
Detecção de ilhamento baseada em curvas de desempenho
utilizando cálculo do fluxo de potência entre o sistema elétrico e a
região ilhada

Lucas Lima Ribeiro

Detecção de ilhamento baseada em curvas de desempenho
utilizando cálculo do fluxo de potência entre o sistema elétrico e a
região ilhada

Lucas Lima Ribeiro

Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Jr.

Monografia apresentada ao Escola de Engenharia de São
Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título
de Engenheiro Eletricista.

USP – São Carlos
Dezembro de 2017

R634d Ribeiro, Lucas Lima
 Detecção de ilhamento baseada em curvas de desempenho
 utilizando cálculo do fluxo de potência entre o sistema
 elétrico e a região ilhada / Lucas Lima Ribeiro;
 orientador José Carlos de Melo Vieira Jr.. - São Carlos
 - SP, 2017.

76 p.

Monografia (Engenheiro - Eletricista) - Escola de
Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo,
2017.

1. Geração distribuída. Gerador Síncrono. Curva de
desempenho. Relés de frequência. Curva de Carga. Rede
de distribuição. Fluxo de carga. I. Jr., José Carlos de
Melo Vieira, orient. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Lucas Lima Ribeiro

Título: "Detecção de ilhamento baseada em curvas de desempenho utilizando cálculo do fluxo de potência entre o sistema elétrico e a região ilhada"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 01/12/2017,

com NOTA 7,5 (sete, cinco), pela Comissão Julgadora:

Prof. Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior - Orientador - SEL/EESC/USP

Prof. Associado Mário Oleskovicz - SEL/EESC/USP

Dr. Eduardo Werley Silva dos Ângelos - Pós-doutorando/SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino

RESUMO

RIBEIRO, L. L.. **Detecção de ilhamento baseada em curvas de desempenho utilizando cálculo do fluxo de potência entre o sistema elétrico e a região ilhada.** 2017. 76 f. Monografia (Engenheiro Eletricista) – Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), São Carlos – SP.

Este trabalho desenvolveu e expandiu os conceitos de curva de desempenho e sua aplicabilidade na detecção de sistemas de distribuição ilhados. O trajeto do trabalho está baseado no estudo de conceitos chave, apresentação e validação da metodologia, simulação e geração das curvas de desempenho em um sistema padrão, simulação e validação em um sistema modelado de uma rede de distribuição e apresentação dos resultados e conhecimentos adquiridos. O objetivo principal do trabalho, é desenvolver um modelo de determinação do ajuste mais adequado do relé para um período do dia, utilizando curvas de desempenho na determinação do tempo de detecção. Os resultados foram de acordo com esperado, gerando uma base para aplicação do modelo em redes de distribuição que utilizam geradores síncronos distribuídos. Todos os conceitos foram aplicados em simulações de uma rede de distribuição compatível com a realidade, chegando a conclusões da alta aplicabilidade em sistemas de distribuição que apresentem geração distribuída através de geradores síncronos.

Palavras-chave: Geração distribuída. Gerador Síncrono. Curva de desempenho. Relés de frequência. Curva de Carga. Rede de distribuição. Fluxo de carga.

ABSTRACT

RIBEIRO, L. L.. **Detecção de ilhamento baseada em curvas de desempenho utilizando cálculo do fluxo de potência entre o sistema elétrico e a região ilhada.** 2017. 76 f. Monografia (Engenheiro Eletricista) – Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), São Carlos – SP.

This work tried to develop and expand the concept of performance curves in the detection of islanding in power distribution systems. The work was based on the study of the concepts, presentation and validation of the methodology, simulation to build the performance curves their application to a power distribution network. The main objective of this work was to develop a model to selected the most proper relay's settings according to the period of the day, by applying the performance curves and the power imbalance at the point of disconnection. The results were obtained as expected, showing the the method is suitable to be applied in distribution systems with synchronous-based distributed generation.

