensibilização ideal e a atingida pelo relé associado ao respectivo estimador. Já as Figuras 9b e 9c, apresentam uma ampliação da Figura 2a, as quais têm por objetivo mostrar as diferenças dos instantes de sensibilização e de atuação ideais atingidas pelo relé, onde é possível visualizar que a função 24 é sensibilizada antes do tempo ideal (Figura 9b), o que, conseqüentemente, faz com que o relé atue alguns milisegundos antes do tempo ideal (Figura 9c).

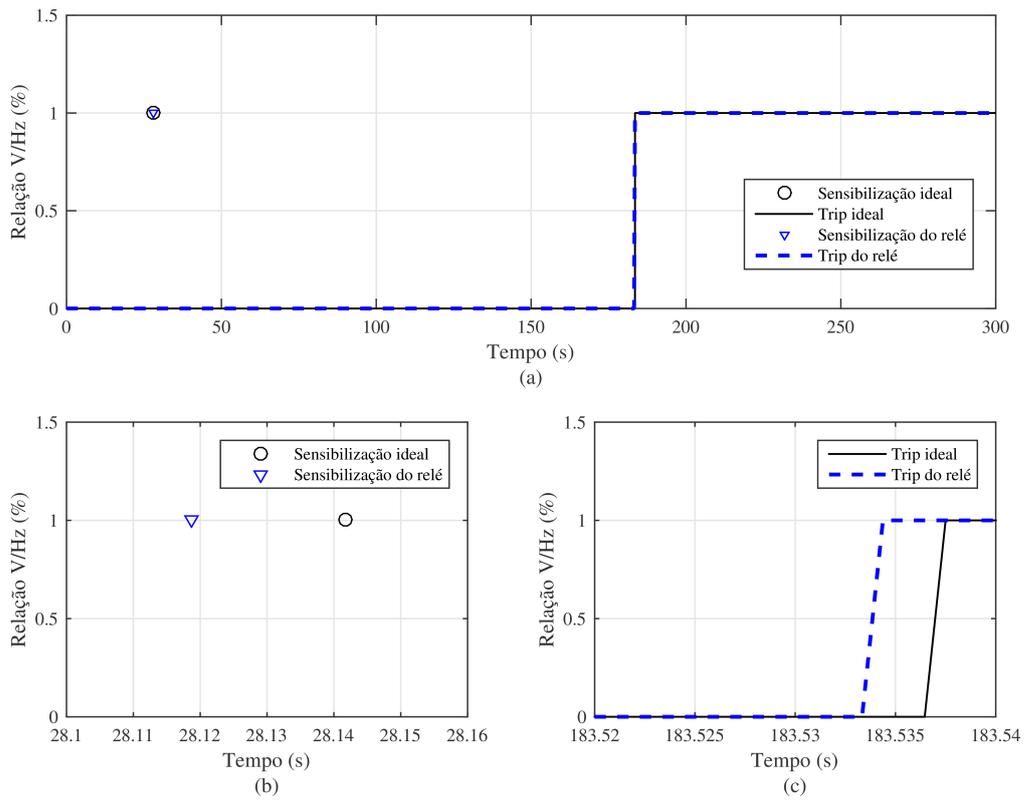
O bom desempenho do PLL se dá devido a boa atuação do estimador de frequência para uma condição de sobre-excitação de 10%, como pode-se observar através da Figura 10a, onde a frequência estimada é praticamente igual a frequência do gerador. A Figura 10b apresenta o baixo o erro relativo da estimação de frequência, o qual é praticamente nulo durante o período analisado.

Tabela 8 – Resultados para sobre-excitação de 10%.

Método	Instante Sensibilização [s]	Tempo Estimado Atuação [s]	Instante Atuação [s]	Relação V/Hz Atuação [%]
IDEAL	28,1417	155,3954	183,5375	110,3503
DPSZ	28,3615	3	96,7917	214,7564
ASSP	45,701	3	47,2979	87156953,69
PLL	28,1187	155,4139	183,5344	110,3498
MM	28,1219	155,3811	183,5156	110,3508
MPH	28,1052	155,4155	183,5219	110,3497
MPB	28,1052	155,4154	183,5219	110,3497
CAN	28,924	152,0723	181,0115	110,456
ANB	20,6927	156,3604	177,1438	110,3201
JAC	28,9406	152,1892	181,1354	110,4522
MAC	23,6406	130,7667	154,475	111,1935
Método	Δ Instante Sensibilização [s]	Δ Tempo Estimado Atuação [s]	Δ Instante Atuação [s]	Δ Relação V/Hz Atuação [%]
IDEAL	-	-	-	-
DPSZ	0,2198	-152,3954	-86,7458	104,4061
ASSP	17,5593	-152,3954	-136,2396	87156843,34
PLL	-0,023	0,0185	-0,0031	-0,0005
MM	-0,0198	-0,0143	-0,0219	0,0005
MPH	-0,0365	0,0201	-0,0156	-0,0006
MPB	-0,0365	0,02	-0,0156	-0,0006
CAN	0,7823	-3,3231	-2,526	0,1057
ANB	-7,449	0,965	-6,3937	-0,0302
JAC	0,7989	-3,2062	-2,4021	0,1019
MAC	-4,5011	-24,6287	-29,0625	0,8432

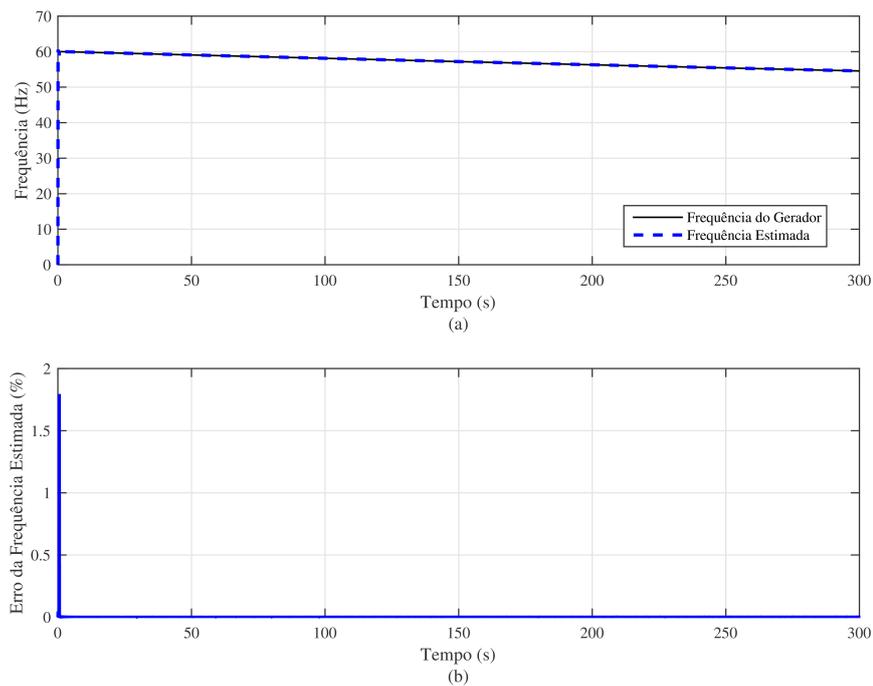
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9 – Atuação do relé com PLL para 10%.



Fonte: Elaborado pelo autor.

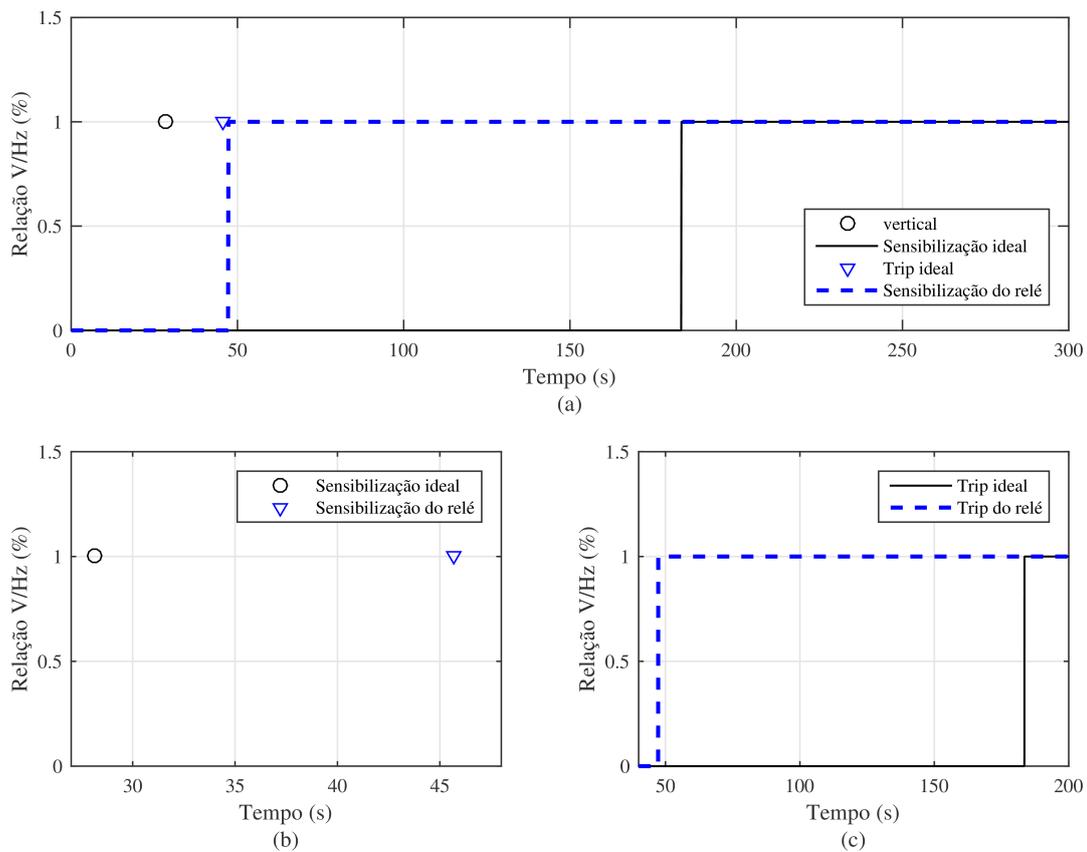
Figura 10 – Atuação do estimador de frequência PLL para 10%.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em contrapartida, o desempenho obtido segundo a estimação pelo ASSP, a qual foi considerada ineficiente frente uma condição de sobre-excitação de 10%, além de apresentar os piores índices, obteve valores muito superiores àqueles considerados ideais. Isso pode ser visualizado na Figura 11, a qual mostra que o relé sensibilizado após o tempo ideal e, mesmo assim, acaba atuando antes do instante considerado ideal. Tal fato ocorre devido a elevada resposta para a relação V/Hz no instante de tempo de 47,2979 s, a qual permanece por mais de 3 s, assim fazendo com o que relé atue.

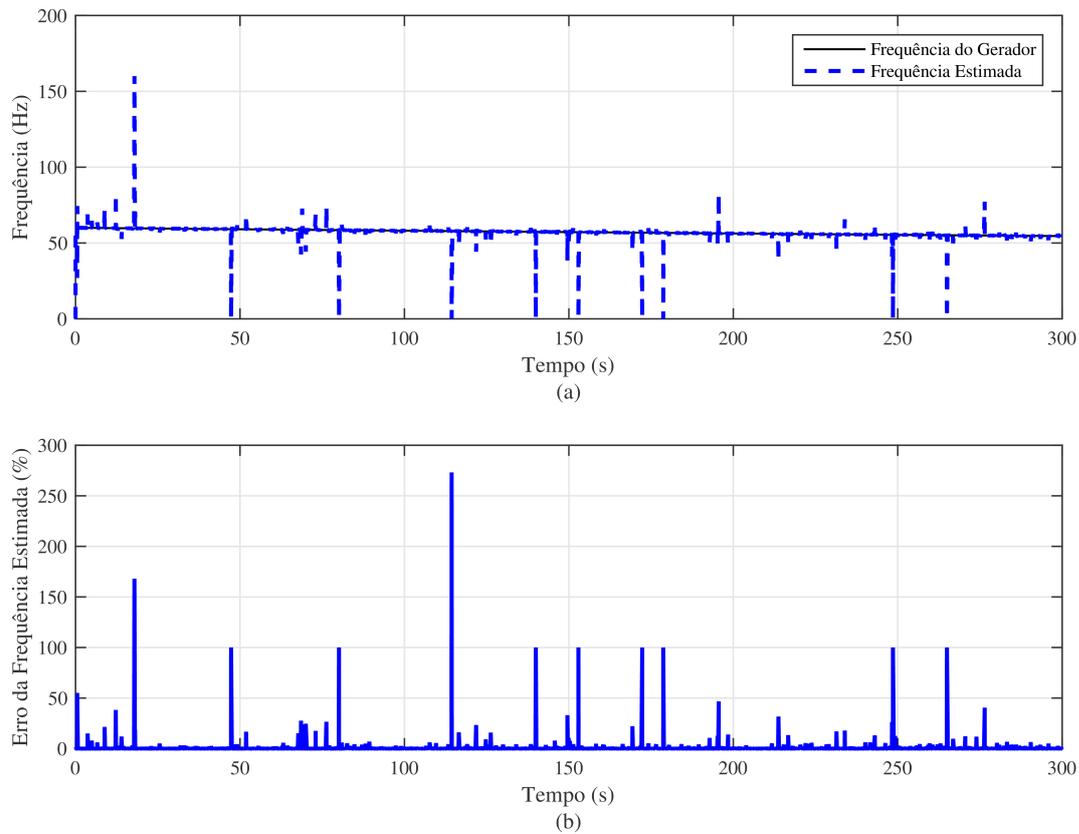
Figura 11 – Atuação do relé com ASSP para 10%.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, pode-se afirmar que isto ocorre devido ao estimador de frequência ASSP não apresentar uma boa eficiência quando submetido a condição de sobre-excitação. Isso pode ser visto na Figura 12a, a qual demonstra que o respectivo estimador não consegue rastrear a frequência do gerador, o que afeta diretamente na atuação da função 24 do relé. Já na Figura 12b é possível perceber o comportamento do erro relativo da estimação de frequência em relação a frequência do gerador.