Key-words: Distributed generation. Synchronous Generator. Performance curves. Frequency relays. Load Curve. Distribution network. Load flow.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de blocos do sistema elétrico de distribuição.	24
Figura 2 – Bloco do gerador.	28
Figura 3 – Diagrama de controle para a excitatriz (JR, 2006).	30
Figura 4 – Modelo T de transformadores.	32
Figura 5 – Perfis de carga para a rede de distribuição estudada.	34
Figura 6 – Curva de carga total no sistema.	35
Figura 7 – Modelo de simulação do relé	37
Figura 8 – Curvas de desempenho obtidas com variação de cargas	42
Figura 9 – Curvas de desempenho obtidas variando a potência gerada	43
Figura 10 – Curva de desempenho de referência variando as cargas	44
Figura 11 – Curva de desempenho de referência virando a potência gerada	45
Figura 12 – Aproximação polinomial para a variação do coeficiente de potência das cargas.	46
Figura 13 – Aproximação polinomial para a variação da potência de referência.	46
Figura 14 – Curvas de desempenho obtidas variando as cargas para 1.000 pontos de simulação.	48
Figura 15 – Curvas de desempenho obtidas através da aproximação polinomial variando as cargas.	49
Figura 16 – Erro obtido ao utilizar a aproximação polinomial variando as cargas.	50
Figura 17 – Curvas de desempenho obtidas variando a potência gerada para 1000 pontos de simulação.	51
Figura 18 – Curvas de desempenho obtidas através da aproximação polinomial variando a potência gerada	52
Figura 19 – Erro obtido ao utilizar a aproximação polinomial variando a potência gerada	52
Figura 20 – Fluxograma de escolha entre as curvas de desempenho	53
Figura 21 – Simulação dos tempo de abertura utilizando a curva de desempenho construída variando a potência de geração	56
Figura 22 – Simulação dos tempos de abertura utilizando as curvas de desempenho obtidas com variação de carga.	57
Figura 23 – Fluxograma utilizando curvas de desempenho baseadas em cargas e potência gerada de maneira complementar.	59
Figura 24 – Tempos de abertura utilizando as curvas de desempenho baseadas na geração e cargas e trabalhando de maneira complementar	59

Figura 25 – Simulação dos tempo de abertura utilizando a simulação de um sistema simulado com curvas de cargas reais.	62
Figura 26 – Diferença entre as metodologias de curva de desempenho e simulação do sistema.	64
Figura 27 – Erro entre as metodologias em termos da diferença de tempo de detecção.	65
Figura 28 – Diferença entre as metodologias da curva de desempenho e simulação do sistema para 0,5 da geração máxima.	66
Figura 29 – Erro entre as metodologias em termos da diferença de tempo de detecção, para 0,5 da geração máxima.	66
Figura 30 – Diferença entre as metodologias da curva de desempenho e simulação do sistema, para 0,3 da geração máxima.	67
Figura 31 – Erro entre as metodologias em termos da diferença de tempo de detecção para 0,3 da geração máxima.	68

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.	11
1.1	Justificativas e objetivos	12
1.2	Organização do trabalho	13
2	DETECÇÃO DE ILHAMENTO.	17
2.1	Técnicas de detecção de ilhamento	17
2.1.1	<i>Técnicas remotas</i>	18
2.1.1.1	<i>Técnicas baseadas no sistema SCADA</i>	18
2.1.1.2	<i>Técnicas baseadas em sistemas PLCC</i>	18
2.1.1.3	<i>Redes de comunicação de dispositivos de proteção</i>	19
2.1.2	<i>Técnicas Locais</i>	19
2.1.2.1	<i>Técnicas locais passivas</i>	19
2.1.3	<i>Técnicas locais ativas</i>	21
3	SISTEMA ELÉTRICO NO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO.	23
3.1	Entrada do sistema de distribuição	25
3.2	Blocos de medição e chaves temporizadas	25
3.3	Bloco do gerador síncrono	26
3.4	Estrutura do gerador	26
3.5	Bloco regulador de tensão	29
3.5.1	<i>Excitatriz</i>	29
3.5.2	<i>Regulador de tensão</i>	30
3.6	Alimentadores	31
3.7	Transformadores	31
3.8	Cargas	32
3.9	Curvas de carga	33
3.9.1	<i>Obtenção das curvas de carga</i>	34
3.10	Modelo do relé de Sub e Sobrefrequência	35
4	MÉTODO DAS CURVAS DE DESEMPENHO.	39
4.1	Softwares e plataforma de simulação	40
4.2	Obtenção das curvas de desempenho via simulação	41
4.3	Construção de curvas de desempenho através de simulações de ilhamento	41