Figura 12 – Atuação do estimador de frequência ASSP para 10%.

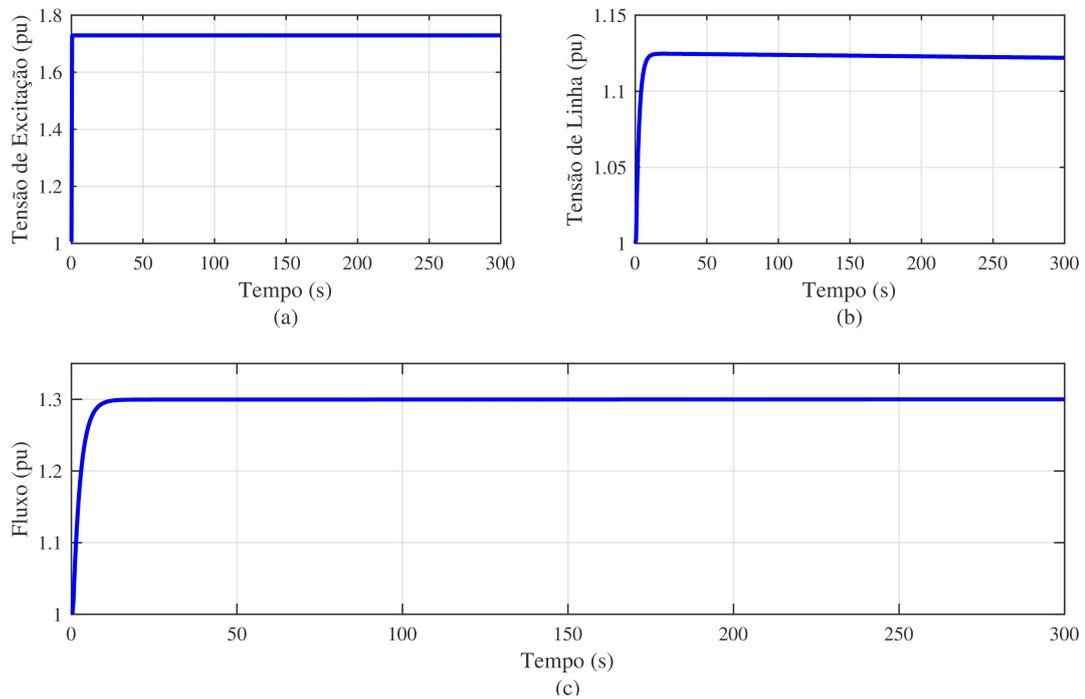


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.2 Caso 2: sobre-excitação de 30%

Neste caso, são apresentados os resultados obtidos para uma sobre-excitação de 30% (Figura 13c). Para isso, o GS foi exposto a uma tensão de excitação de 1,729 p.u. (Figura 13a) no instante de $t=0,5$ s, a qual se mantém por 300 s na máquina, assim resultando em uma tensão de linha de 1,1224 p.u. nos terminais da máquina (Figura 13b).

Figura 13 – Sinais do GS com sobre-excitação de 30%.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 9 demonstra os resultados obtidos para a atuação de cada metodologia de estimação de frequência associada à função 24, na ocorrência de uma sobre-excitação de 30%. Nessa situação, destaca-se o método MM, pois o relé apresentou instante de atuação muito próximo ao instante de atuação ideal, atuando 0,0146 s atrasado em relação a instante ideal. Os demais parâmetros analisados também apresentaram valores muito próximos aos ideais, sendo que o relé foi sensibilizado 0,0011 s antes em relação ao tempo ideal, de maneira que seu tempo de atuação apresentou uma diferença de 0,0356 s em relação ao tempo de atuação ideal. Já a relação V/Hz para este estimador apresenta uma menor relação, com um erro de 0,0039% em relação a razão ideal. Também, vale destacar a atuação dos métodos PLL, MPH e MPB, que apresentam parâmetros com valores muito próximo aos valores ideais.

Do contrário, mais uma vez os métodos DPSZ, ASSP, CAN, ANB, JAC e MAC não são eficientes em proteger o GS contra uma sobre-excitação de 30%, sendo que o método MAC apresenta a maior diferença no instante de atuação quando comparado com o instante de atuação ideal. Para esse estimador o relé atuou 5,5219 s antes do instante de atuação ideal. Já o método ASSP foi considerado totalmente impróprio para esta situação, pois faz com que o relé atue 1,1417 s atrasado, quando comparado com o tempo de atuação ideal, isto significa que o relé demoraria mais de 30 ms em relação ao tempo ideal para enviar sinal de desligamento ao GS, podendo assim causar sérios danos á respectiva máquina.

Ainda, destaca-se que o ASSP também apresenta elevadas diferenças em todos os

parâmetros analisados, sendo que para esse método o relé foi sensibilizado 42,4719 s após o instante de sensibilização ideal, de forma que sua atuação ocorre 42,0484 s antes do tempo de atuação ideal. Por fim, ressalta-se que a resposta da função 24 associada ao ASSP apresenta uma diferença de 19,0959% na relação V/Hz, no instante de atuação do relé.

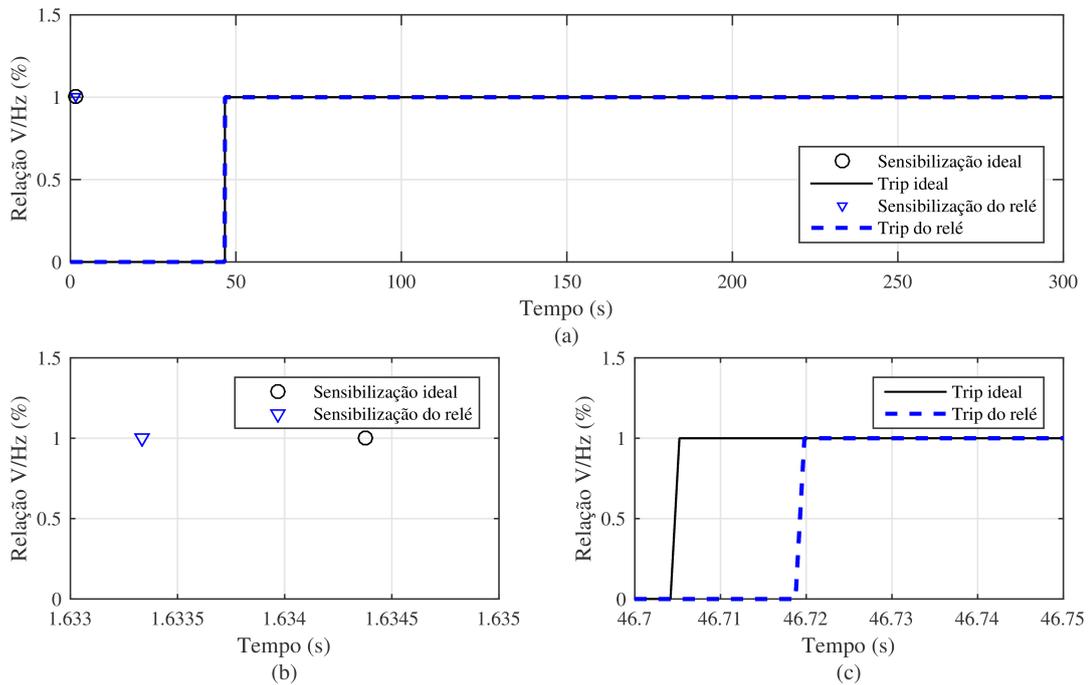
Tabela 9 – Resultados para sobre-excitação de 30%.

Método	Instante Sensibilização [s]	Tempo Estimado Atuação [s]	Instante Atuação [s]	Relação V/Hz Atuação [%]
IDEAL	1,6344	45,0484	46,7052	116,4004
DPSZ	1,6344	44,7914	46,426	116,4283
ASSP	44,1062	3	47,8469	135,4953
PLL	1,6344	45,1008	46,7354	116,3947
MM	1,6333	45,084	46,7198	116,3965
MPH	1,6344	45,0905	46,726	116,3958
MPB	1,6344	45,0902	46,726	116,3958
CAN	1,6344	44,4719	46,1312	116,4633
ANB	1,6125	43,0687	44,6885	116,6199
JAC	1,6344	44,5146	46,1573	116,4586
MAC	1,6323	39,4939	41,1833	117,0433
Método	Δ Instante Sensibilização [s]	Δ Tempo Estimado Atuação [s]	Δ Instante Atuação [s]	Δ Relação V/Hz Atuação [%]
IDEAL	-	-	-	-
DPSZ	0	-0,257	-0,2792	0,0279
ASSP	42,4718	-42,0484	1,1417	19,0949
PLL	0	0,0524	0,0299	-0,0057
MM	-0,0011	0,0356	0,0146	-0,0039
MPH	0	0,0421	0,0208	-0,0046
MPB	0	0,0418	0,0208	-0,0046
CAN	0	-0,5765	-0,574	0,0629
ANB	-0,0219	-1,9797	-2,0167	0,2195
JAC	0	-0,5338	-0,5479	0,0582
MAC	-0,0021	-5,5545	-5,5219	0,6429

Fonte: Elaborado pelo autor.

A atuação da função 24 associada ao estimador MM pode ser observada na Figura 14, onde em “a” são mostradas as respostas ideal e obtida com auxílio do respectivo estimador. Nessa Figura, é possível ver o instante de atuação, assim como, o instante de sensibilização. Porém, para uma melhor visualização, as Figuras 14b e 14c apresentam uma ampliação da Figura 14a, onde pode-se notar as diferenças nos respectivos instantes de tempo. Já em 14b, verifica-se que o relé é sensibilizado antes do tempo ideal, mas que atua 0,0146 s após o tempo ideal.

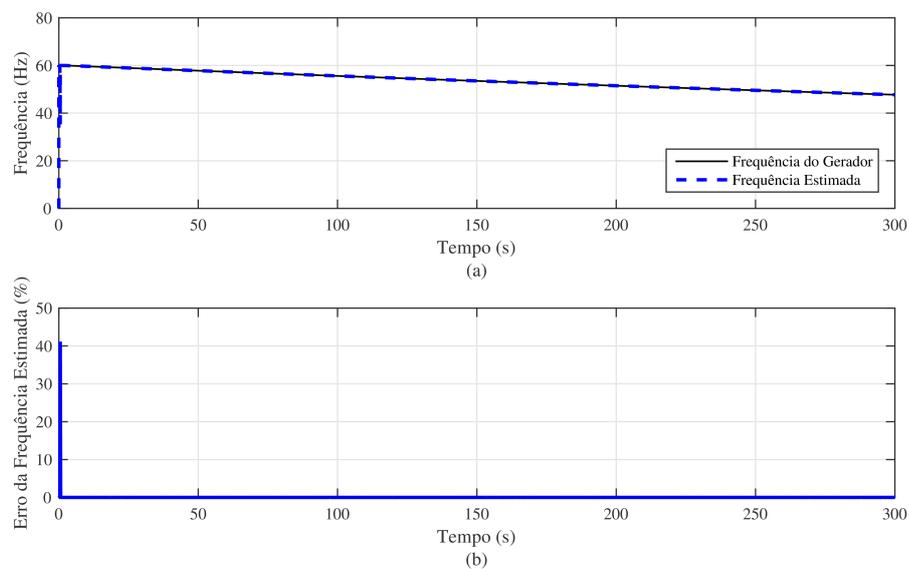
Figura 14 – Atuação do relé com MM para 30%.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O estimador de frequência MM, neste caso, apresentou grande eficiência e precisão ao estimar a frequência (Figura 15a), fato que contribuiu diretamente para a boa atuação função 24 do relé. Na Figura 15b, é visível que seu erro relativo quando comparado a frequência de referência é praticamente nulo.

Figura 15 – Atuação do estimador de frequência MM para 30%.

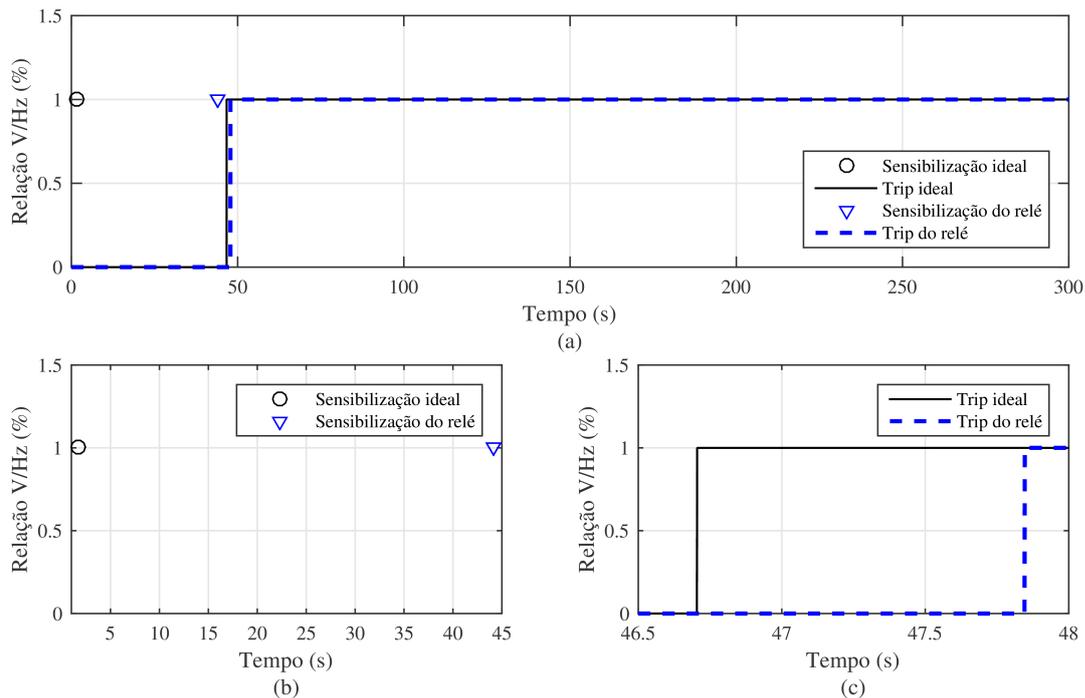


Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda, a Figura 14 demonstra a atuação da função 24 do relé utilizando o método

ASSP, o qual não apresenta um bom desempenho em determinar a relação V/Hz do GS. Na Figura 16a, já é possível perceber que o instante do trip do relé ocorreu após o instante do trip ideal, assim como sua sensibilização. Na Figura 16b é possível observar de melhor forma a diferença entre os instantes de sensibilização ideal e conseguido pela função 24 associada ao ASSP, a qual foi de 42,4718 s, causando assim um atraso no seu instante de atuação, cerca de 1 s de atraso em relação ao tempo ideal (Figura 16c), o que representa grande risco de danos ao GS.