4.4	Construção de curvas de desempenho padrões	44
4.5	Aproximação polinomial aos resultados das curvas	45
4.6	Simulações do sistema baseadas em curvas de desempenho	47
4.7	Curvas de desempenho	47
4.7.1	<i>Curva de desempenho variando a carga do sistema</i>	47
4.7.2	<i>Curva de desempenho variando a potência gerada</i>	50
5	METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO DOS TEMPOS DE ABERTURA UTILIZANDO CURVAS DE DESEMPENHO.	55
5.1	Obtenção dos tempos de abertura utilizando curvas de desempenho obtidas com variação da potência de geração	55
5.2	Obtenção dos tempos de abertura utilizando curvas de desempenho obtidas com variação das cargas do sistema	56
6	SIMULAÇÕES PARA COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DE UM SISTEMA SIMULADO COM CURVAS DE CARGA REAIS.	61
6.1	Comparativo entre os tempos de abertura do sistema simulado com parâmetros reais e os obtidos via metodologia das curvas de desempenho	63
6.2	Análise comparativa entre as abordagens de obtenção do tempo de detecção	63
6.3	Fontes de erros na metodologia baseada em curvas de desempenho	69
6.3.1	<i>Cargas de impedância constante</i>	69
6.3.2	<i>Distribuição de tensão</i>	69
6.3.3	<i>Construção das curvas de desempenho</i>	69
6.3.4	<i>Utilização de aproximação polinomial</i>	70
7	CONCLUSÕES.	71
	REFERÊNCIAS	75

INTRODUÇÃO.

josecar\1

Com o avanço da demanda de energia elétrica nos últimos anos, tanto no Brasil, quanto no exterior, começou a se projetar uma nova fronteira de oferta e demanda para a geração de energia elétrica. Uma das novas estruturas idealizadas diz respeito ao crescente número de geradores de pequeno e médio porte ligados diretamente as redes de distribuição de energia; conhecido como conceito de geração distribuída (JR, 2006), (PITOMBO, 2010).

Alguns fatores corroboram para a expansão da geração distribuída em âmbito nacional, dentre eles a redução de barreiras legais dos órgãos regulatórios, a crescente demanda local de energia, e o desenvolvimento de novas tecnologias e oportunidades, possibilitando que novas áreas ligadas à geração distribuída, em especial utilizando geradores síncronos, sejam desenvolvidas.

No decorrer do processo de instalação da geração distribuída são necessários estudos complementares para avaliar o impacto nas redes de transmissão, subtransmissão, distribuição e nas cargas. Dados esses estudos, pode-se mensurar a verdadeira contribuição do sistema de geração distribuída, aliado aos sistemas de controle, instalação e localização de outros elementos já existentes na rede. Como é de se esperar, a inserção de um sistema de geração agregado a distribuição oferece diversos desafios técnicos.

Um ponto avaliado no processo de operação e instalação da geração distribuída são os requisitos de proteção e segurança operacional da rede. Um importante requisito das concessionárias e dos órgãos reguladores que os geradores distribuídos sejam desligados, em um curto período de tempo, caso ocorra ilhamento ou falta de fornecimento temporária por conta da rede de distribuição. Esta preocupação se deve a questões de segurança e judiciais que serão detalhadas no decorrer dos trabalhos (JR, 2006), (PITOMBO, 2010).