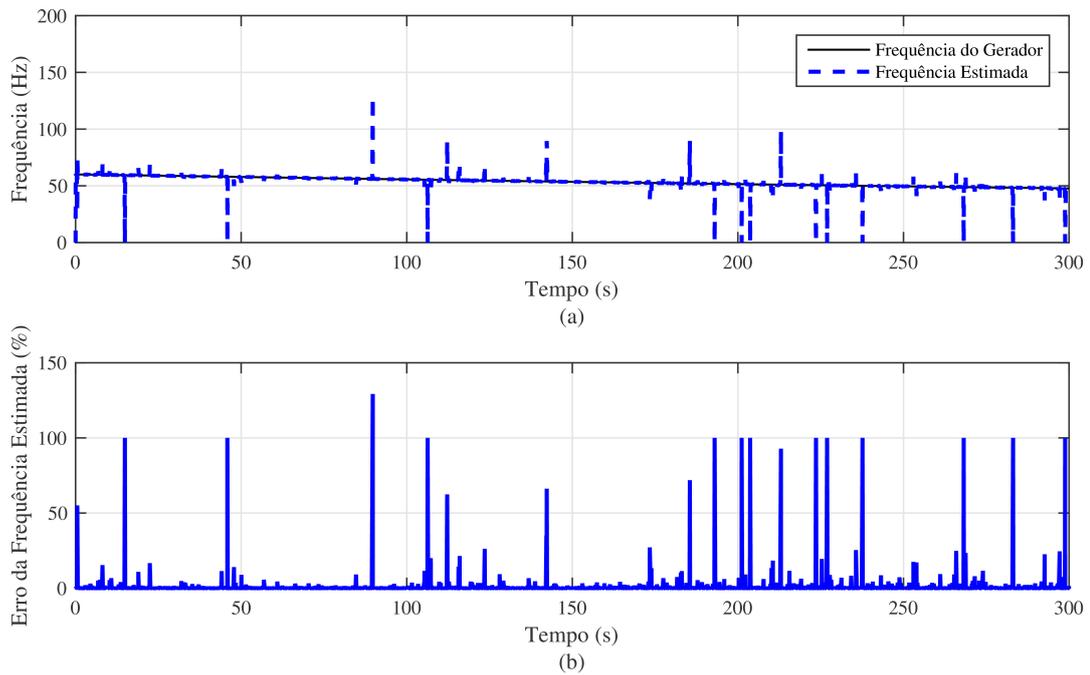
Figura 16 – Atuação do relé com ASSP para 30%.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A atuação do relé 24 com ASSP está diretamente ligada a atuação do estimador de frequência. Como pode-se ver na Figura 17a, o método ASSP é ineficiente em rastrear a frequência quando submetido a uma condição de sobre-excitação de 30%. Assim, na Figura 17b, é possível observar seu erro relativo da estimação de frequência a partir do ASSP para esse caso, quando comparada com a frequência de referência.

Figura 17 – Atuação do estimador de frequência ASSP para 30%.

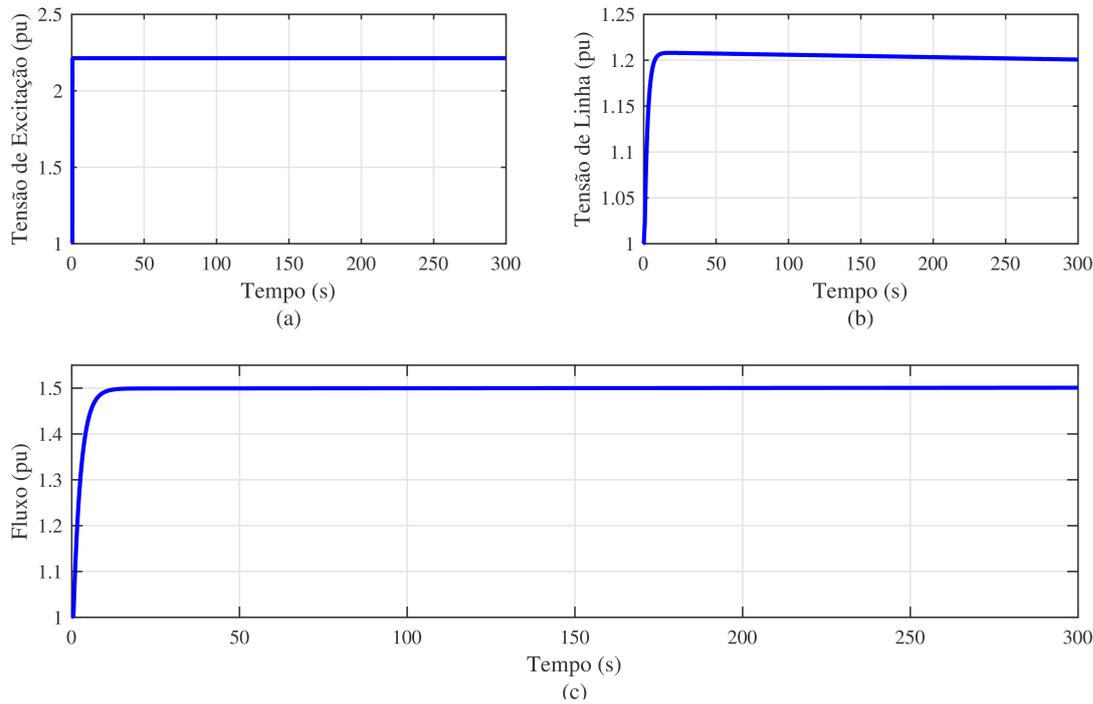


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.3 Caso 3: sobre-excitação de 50%

Nessa situação, o GS encontra-se com um sobre fluxo de 50%, como pode ser visto na Figura 18c. Para isso, o GS foi exposto a tensão de excitação de 2,213 p.u. (Figura 18a), no instante de tempo de 0,5 s, a qual se mantém por um período de 300 s, gerando assim uma tensão de linha de 1,2077 p.u. nos terminais da máquina, a qual pode ser observada pela Figura 18b.

Figura 18 – Sinais do GS com sobre-excitação de 50%.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o caso de uma sobre-excitação de 50%, os resultados obtidos são apresentados na Tabela 10, onde os métodos DPSZ, PLL, MM, MPH e MPB, quando aplicados na função 24 do relé, apresentam um bom desempenho, com parâmetros muito próximos aos valores ideais. Porém, destaca-se o desempenho conseguido a partir da associação com o método MM, a qual, mais uma vez, apresentou os melhores resultados. Isso pode ser melhor observado na Figura 19a, a qual mostra que seu instante de atuação ocorre 1 ms antes do instante de atuação ideal (Figura 19c). Ressalta-se ainda que o relé é sensibilizado 2 ms antes do instante ideal (Figura 19b), atuando com uma diferença de tempo de 1,46 ms quando comparado ao tempo ideal de atuação. Já a respectiva resposta para a relação V/Hz demonstra uma diferença de 0,0055% em relação a ideal.

Além disso, destaca-se que os métodos ASSP, CAN, ANB, JAC e MAC foram novamente classificados como ineficientes para esta função, devido ao fato de não apresentarem um bom desempenho ao estimar a frequência nesta situação. Dessa forma, destaca-se que a associação a função 24 ao método ASSP apresenta os piores índices de desempenho, o que pode ser observado através da Figura 20a. Para essa associação, a atuação ocorre 3,7927 s (Figura 20c) antes do instante de atuação ideal, sendo que relé foi sensibilizado com um atraso de 3,9094 s, quando comparado com o instante de sensibilização ideal (Figura 20b). Já a diferença entre os tempos de atuação ideal e obtido foi de 9,4331 s. Além disso, a diferença máxima entre a relações V/Hz calculada e ideal foi de 6,4249%.

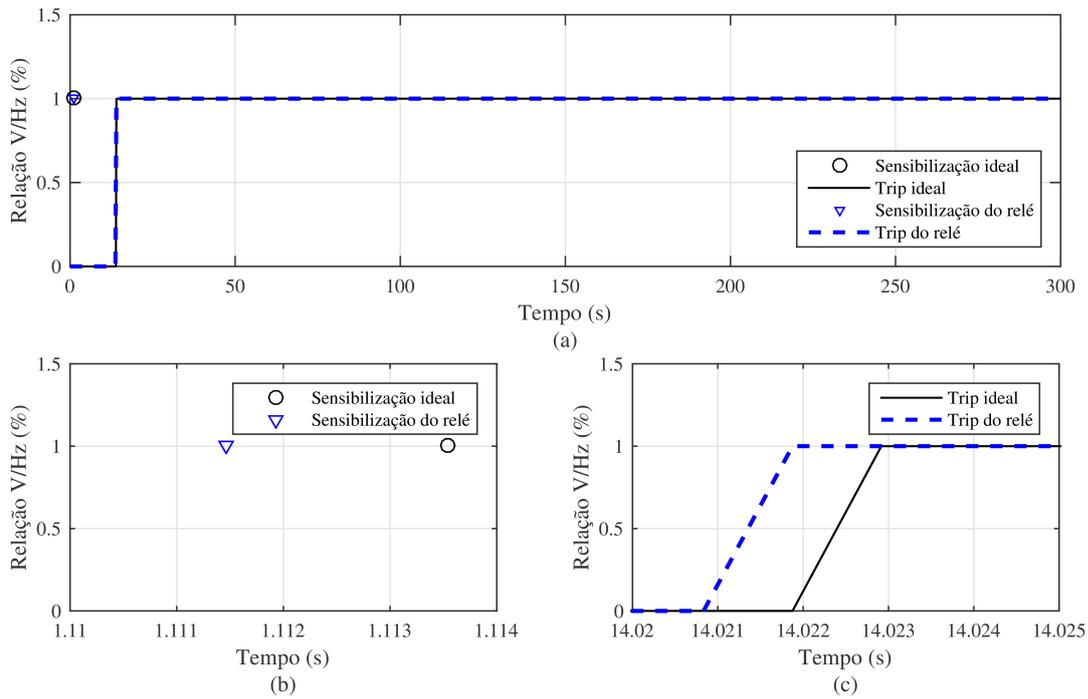
Tabela 10 – Resultados para sobre-excitação de 50%.

Método	Instante Sensibilização [s]	Tempo Estimado Atuação [s]	Instante Atuação [s]	Relação V/Hz Atuação [%]
IDEAL	1,1135	12,8953	14,0229	122,512
DPSZ	1,1125	12,8958	14,0094	122,512
ASSP	5,0229	3,4622	10,2302	128,937
PLL	1,1125	12,9158	14,0292	122,504
MM	1,1115	12,9099	14,0219	122,507
MPH	1,1125	12,9125	14,025	122,506
MPB	1,1125	12,9124	14,025	122,506
CAN	1,1125	12,8198	13,9427	122,541
ANB	1,1021	11,9886	13,0938	122,868
JAC	1,1125	12,8266	13,9427	122,538
MAC	1,1125	12,0525	13,1656	122,842
Método	Δ Instante Sensibilização [s]	Δ Tempo Estimado Atuação [s]	Δ Instante Atuação [s]	Δ Relação V/Hz Atuação [%]
IDEAL	-	-	-	-
DPSZ	-0,001	0,0005	-0,0135	-0,0002
ASSP	3,9094	-9,4331	-3,7927	6,4249
PLL	-0,001	0,0205	0,0063	-0,0077
MM	-0,002	0,0146	-0,001	-0,0055
MPH	-0,001	0,0172	0,0021	-0,0065
MPB	-0,001	0,0171	0,0021	-0,0064
CAN	-0,001	-0,0755	-0,0802	0,0287
ANB	-0,0114	-0,9067	-0,9291	0,3562
JAC	-0,001	-0,0687	-0,0802	0,0261
MAC	-0,001	-0,8428	-0,8573	0,3303

Fonte: Elaborado pelo autor.

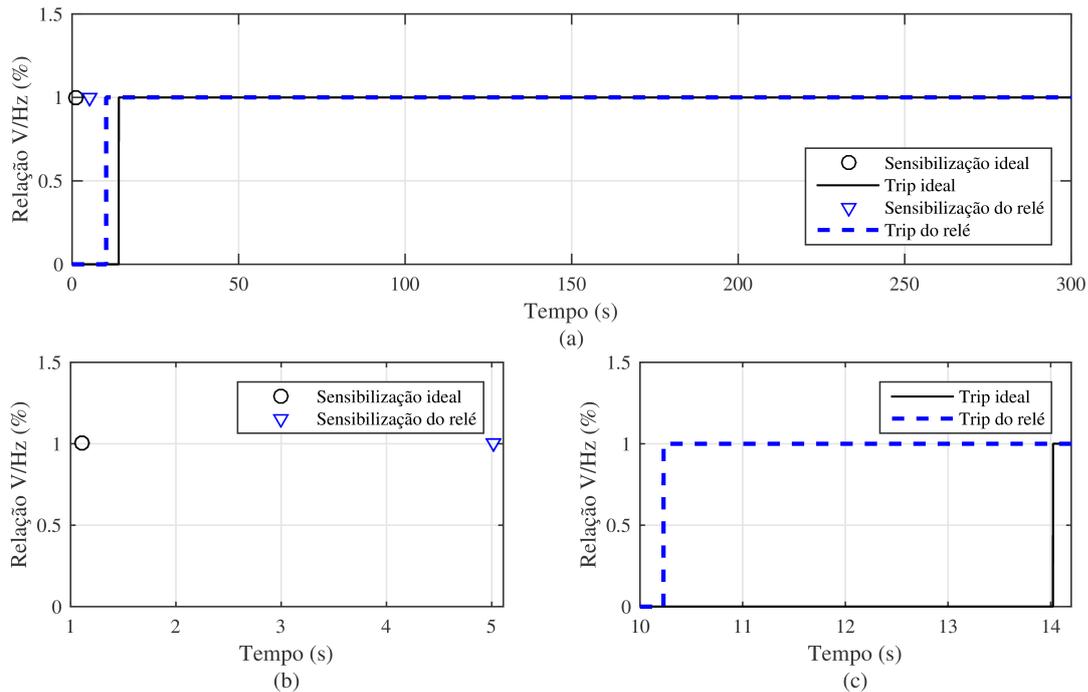
Cabe ressaltar que o bom funcionamento da função 24 depende da eficiência de cada método em estimar a frequência frente a uma condição de sobre-excitação. Sendo assim, como pode-se ver na Figura 21a, o MM estima a frequência com grande precisão, quando comparado com a frequência do GS (Figura 21b). Em contrapartida, o ASSP apresenta uma resposta com grandes oscilações, como pode ser visto na Figura 22a, tornando-se assim ineficiente frente a uma condição de sobre-excitação de 50%. O erro relativo da estimação de frequência segundo o ASSP, em relação a frequência do GS é mostrado na Figura 22b.