O conceito de operação em ilha só é possível advindo da geração distribuída em sistemas

isolados da rede principal. Este evento não intencional e altamente indesejado pelas empresas que operam na rede principal, pode causar sérias complicações na operação e manutenção das redes de distribuição, como apresentado nas referências (PITOMBO, 2010), (IEEE, 1992), (KRAUSE, 1986):

1. Perigos oferecidos aos operadores de manutenção da concessionária, ou até mesmo aos consumidores por conta da criação de áreas da rede onde não se tem conhecimento se estão energizadas e quais os riscos dessa energização.
2. Erros de comunicação e inteligência para o reestabelecimento do fornecimento, devido ao fato do gerador continuar alimentando o sistema ilhado, mesmo não tendo informações precisas sobre o mesmo.
3. Parâmetros de qualidade da energia oferecidos pelo gerador distribuído possivelmente podem estar fora dos requisitos mínimos requeridos pela concessionária de energia e órgãos reguladores, gerando problemas técnicos e judiciais dado que a concessionária é responsável legal pela rede.

Pelos motivos citados nos itens anteriores, entre outros, ocorre a exigência de desligamento do gerador. Nos processos atuais de detecção e desligamento das redes ilhadas, as concessionárias de energia utilizam relés baseados na mensuração dos parâmetros de tensão e frequência entre a ilha e a rede principal. A escolha de tensão e frequência nas medidas dos relés é justificada pela variação dinâmica dessas grandezas nos subsistemas ilhados, dependendo dos desbalanços de potência ativa e reativa. Considerando que quanto menor o desbalanço menores são as variações de frequência, a detecção de pequenos desbalanços é dificultada.

1.1 Justificativas e objetivos

Como apresentado na seção anterior, estão ocorrendo frentes concretas de expansão da geração distribuída nas redes elétricas de distribuição, necessitando de sistemas e técnicas de detecção de ilhamento que acompanhem esta tendência. Sendo um tópico muito abrangente e com enorme potencial para estudo e aperfeiçoamento, este trabalho irá contemplar problemas relacionados à detecção de ilhamento de geradores distribuídos baseados em máquinas síncronas, utilizando relés de frequência. Um exemplo desta situação é o fato da geração de energia de maneira distribuída em redes de distribuição apresentar boa parte de sua matriz baseada em geradores síncronos, e os relés baseados em frequência apresentarem grande utilização no mercado de energia atual.

Para o desenvolvimento do trabalho serão analisados relés baseados em frequência, especificamente na ocorrência de subfrequência ou sobrefrequência na rede ilhada. O estudo dos comportamentos que relacionam o desbalanço de potência ativa e a diferença de frequência entre

o sistema e a ilha, propiciam uma base para estudo de cargas variáveis no tempo e como estas se relacionam com os possíveis ajustes de um relé baseado em frequência.

É notável que o estudo apresentado no trabalho se utiliza dos conceitos de curvas de desempenho, que foram desenvolvidas no trabalho de apoio (JR, 2006). Os trabalhos (JR, 2006) e (PITOMBO, 2010) foram motivadores do desenvolvimento conceitual da detecção de ilhamento deste trabalho e como os estudos dos relés de frequência podem ser adaptados para a melhor performance e eficácia na detecção.

Por uma questão de proteção dos geradores distribuídos, estes não devem ser desligados instantaneamente sendo necessário que critérios básicos sejam seguidos. O PRODIST (Procedimento de distribuição de energia elétrica no sistema nacional), que gere o segmento (ANEEL, 2016), determina que o sistema deve operar normalmente entre 59,9 Hz e 60,1 Hz e que o relé deve atuar na faixa 59,5 e 60,5 Hz para o ajuste de 1 Hz do relé.

O objetivo principal do trabalho é validar a aplicabilidade das curvas de desempenho para a definição do ajuste do relé de frequência, graças a construção de uma curva de desempenho para cada ajuste do relé. A utilização das curvas individualizadas por ajuste permite determinar os tempos esperados de abertura e selecionar o mais indicado.

Um objetivo secundário do trabalho é a utilização da seletividade de ajustes no caso de simulação de uma rede de distribuição simulada com curvas de carga reais. Para isto, será utilizado um grupo de curvas de carga retiradas de um sistema de distribuição real na cidade de São Paulo, sendo estas apresentadas posteriormente no trabalho.