Figura 19 – Atuação do relé com MM para 50%.



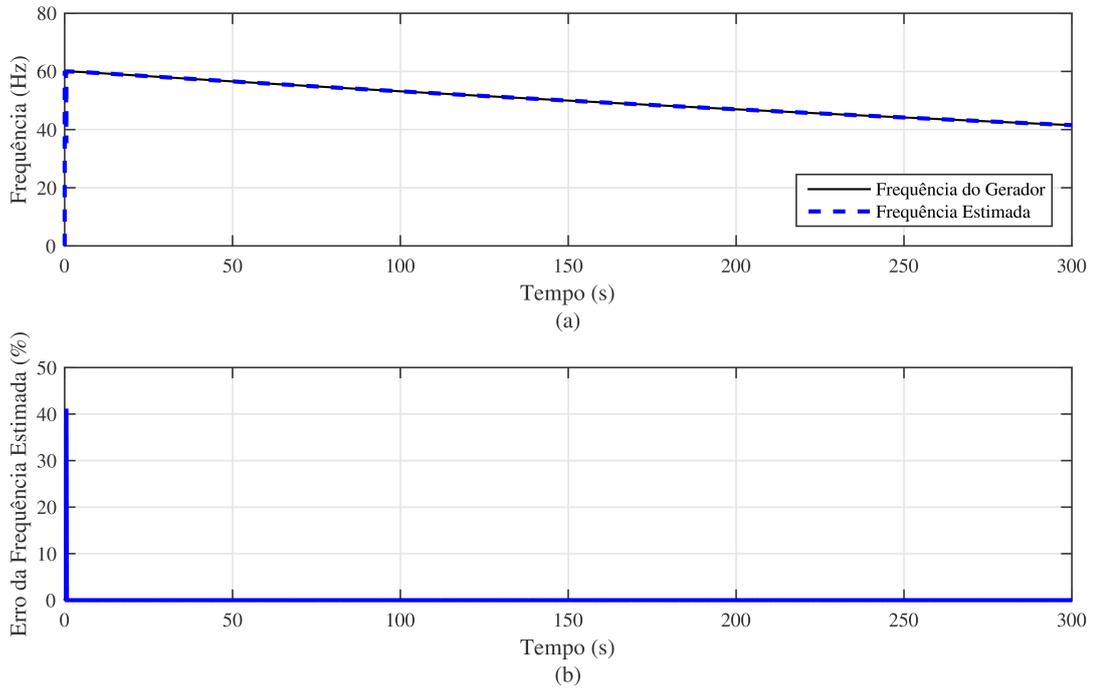
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20 – Atuação do relé com ASSP para 50%.



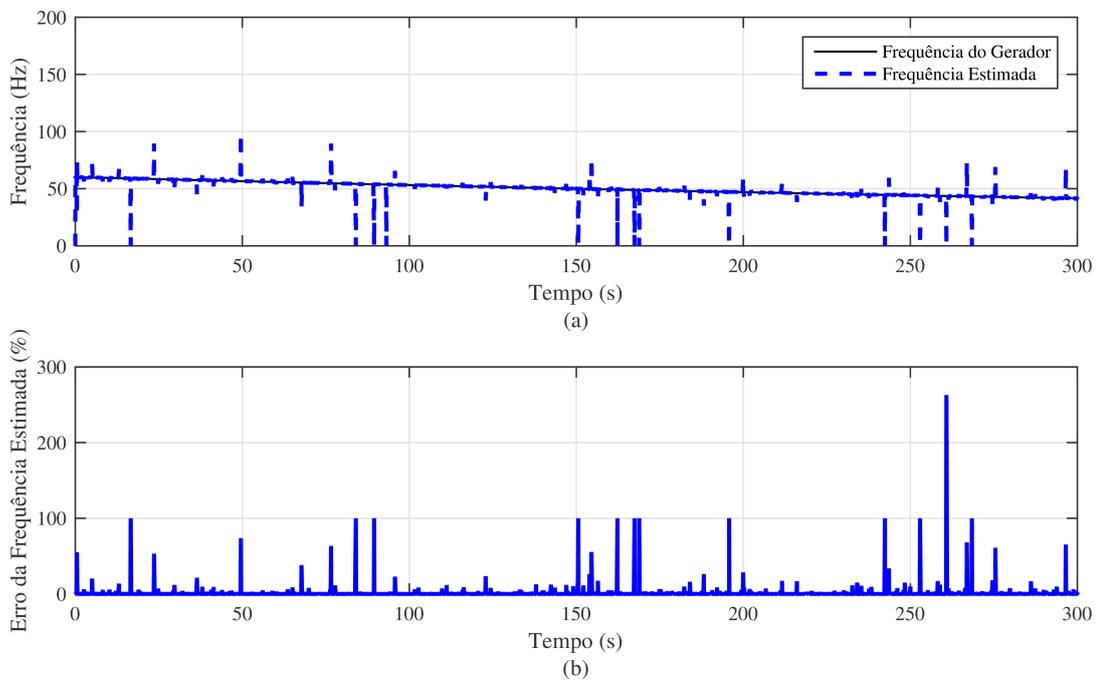
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 – Atuação do estimador de frequência MM para 50%.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 – Atuação do estimador de frequência ASSP para 50%.

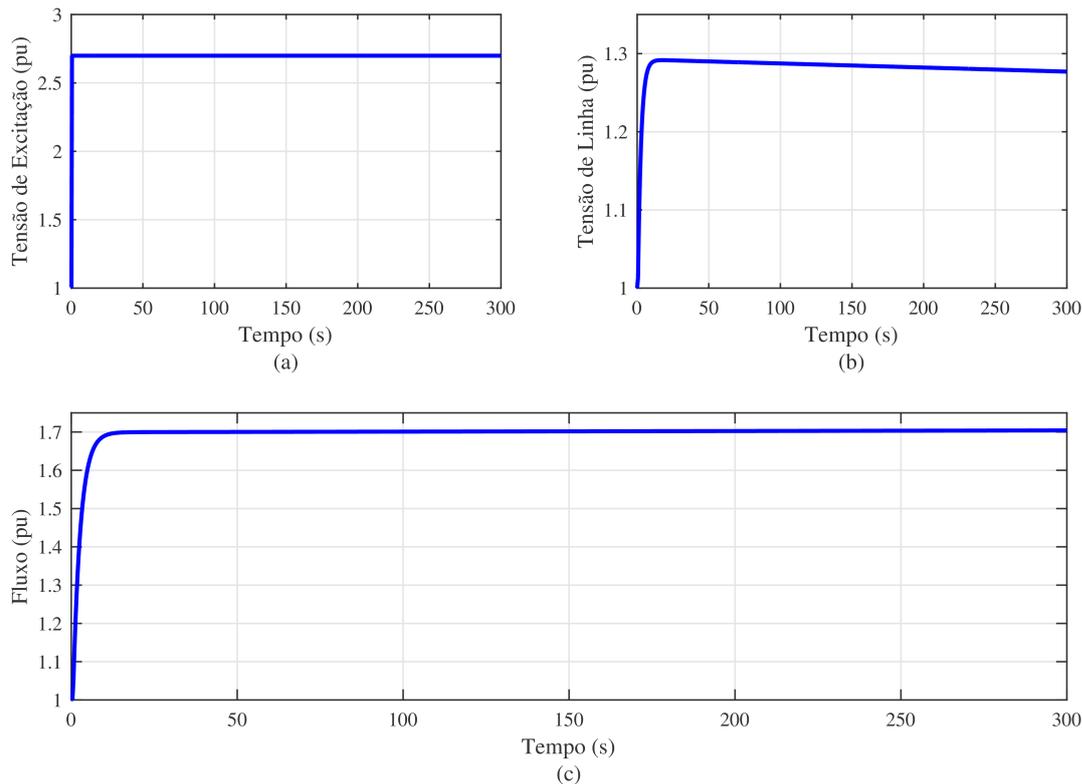


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.4 Caso 4: sobre-excitação de 70%

Nesse caso, o GS encontra-se com um sobre fluxo de 70% (Figura 23c), causado por uma tensão de excitação de 2,699 p.u. (Figura 23a), ocorrida no instante de tempo de 0,5 s, a qual permanece durante 300s, produzindo, assim, uma tensão de linha de 1,26454 p.u. nos terminais da máquina (Figura 23b).

Figura 23 – Sinais do GS com sobre-excitação de 70%.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 11 traz os resultados para cada estimador de frequência quando utilizados em associação à função 24 de uma relé, a qual, conforme mencionado anteriormente, tem por objetivo determinar condições de sobre-excitação. A partir da referida Tabela, pode-se observar que os métodos DPSZ, PLL, MM, MPH, MPB, CAN e JAC, apresentaram respostas muito próximas aos valores considerados ideais e, dessa forma, obtendo um bons desempenhos frente a condição de sobre-excitação de 70% no GS. Vale destacar que o MPB e MPH obtiveram resultados semelhantes aos ideais, porém, o MPH leva uma vantagem mínima no cálculo da relação V/Hz, apresentando uma diferença de 0,0016% no instante de atuação, quando comparado ao valor ideal. Associada ao MPH, a função 24 atuou com uma diferença de 1,6 ms em relação ao tempo ideal. Já o instante de sensibilização e de atuação obtidos foram iguais aos valores ideais, como pode ser visto na Figura 24.

Destaca-se ainda que, para esta situação, o estimador ANB além de ser ineficiente, foi considerado o pior, conforme pode ser visto na Figura 25a, pois apresentou a maior

diferença de tempo no instante de atuação, a qual fez o relé adiantar sua atuação em 17,92 ms (Figura 25c) quando comparado ao instante de atuação ideal, enquanto o mesmo é sensibilizado com um adiantamento de 9,4 ms (Figura 25b). Já o seu tempo de atuação e a relação V/Hz calculada apresentaram uma diferença de 17,91 ms e 0,1796% respectivamente, quando comparados aos valores ideais. Os métodos ASSP e MAC também foram classificados como ineficientes para essa situação.

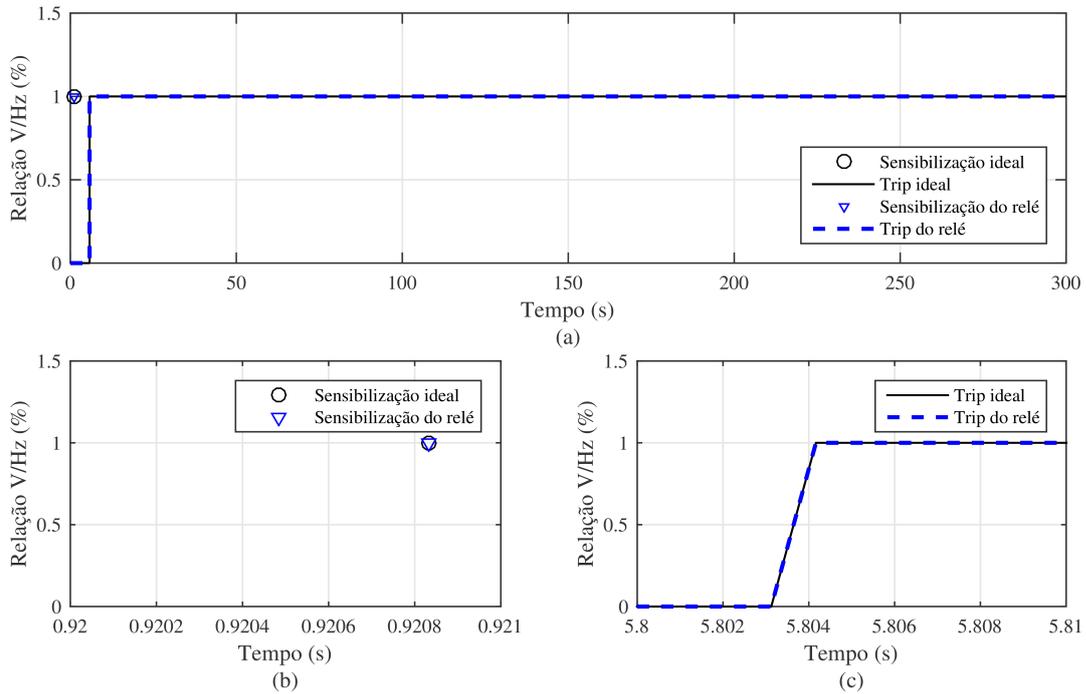
Tabela 11 – Resultados para sobre-excitação de 70%.

Método	Instante Sensibilização [s]	Tempo Estimado Atuação [s]	Instante Atuação [s]	Relação V/Hz Atuação [%]
IDEAL	0,92083	4,8812	5,8042	127,259
DPSZ	0,92083	4,8854	5,8083	127,255
ASSP	0,9583	4,6362	5,6937	127,51
PLL	0,92083	4,8839	5,8052	127,256
MM	0,91979	4,8821	5,8021	127,258
MPH	0,92083	4,8828	5,8042	127,257
MPB	0,92083	4,8828	5,8042	127,257
CAN	0,92083	4,8757	5,7969	127,264
ANB	0,91146	4,7051	5,625	127,438
JAC	0,92083	4,878	5,8031	127,262
MAC	0,92083	4,7979	5,7208	127,343
Método	Δ Instante Sensibilização [s]	Δ Tempo Estimado Atuação [s]	Δ Instante Atuação [s]	Δ Relação V/Hz Atuação [%]
IDEAL	-	-	-	-
DPSZ	0	0,0042	0,0041	-0,0042
ASSP	0,0375	-0,245	-0,1105	0,2517
PLL	0	0,0027	0,001	-0,0026
MM	-0,001	0,0009	-0,0021	-0,0009
MPH	0	0,0016	0	-0,0016
MPB	0	0,0016	0	-0,0017
CAN	0	-0,0055	-0,0073	0,0056
ANB	-0,0094	-0,1761	-0,1792	0,1796
JAC	0	-0,0032	-0,0011	0,0032
MAC	0	-0,0833	-0,0834	0,0842

Fonte: Elaborado pelo autor.

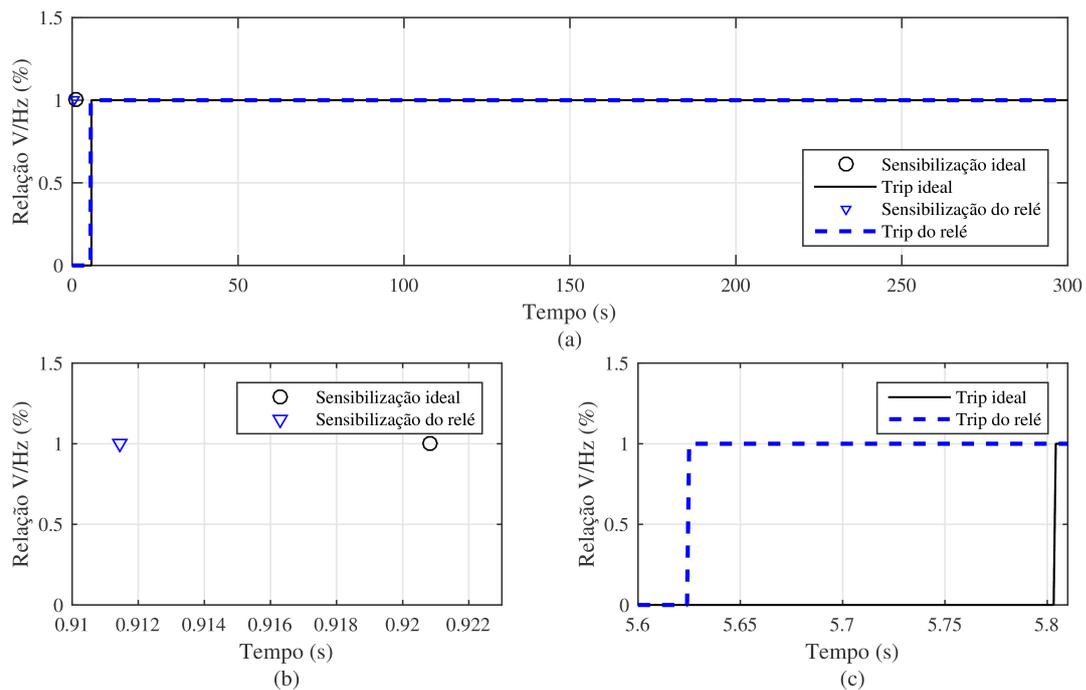
Conforme já mencionado, a eficiência da função 24 é diretamente ligada a sua precisão do estimador de frequência. Assim, como se vê na Figura 26, o MPH estima a frequência com grande precisão quando o GS é submetido a condição de sobre-excitação de 70%, enquanto que o ANB apresenta uma resposta oscilatória, como visto na Figura 27a, assim prejudicando o desempenho da função 24 de um relé. Por fim, a Figura 27b, mostra o erro relativo da estimação de frequência segundo o método ANB.

Figura 24 – Atuação do relé com MPH para 70%.



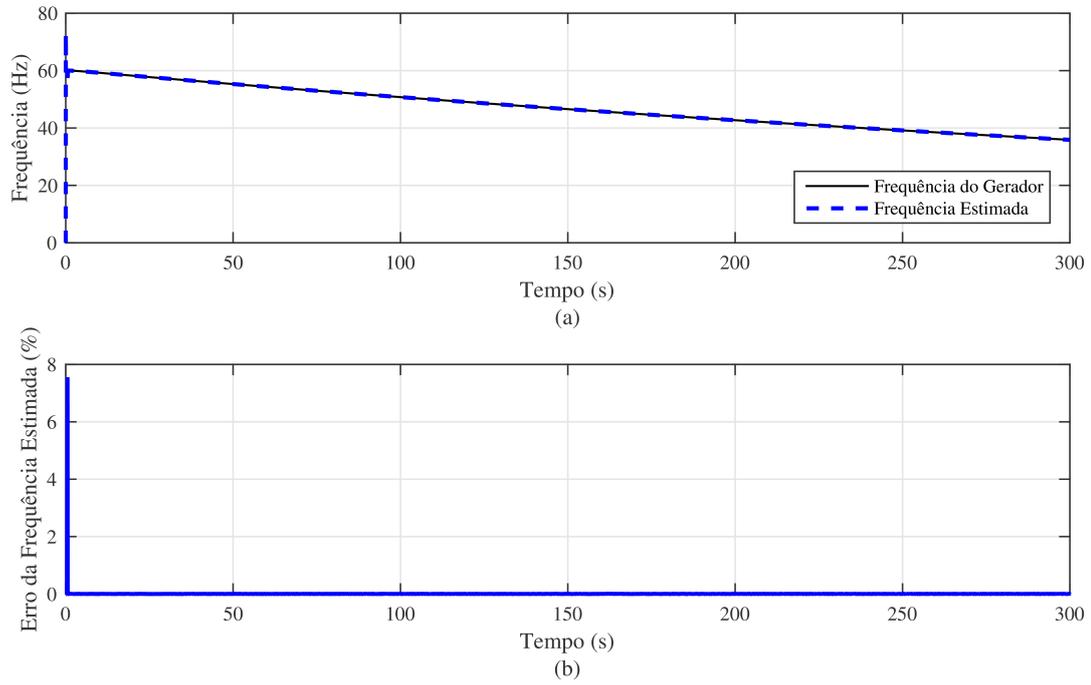
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25 – Atuação do relé com ANB para 70%.



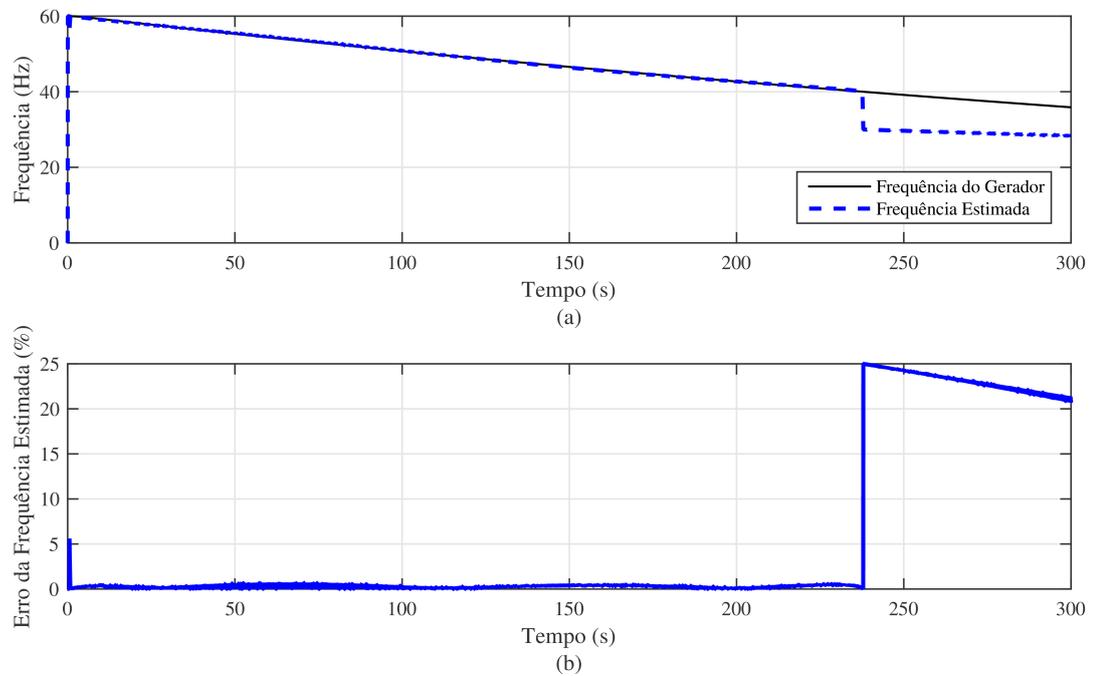
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 – Atuação do estimador de frequência MPH para 70%.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 – Atuação do estimador de frequência ANB para 70%.

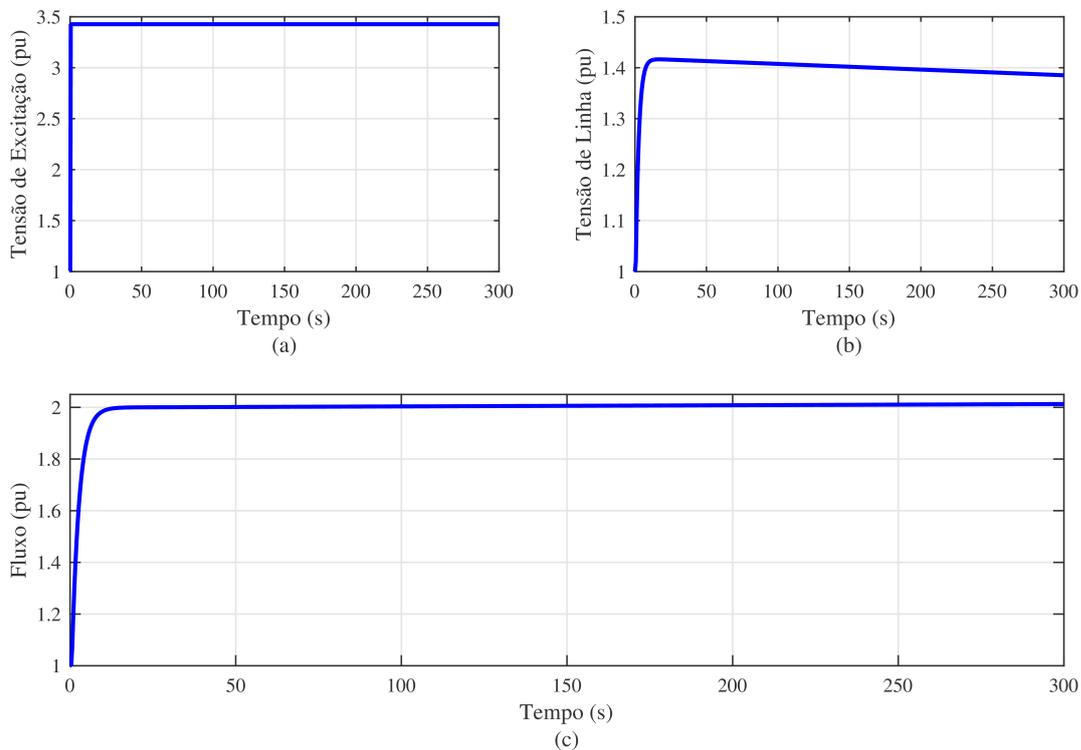


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.5 Caso 5: sobre-excitação de 100%

Neste caso, o GS está com um sobre fluxo de 100% (Figura 28c), que permanece por um período de 300s. Tal fato, ocorre devido ao GS estar sob ação de uma tensão excitação de 3,427 p.u. (Figura 28a), iniciada no instante de tempo de 0,5s, assim causando uma tensão de linha de 1,32226 p.u. nos terminais da máquina (Figura 28b).

Figura 28 – Sinais do GS com sobre-excitação de 100%.



Fonte: Elaborado pelo autor.

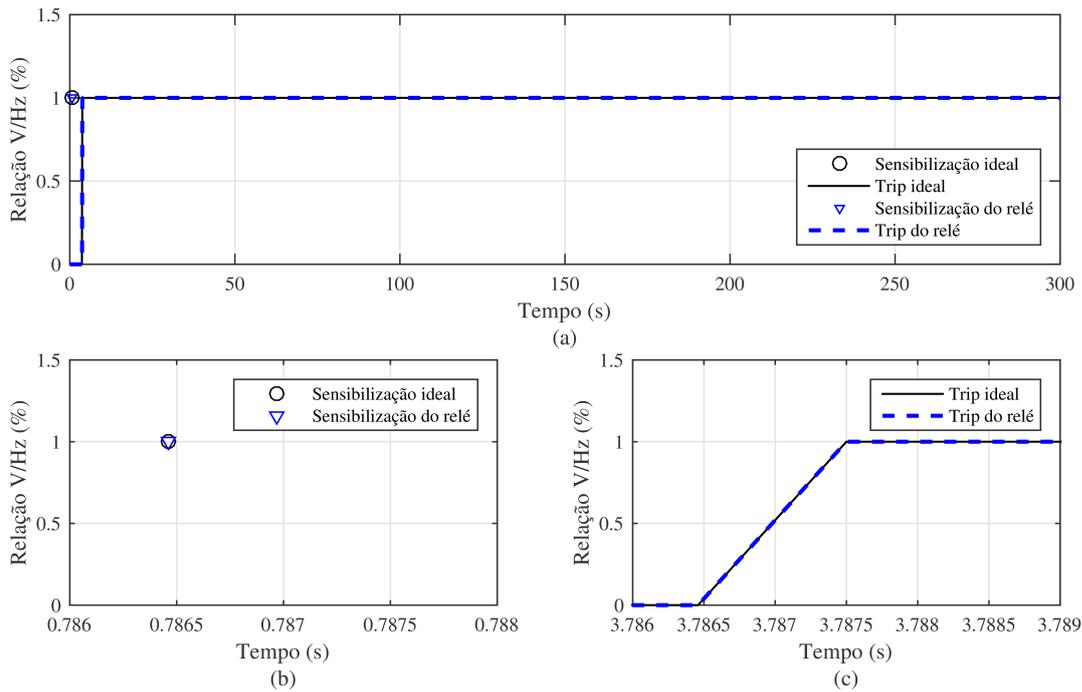
Para este caso, os resultados obtidos para cada associação a função 24 com os respectivos estimadores de frequência são apresentados na Tabela 12. Neste caso, que apenas o método ASSP foi considerado ineficiente em detectar essa sobre-excitação, pois o mesmo é sensibilizado e atua com um atraso de 38,5 ms, o que pode ser visto na Figura 30. Já o MM se destaca pela sua precisão em estimar a frequência, permitindo uma atuação coerente da função 24, qual é sensibilizada no instante ideal. O mesmo ocorre para o respectivo instante de atuação, bem como para tempo de atuação, sendo ambos iguais aos valores determinados como ideais para a ação do relé, conforme a Figura 29, apresentando apenas uma diferença de 0,0043% na relação V/Hz, no momento da atuação do relé. Os demais métodos analisados apresentaram um bom desempenho para esse caso

Tabela 12 – Resultados para sobre-excitação de 100%.