Após o cumprimento dos dois objetivos macros, o trabalho propõe entregar uma metodologia aplicável às redes de distribuição com geração distribuída que utilizam relés de frequência ajustáveis.

1.2 Organização do trabalho

Tendo apresentado as principais motivações para a execução do trabalho, esta seção têm o papel de organizar o trabalho e demonstrar sutilmente quais temas serão tratados e sua ordem.

- Capítulo 2: Detecção de ilhamento

Sendo o primeiro capítulo de conteúdo do trabalho após a apresentação e introdução dos objetivos, esse capítulo busca evidenciar quais técnicas já existem e são estudadas em relação a detecção de ilhamento. O foco desse capítulo é a justificativa para cada metodologia de detecção e os motivos pelos quais algumas técnicas são mais aplicáveis neste trabalho e outras não.

- Capítulo 3: Sistema elétrico no ambiente de simulação

Este capítulo irá focar no sistema elétrico modelado para utilização em todo o trabalho. O foco deste capítulo é na explicação de cada um dos elementos do sistema e como cada um destes desempenha um papel no ambiente de simulação que representa um sistema de distribuição.

Neste capítulo também estão presentes os conceitos de curva de carga, e como esta modalidade de descrição do consumo de uma rede de distribuição pode ser aplicada ao trabalho. O ponto de atenção desta etapa das cargas é a adaptação necessária para tornar as curvas de carga, em uma ferramenta que busca aproximar os conceitos deste trabalho ao mundo real, através das curvas de carga.

- **Capítulo 4: Método das curvas de desempenho**

Neste capítulo é apresentado o cerne do trabalho, as curvas de desempenho. São apresentadas teorias de base para esta metodologia e exemplos de sua aplicabilidade em outros trabalhos acadêmicos. Enfatiza-se neste capítulo a etapa de construção das curvas de desempenho, sendo que os resultados obtidos, influenciam diretamente no desenvolvimento dos capítulos posteriores.

A segunda etapa deste capítulo exemplifica a criação de curvas de desempenho padrão para aplicação no modelo final e como estas podem ser aproximadas através de funções polinomiais. Enfatiza-se nesta etapa a relação da aproximação polinomial e o estudo do erro inerente que este método acrescenta ao modelo.

- **Capítulo 5: Metodologia de determinação dos tempos de abertura utilizando curvas de desempenho**

Neste capítulo é compilado todo o ferramental até então desenvolvido no decorrer do trabalho, em um sistema de simulação que têm como produto o modelo com aplicabilidade final nos ajustes de relés de frequência.

De maneira sucinta, no capítulo são desenvolvidas simulações que utilizam das curvas de desempenho anteriormente mencionadas para determinar o tempo de abertura esperada para o relé de frequência. As curvas de carga são utilizadas nesta etapa para simular uma rede elétrica no decorrer de todo um dia, sendo verificadas como ocorrem as variações de todos os parâmetros elétricos devido a esta variabilidade de cargas. O foco deste capítulo é a adequação das curvas de desempenho em uma ferramenta que permite determinar os tempos de abertura esperados para cada período de um dia comum.

- **Capítulo 6: Simulações para comparação com resultados de um sistema real**

O capítulo 6 busca realizar simulações do sistema elétrico para cada período do dia e levantar qual o real tempo esperado de abertura.

Uma descrição sucinta do capítulo é feita através de como mensurar o tempo de abertura do relé em um sistema de distribuição presente no ambiente de simulação. O ponto de

atenção deste capítulo é a construção das curvas que correlacionam o período do dia e o tempo de abertura esperado em um ambiente simulado com parâmetros reais, e como estas curvas podem ser comparáveis com as obtidas através da metodologia de curva de desempenho.

A segunda etapa do capítulo busca realizar um comparativo entre os tempos de aberturas obtidos com as curvas de desempenho e valores obtidos simulando o sistema elétrico. Para isto colocando-se em pauta os perfis das curvas e suas diferenças notáveis. Em uma segunda fase são levantados os fatores que causam erros de mensuração para as duas metodologias. É de suma importância o entendimento das metodologias, erros e possibilidades de melhoria. O cerne desta etapa é comparativo inicial entre as duas famílias de simulações realizadas, e como as diferenças observadas podem gerar direcionamento para as conclusões do trabalho.