Método	Instante Sensibilização [s]	Tempo Estimado Atuação [s]	Instante Atuação [s]	Relação V/Hz Atuação [%]
IDEAL	0,78646	3	3,7875	132,588
DPSZ	0,7875	3	3,7885	132,584
ASSP	0,825	3	3,826	132,726
PLL	0,7875	3	3,7885	132,577
MM	0,78646	3	3,7875	132,584
MPH	0,7875	3	3,7885	132,583
MPB	0,7875	3	3,7885	132,583
CAN	0,7875	3	3,7885	132,584
ANB	0,77917	3	3,7802	132,793
JAC	0,7875	3	3,7885	132,584
MAC	0,7875	3	3,7885	132,665
Método	Δ Instante Sensibilização [s]	Δ Tempo Estimado Atuação [s]	Δ Instante Atuação [s]	Δ Relação V/Hz Atuação [%]
IDEAL	-	-	-	-
DPSZ	0,001	0	0,001	-0,0036
ASSP	0,0385	0	0,0385	0,1377
PLL	0,001	0	0,001	-0,0107
MM	0	0	0	-0,0043
MPH	0,001	0	0,001	-0,0048
MPB	0,001	0	0,001	-0,0048
CAN	0,001	0	0,001	-0,0041
ANB	-0,0073	0	-0,0073	0,2046
JAC	0,001	0	0,001	-0,0045
MAC	0,001	0	0,001	0,0772

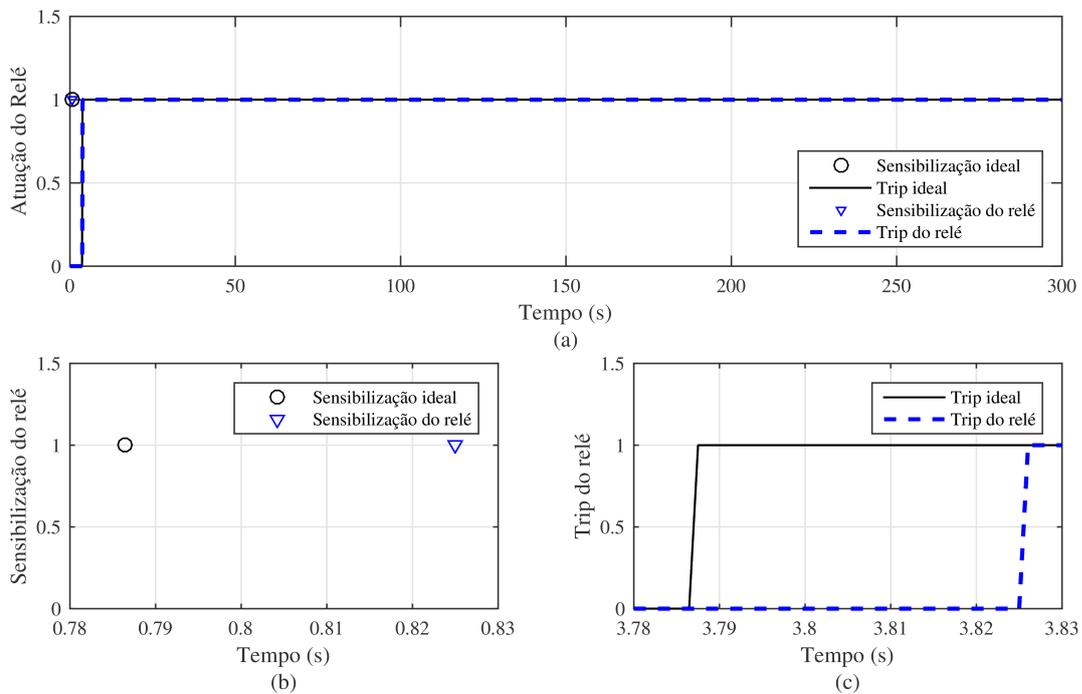
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29 – Atuação do relé com MM para 100%.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 – Atuação do relé com ASSP para 100%.

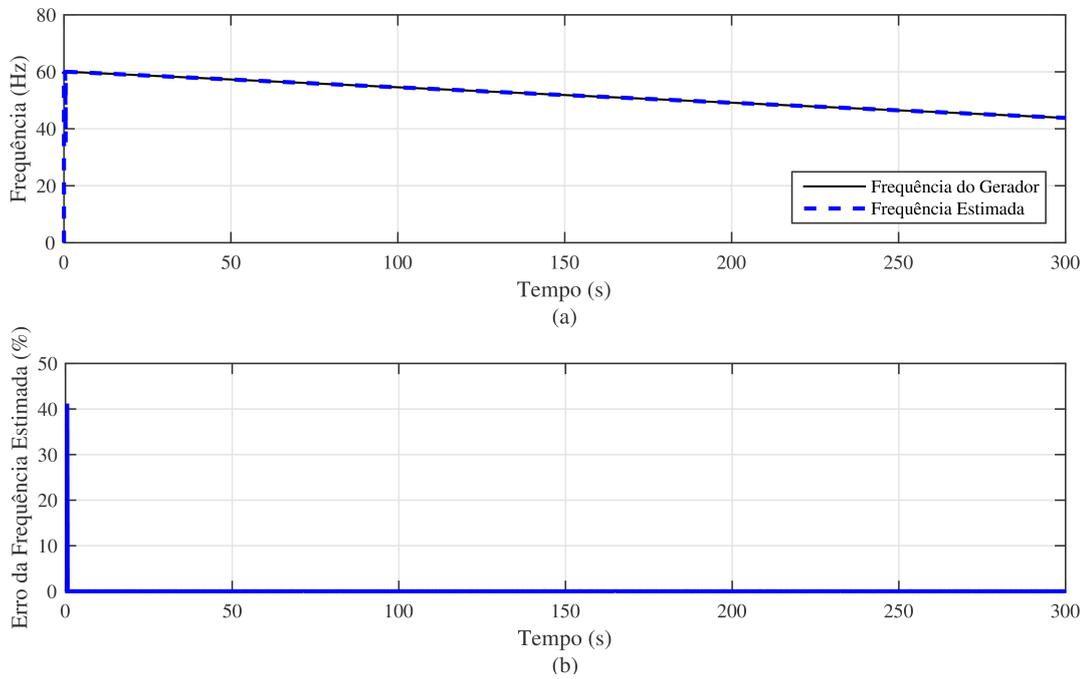


Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, ressalta-se a eficiência do MM (Figura 31), o qual apresenta um excelente desempenho em estimar o valor da frequência nessa condição de sobre-excitação, enquanto

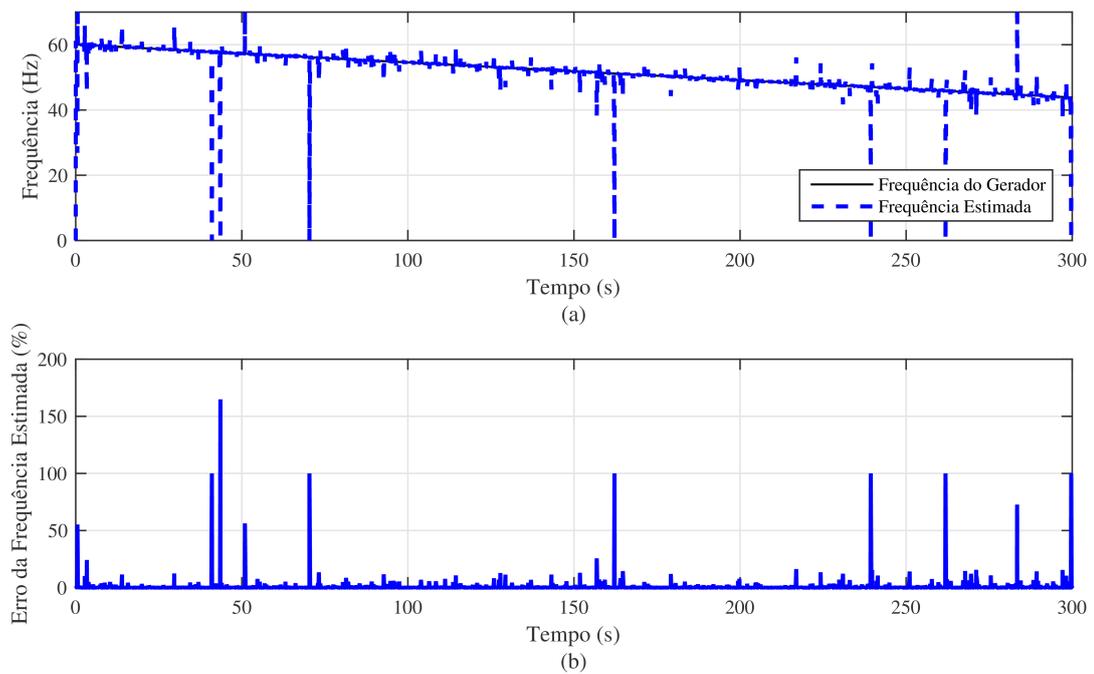
o ASSP (Figura 32) se faz ineficiente devido sua resposta oscilatória.

Figura 31 – Atuação do estimador de frequência MM para 100%.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 32 – Atuação do estimador de frequência ASSP para 100%.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 Avaliações

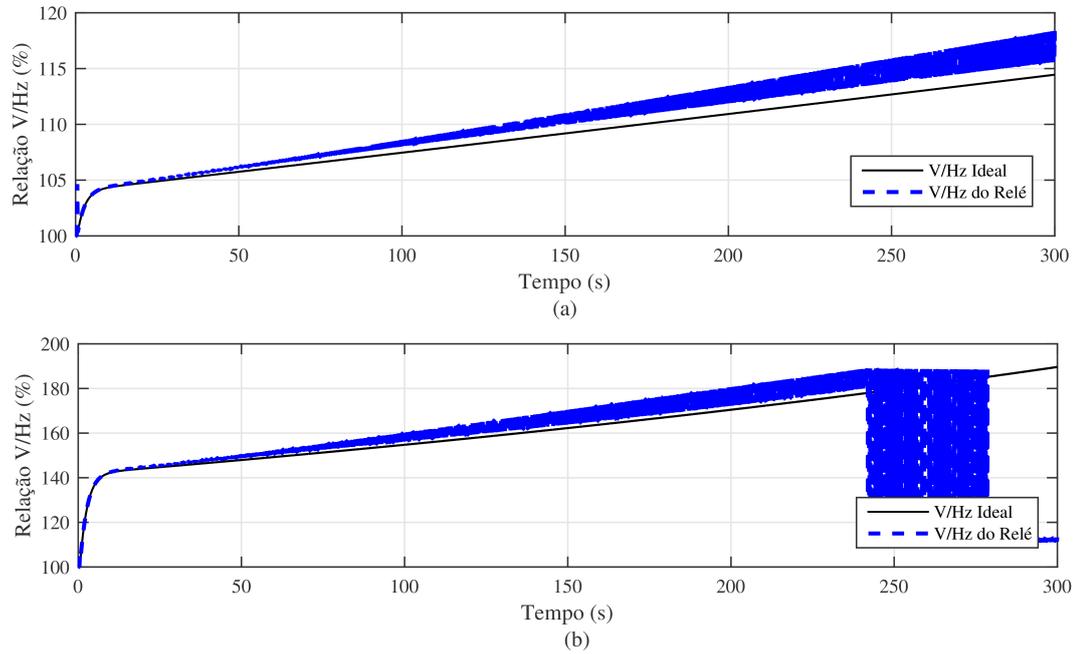
Como se pode notar, em todos os casos analisados, a eficiência do estimador de frequência tem influência direta no desempenho da função 24 de uma relé, a qual deve atuar em casos nos quais o GS opera em condições de sobre-excitação ou sobre fluxo. Das dez metodologias testadas, apenas quatro se fizeram eficientes em todos os casos testados, ou seja, estas apresentaram um bom desempenho em todos os níveis de sobre-excitação testados, sendo estas as associações da função 24 com os estimadores o PLL, MM, MPH e o MPB.

Porém, foi possível perceber que quanto maior o nível de sobre-excitação, melhor o desempenho de cada metodologia. Tal fato ocorre devido ao relé realizar a operação em menos tempo, ou seja, o estimador processa os sinais de tensão por um período mais curto, não operando no intervalo onde ocorrem grandes distorções nesses sinais, de forma que as chances de ocorrerem oscilações durante a estimativa diminuam.

Como um exemplo, cita-se a atuação do estimador MAC, a qual pode ser vista na Figura 33a, para uma sobre-excitação de 10%, atuação ideal do relé deve ocorrer em 183,5375 s, com uma relação de V/Hz de 110,3503%. Analisando a relação V/Hz estimada pelo relé, é possível notar que ele atinge uma relação superior aos 110% muito antes do instante de atuação ideal, fazendo com que o relé atue antes do instante ideal, operando no instante de tempo de 154,475 s. Este fato ocorre devido sua oscilação na estimativa permanecer superior aos 110% por mais de 30 s, o que faz com que os reguladores de tensão não consigam eliminá-la. Já no último caso, quando o GS se encontra 100% sobre-excitado, o relé utilizando o MAC apresenta uma boa eficiência, pois o instante de atuação ideal é de 3s, quando relação V/Hz atinge 132,5%, conforme a Figura 33b. Até o instante em que o relé atinge esse valor da relação V/Hz, ele está estimando a mesma sem apresentar oscilações, as quais surgem quando é alcançada uma relação V/Hz acima de 140%. Mesmo assim, o relé utilizando MAC acaba atuando 1 ms atrasado em relação ao tempo de atuação ideal.

Ainda, foi possível ver que em determinados casos o relé atua antes ou depois do tempo ideal de atuação. Assim sendo, destaca-se que a atuação adiantada do relé não irá causar danos ao GS. Porém, ele irá efetuar o desligamento do mesmo de maneira desnecessária, bem como pode haver um problema de descoordenação entre proteção do GS e seus controladores. O problema maior se dá quando o relé atua com atraso, o que pode causar sérios danos ao GS, podendo estes serem irreversíveis. Por isso, neste estudo, foi tolerada uma diferença no tempo de atuação de no máximo 30 ms, de modo a classificar a eficiência de cada associação, sendo esse índice considerado o principal para as análises descritas.

Figura 33 – Relação V/Hz do método MAC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, na Tabela 13, cada um dos métodos foi classificado de acordo com seu desempenho junto à função 24 do relé, onde a ordem é dada do melhor para o pior desempenho, de acordo com as regras de avaliação citadas anteriormente, onde as associações são consideradas como ineficientes quando apresentam uma diferença maior 30 ms no instante de atuação.

Tabela 13 – Classificação dos resultados para cada caso.

Método	10%	20%	30%	40%	50%
DPSZ	Ineficiente	Ineficiente	Ineficiente	Ineficiente	5
ASSP	Ineficiente	Ineficiente	Ineficiente	Ineficiente	Ineficiente
PLL	1	1	1	4	4
MM	4	4	4	1	1
MPH	3	3	3	3	3
MPB	2	2	2	2	2
CAN	Ineficiente	Ineficiente	Ineficiente	Ineficiente	Ineficiente
ANB	Ineficiente	Ineficiente	Ineficiente	Ineficiente	Ineficiente
JAC	Ineficiente	Ineficiente	Ineficiente	Ineficiente	Ineficiente
MAC	Ineficiente	Ineficiente	Ineficiente	Ineficiente	Ineficiente
Método	60%	70%	80%	90%	100%
DPSZ	5	6	4	4	2
ASSP	Ineficiente	Ineficiente	Ineficiente	10	Ineficiente
PLL	4	3	5	7	7
MM	3	5	1	1	1
MPH	2	1	3	3	6
MPB	1	2	2	2	5
CAN	7	7	6	6	3
ANB	Ineficiente	Ineficiente	Ineficiente	9	9
JAC	6	4	7	5	4
MAC	Ineficiente	Ineficiente	Ineficiente	8	8

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim a Tabela 14, mostra a classificação geral de cada metodologia testada, feita com base na classificação em cada caso testado. Os métodos MM e MPB apresentam uma classificação média igual, porém o MM é definido como o melhor método a ser utilizado devido apresentar um melhor desempenho quando a taxa de sobre-excitação apresenta níveis mais elevados, onde o GS está mais suscetível a danos.

Tabela 14 – Classificação geral das metodologias testadas.

Método	Resultado Geral
DPSZ	Ineficiente
ASSP	Ineficiente
PLL	4
MM	1
MPH	3
MPB	2
CAN	Ineficiente
ANB	Ineficiente
JAC	Ineficiente
MAC	Ineficiente

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6 Considerações Finais

O presente Capítulo apresentou os resultados obtidos para associação de 10 métodos destinados à estimação de frequência com a função 24 de proteção do GS, a qual monitora a razão V/Hz para sua atuação. Os casos analisados permitiram concluir que o desempenho do estimador de frequência influencia diretamente na performance do relé 24. Ainda, os testes permitiram concluir que o método MM pode ser considerado como o melhor a ser utilizado para este fim, mesmo que não apresente o melhor desempenho para todos os casos analisados. Os métodos PLL, MPB e MPH apresentam boas respostas propiciando bom desempenho para a função V/Hz . Entretanto, os métodos DPSZ, ASSP, CAN, ANB, JAC e MAC devido ao fato de apresentarem caráter oscilatório de sua resposta, o que, por sua vez, pode vir a provocar problemas de coordenação entre o dispositivo de proteção e os controladores da máquina, foram considerados ineficientes para condições de sobre-excitação. Por fim, destaca-se o fato de o estimador ASSP ter produzido a pior resposta para a função 24 em todos os casos analisados.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

O presente trabalho apresentou uma avaliação da proteção contra sobre-excitação de um GS, com objetivo de avaliar a influência que os estimadores de frequência apresentam, quando aplicados na lógica da função 24, a qual calcula a relação V/Hz. Tal influência foi testada computacionalmente.

A avaliação para cada metodologia é dada pela atuação do relé e seus erros relativos, permitindo assim avaliar qual metodologia melhor desempenha a tarefa de estimar a frequência para a função V/Hz. Os resultados atingidos demonstram que o desempenho da função 24 está diretamente ligado à resposta do estimador de frequência.

Os métodos foram classificados qualitativamente para cada nível de sobre-excitação, além de serem avaliados em termos do número de vezes em que se fizeram eficientes para a atuação a função 24. Assim, pôde-se perceber que quanto maior o nível de sobre-excitação, melhor torna-se o desempenho de cada associação entre função 24 e estimador de frequência.

Porém, cada associação apresentou diferentes respostas, sendo o PLL o método que propicia melhores desempenhos a atuação da função 24 em níveis mais baixos de sobre-excitação (até 30%), enquanto que o MM desempenha-se melhor para casos com níveis de sobre-excitação mais elevados. Já o MPB é o método que apresenta a maior regularidade de atuação em todos os casos. Entretanto, frente uma condição de 100% de sobre-excitação, seu desempenho não foi tão bom quando comparado com outros métodos, mesmo se fazendo eficiente para essa condição. Ainda, destaca-se que o MPH apresenta resultados semelhantes ao MPB. Os métodos baseados na TDF, CAN e JAC, tornam-se eficientes para sobre-excitações maiores ou iguais a 60%, enquanto que os estimadores ANB e MAC são eficientes somente nos casos em que o GS encontra-se sobre-excitado acima de 90%. Além disso, a associação da função 24 com o estimador DPSZ é eficiente para níveis de sobre-excitação do GS acima de 50%. Já o método ASSP foi o que apresentou o pior desempenho, sendo eficiente somente frente a condição em que o GS se encontrava com sobre-excitação de 90%.

Por fim, através dos critérios determinados para avaliação de cada associação, concluiu-se que apenas quatro delas demonstraram-se eficientes em todos os casos, sendo estas as que utilizaram os estimadores PLL, MM, MPB e MPH. Em contrapartida, nenhum dos estimadores de frequência analisados consolidou-se como tendo desempenho absoluto, devido a suas limitações, podendo ser imprecisos ou ineficiente frente a variação de sobre-excitação. Entretanto, dentre os casos analisados, pôde-se concluir que o estimador MM produz melhor desempenho para a função 24, uma vez que apresenta resposta menos oscilatória nos níveis mais altos de sobre-excitação, quando comparado com os

demais métodos testados. Ainda os métodos DPSZ, ASSP, CAN, ANB, JAC e MAC foram considerados ineficientes quando aplicados na função 24. Logo, os estimadores de frequência devem ser escolhidos de maneira a garantir o melhor desempenho do GS frente uma condição de sobre-excitação.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Testar diferentes metodologias para estimação de frequência propostas;
- Testar diferentes tipos de lógicas de relés digitais quais possuem a função ANSI 24;
- Testar com sistemas composto por dois ou mais GS; e
- Testar com desequilíbrio de cargas.

REFERÊNCIAS

- ABB, I. Substation automation and protection, ABB generator protection unit 2000R. **Issue B November**, 2002. Citado 6 vezes nas páginas 41, 55, 56, 93, 95 e 97.
- ABNT, N. 5460. sistemas elétricos de potência. **Associação Brasileira de Normas**, 1981. Citado na página 38.
- AGEE, J. C. et al. Recommended models for overexcitation limiting devices. **IEEE transactions on energy conversion**, IEEE, v. 10, n. 4, 1995. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 27.
- ALMEIDA, M. Apostila de proteção de sistemas elétricos. **Natal: UFRN**, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 39.
- ALVES, E. F.; SOUZA, M. A. de. Analysis of overexcitation relaying set up in synchronous generators for hydro power plants. In: IEEE. **Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA), 2010 IEEE/PES**. [S.l.], 2010. p. 298–303. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 27.
- ANÍBAL. An odd-dft based approach to time-scale expansion of audio signals. In: **Submitted to IEEE Trans, on Speech and Audio Proc**. [S.l.: s.n.], 1999. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 52.
- ANEEL, P. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional**. [S.l.]: Módulo - Qualidade da Energia Elétrica, revisão 9, 2018. Citado na página 34.
- BARBOSA, D. **Estimação da frequência em sistemas elétricos de potência através de filtragem adaptativa**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.
- BARBOSA, D. et al. Filtragem adaptativa para a estimação da frequência em sistemas elétricos de potência. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, SciELO Brasil, v. 19, n. 2, p. 226–234, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 34.
- CAMINHA, A. C. **Introdução à proteção dos sistemas elétricos**. [S.l.]: E. Blucher, 1977. Citado na página 35.
- CANDAN, Ç. Analysis and further improvement of fine resolution frequency estimation method from three dft samples. **IEEE Signal Processing Letters**, IEEE, v. 20, n. 9, p. 913–916, 2013. Citado na página 52.
- CARRASCO, R. V. **Avaliação do desempenho de esquemas de proteção de máquina síncrona contra perda de excitação**. Tese (Doutorado) — Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009. Citado na página 44.
- CIGRÉ B34.05, W. G. Results of CIGRÉ survey on the electrical protection of synchronous generator. **Colloquium, Johannesburg, South Africa**, 1997. Citado 3 vezes nas páginas 25, 27 e 38.
- COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. **Proteção digital de sistemas elétricos de potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes**. [S.l.]: SEL/EESC/USP, 2007. Citado na página 39.

- DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. Electrical power systems quality. **New York, NY: McGraw-Hill,** c1996, 1996. Citado na página 34.
- EBERLY, T.; SCHAEFER, R. Minimum/maximum excitation limiter performance goals for small generation. **IEEE Transactions on energy Conversion**, IEEE, v. 10, n. 4, p. 714–721, 1995. Citado na página 25.
- FERRER, H. J. A.; SCHWEITZER, E. O. **Modern Solutions for Protection, Control, and Monitoring of Electric Power Systems**. [S.l.]: Schweitzer Engineering Laboratories, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.
- FILHO, X. V. **Operação de Sistemas de Potência com controle automático de geração**. [S.l.]: Campus, 1984. Citado na página 35.
- FRIEDMAN, V. A zero crossing algorithm for the estimation of the frequency of a single sinusoid in white noise. **IEEE Transactions on Signal Processing**, IEEE, v. 42, n. 6, p. 1565–1569, 1994. Citado 3 vezes nas páginas 25, 28 e 45.
- GAIA, D. et al. Uma metodologia para avaliação da estabilidade transitória em tempo real de sistemas elétricos de potência usando árvore de decisão. **SEPOPE, Rio de Janeiro**, 2012. Citado na página 31.
- GAZEN, Y. N. et al. **Proteção Contra Perda de Excitação em Geradores Síncronos Através do Cálculo Contínuo da Impedância Aparente**. [S.l.]: CBA, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 55.
- GIRGIS, G. K.; VU, H. D. Verification of limiter performance in modern excitation control systems. **IEEE transactions on energy conversion**, IEEE, v. 10, n. 3, p. 538–542, 1995. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.
- HEWITSON, L.; BROWN, M.; BALAKRISHNAN, R. **Practical power system protection**. [S.l.]: Elsevier, 2004. Citado na página 32.
- IEEE C37.102, W. G. IEEE guide for ac generator protection. **IEEE Power System Relaying Committee Std. C**, v. 37, p. 1–177, 2006. Citado na página 38.
- JACOBSEN, E.; KOOTSOOKOS, P. Fast, accurate frequency estimators [dsp tips & tricks]. **IEEE Signal Processing Magazine**, IEEE, v. 24, n. 3, p. 123–125, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 25, 28 e 52.
- KEZUNOVIC, M.; ABUR, A. Merging the temporal and spatial aspects of data and information for improved power system monitoring applications. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 93, n. 11, p. 1909–1919, 2005. Citado na página 31.
- KINDERMANN, G. Proteção de sistemas elétricos de potência. **Florianópolis: UFSC**, 2008. Citado na página 44.
- KUNDUR, P.; BALU, N. J.; LAUBY, M. G. **Power system stability and control**. [S.l.]: McGraw-hill New York, 1994. v. 7. Citado na página 31.
- LOBOS, T.; REZMER, J. Real-time determination of power system frequency. **IEEE Transactions on Instrumentation and measurement**, IEEE, v. 46, n. 4, p. 877–881, 1997. Citado 5 vezes nas páginas 25, 28, 49, 50 e 51.

- MACLEOD, M. D. Fast nearly ml estimation of the parameters of real or complex single tones or resolved multiple tones. **IEEE Transactions on Signal processing**, IEEE, v. 46, n. 1, p. 141–148, 1998. Citado 3 vezes nas páginas 25, 28 e 51.
- MANDIM, A. C. C. **Estudo e parametrização das principais proteções elétricas de geradores e transformadores de grupo de uma central hidroelétrica**. Tese (Doutorado) — Instituto Politécnico do Porto. Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2013. Citado na página 35.
- MARDEGAN, C. **Proteção e seletividade em sistemas elétricos industriais**. São Paulo: **Atitude Editorial**, 2012. Citado na página 42.
- MELSINGER, M.; LINDERS, J.; STRANNE, G. An overexcitation relay with inverse time characteristics. **Protective Relaying Committee**, Electric Council of New England, 1983. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 27.
- MOZINA, C. J.; GARDELL, J. Ieee tutorial on the protection of synchronous generators. **IEEE Power Engineering Society, IEEE**, v. 95, p. 1–78, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 27, 36, 37 e 43.
- PAIVA, R. B.; SILVEIRA, P. M. da. Análise da coordenação estática e dinâmica entre os limitadores do regulador de tensão e as proteções de máquinas síncronas. XXIV SNTPEE SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Curitiba, Brasil, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 28.
- PRADHAN, A.; ROUTRAY, A.; BASAK, A. Power system frequency estimation using least mean square technique. **IEEE transactions on power delivery**, IEEE, v. 20, n. 3, p. 1812–1816, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 28.
- REIMERT, D. **Protective relaying for power generation systems**. [S.l.]: CRC press, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 27.
- SANDERSON, J. V. H. Ieee recommended practice for protection and co-ordination of industrial and commercial power systems. **Power Engineering Journal**, IET, v. 3, n. 2, p. 70–70, 1989. Citado na página 39.
- SANTOS, E. D. et al. Power system frequency estimation using morphological prediction of clarke components. **Electric Power Systems Research**, Elsevier, v. 122, p. 208–217, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 25, 29 e 48.
- SANTOS, E. M. d. **Compensação das formas de onda distorcidas pela saturação de transformadores de corrente com auxílio da estimação de frequência**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 48.
- SCHEIDER, E. **Electrical network protection sepam digital protection relays**. **Catalogue**, 2013. Citado na página 41.
- SITHAMPARANATHAN, K. Digital-pll assisted frequency estimation with improved error variance. In: IEEE. **IEEE GLOBECOM 2008-2008 IEEE Global Telecommunications Conference**. [S.l.], 2008. p. 1–5. Citado na página 47.

SORRENTINO, E.; CARVALHO, R. Performance of three algorithms for frequency measurement under transient conditions. **Electric Power Systems Research**, Elsevier, v. 80, n. 10, p. 1191–1196, 2010. Citado 4 vezes nas páginas 25, 28, 45 e 46.

STALTER, M. C. **Análise de estimadores de frequência sob condições transitórias**. [S.l.]: Trabalho de Conclusão de Curso. UNIPAMPA - Universidade Federal do Pampa. Alegrete, Brasil, 2014. Citado 5 vezes nas páginas 25, 29, 33, 39 e 42.

STALTER, M. C.; SANTOS, E. M.; SALDANHA, J. J. A. Avaliação do desempenho de metodologias para estimação de frequência aplicadas em sistemas elétricos de potência. XVII Encontro Regional Iberoamericano do Cigré - ERIAC. Cidade de Leste, Paraguai, 2017. Citado na página 32.

STALTER, M. C. et al. Uma avaliação crítica do desempenho de metodologias para estimação de frequência sob condições transitórias. XII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica - CBQEE. Curitiba, Brasil, 2017. Citado na página 35.

STALTER, M. C. et al. Estimadores de frequência: uma abordagem aplicada a sistemas elétricos de potência. 12th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE. Argentina, Mar del Plata, 2017. Citado na página 32.

UDAETA, M.; GRIMONI, J.; GALVÃO, L. C. R. Iniciação a conceitos de sistemas energéticos para o desenvolvimento limpo. **São Paulo, EDUSP**, 2004. Citado na página 34.

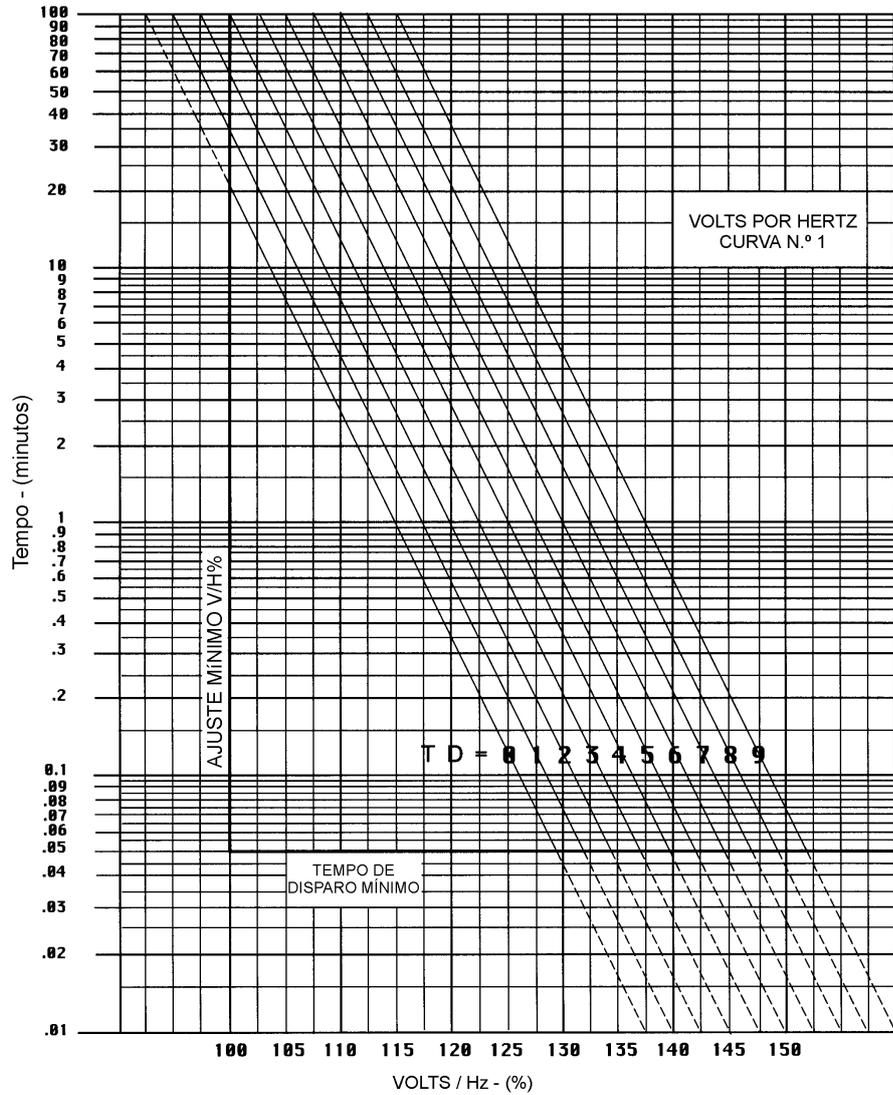
WARRINGTON, A. v. C. **Protective Relays: Their Theory and Practice Volume One**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.

WON, P. C.; HYEON, B. W. Over-excitation relaying for digital generator protection using the 765 kv power system modeling data in korea. **Energy Procedia**, Elsevier, v. 14, p. 824–830, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 28.

WU, D. et al. Research on transmission lines multi current differential relay scheme. In: **IEEE. 2007 42nd International Universities Power Engineering Conference**. [S.l.], 2007. p. 300–304. Citado na página 49.

Anexos

ANEXO A – CURVA VOLTS/HERTZ 1



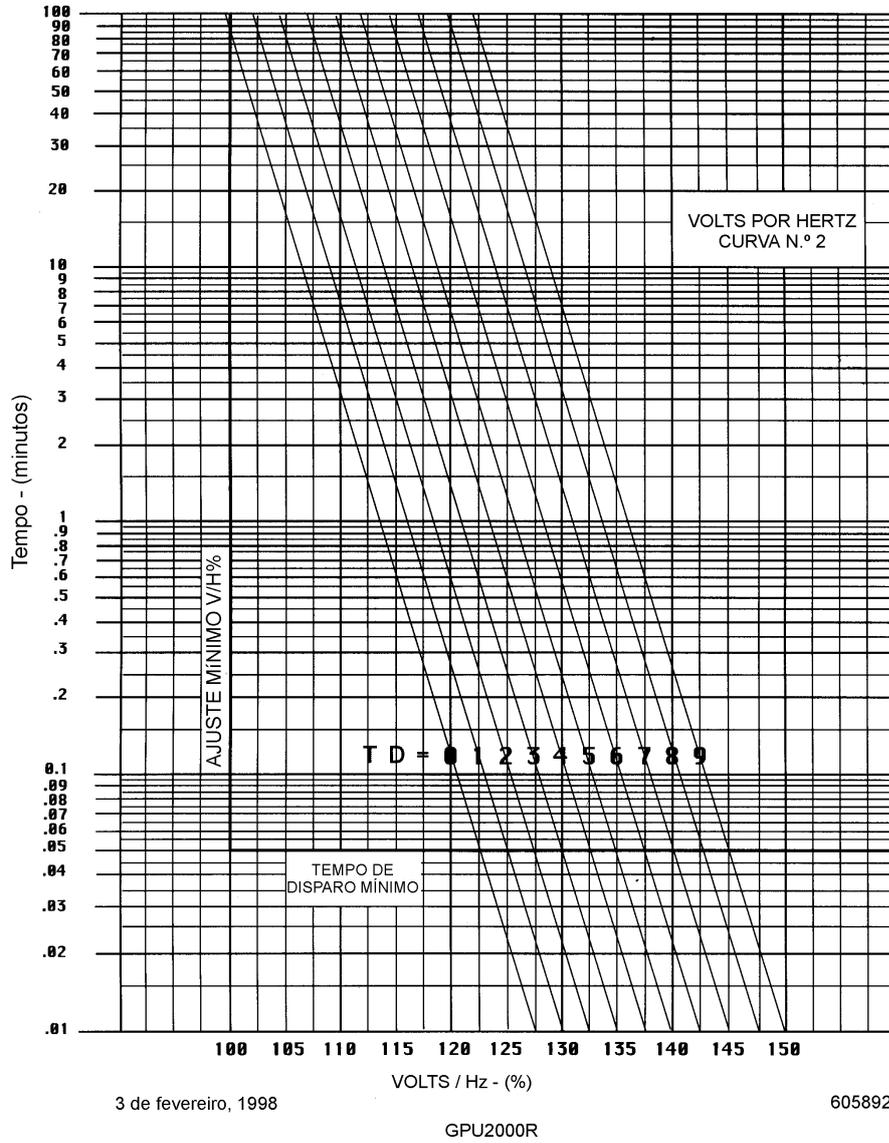
3 de fevereiro, 1998

605891

GPU2000R

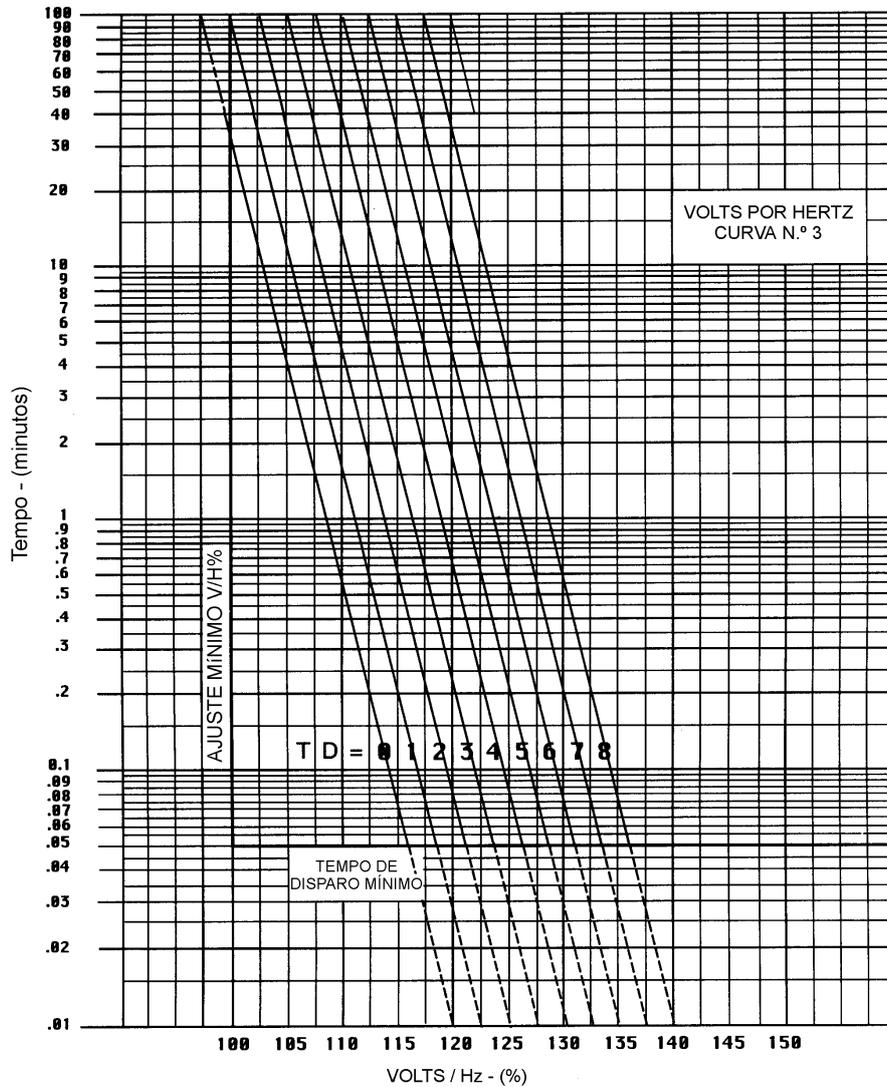
Fonte: ABB (2002).

ANEXO B – CURVA VOLTS/HERTZ 2



Fonte: ABB (2002).

ANEXO C – CURVA VOLTS/HERTZ 3



3 de fevereiro, 1998

GPU2000R

605893

Fonte: ABB (2002).