- Capítulo 7: Conclusões

O capítulo de conclusões busca levantar todos os conhecimentos desenvolvidos e quais conclusões foram obtidas no decorrer de cada etapa do trabalho. Ressalta-se neste capítulo sua segunda etapa, na qual são propostas possibilidades de melhoria para o trabalho e frentes de estudo que poderiam progredir com a utilização deste documento como base bibliográfica.

DETECÇÃO DE ILHAMENTO.

Advindo da crescente demanda pela geração distribuída, com um forte viés na utilização de geradores síncronos, cresce a preocupação das concessionárias com responsabilidade legal pela distribuição de energia elétrica na questão de ilhamento dos geradores distribuídos e os males que esse fenômeno acarreta. Casos de ilhamento interferem na proteção convencional prevista para a rede e controle dos sistemas de distribuição, trazendo riscos para os consumidores e profissionais que trabalham na rede. Sendo assim, o estudo de técnicas já utilizadas tanto no mercado quanto na academia são de suma importância para desenvolvimento do trabalho. As próximas seções terão como foco a descrição de algumas técnicas de detecção de ilhamento já utilizadas e estudadas, tendo como objetivo dar visibilidade ao que já foi desenvolvido e como estes conceitos e conhecimentos podem ser utilizados no decorrer deste trabalho.

2.1 Técnicas de detecção de ilhamento

Existem na literatura correlata diversos estudos e métodos de detecção de ilhamento, os quais são subdivididos em duas grandes áreas, sendo que em cada uma ocorre uma ampla linha de pesquisa e desenvolvimento como apresentado em (PITOMBO, 2010). A divisão prática destas frentes de estudos é feita como sendo baseado no trabalho (JR, 2001), (MARTEL, 2004):

1. Técnicas remotas
2. Técnicas locais
 - a) Técnicas passivas.
 - b) Técnicas ativas.

Cada uma destas grandes áreas será sucintamente apresentadas nos subtópicos a seguir, possibilitando uma visibilidade inicial do tema e motivando um estudo aprofundado nos campos

de interesse.

2.1.1 Técnicas remotas

As técnicas de atuação remota operam baseadas na comunicação entre os dispositivos de proteção, de realização de medidas do gerador distribuído, utilizando elementos como TCs e TPs, e informações provenientes das concessionárias que administram a rede. As técnicas deste grupo apresentam grande eficácia pela sua robustez e elevada assertividade em suas decisões. No entanto, exigem elevado custo de instalação, operação e manutenção, muito devido ao custo de aquisição, transporte, coordenação, tratamento e processamento de dados envolvidos no procedimento. Por estes motivos, torna-se pouco viável no universo de aplicação dos geradores distribuídos em redes de distribuição. Como não é do escopo deste trabalho analisar e aplicar estas técnicas, elas serão apenas citadas como forma de base bibliográfica e motivação para estudos futuros de interface, sendo as principais delas:

- Técnicas baseadas no sistema SCADA (*Supervisory control and data acquisition*);
- Técnicas baseadas em sistemas PLCC (*Power Line Carrier Communication*);
- Redes de comunicação de dispositivos de proteção

2.1.1.1 Técnicas baseadas no sistema SCADA

Tendo elevada aplicabilidade em sistemas de transmissão de energia devido a sua velocidade de tomada de decisão (MARTEL, 2004),(DIDUCH, 2004), o conceito desta metodologia de proteção é instalar um relé em cada nó do sistema entre a geração e a distribuição, sendo possível através deste equipamento realizar a comunicação entre os nós facilitando a tomada de decisão de qual região seria isolada. O fato de necessitar de grande infraestrutura e complexidade na tratativa dos dados desmotiva sua aplicação em redes de distribuição, apesar de ser uma tecnologia de grande efetividade de detecção de ilhamento.

2.1.1.2 Técnicas baseadas em sistemas PLCC

O conceito central desta metodologia é a utilização de um gerador de pequenos sinais conectado no secundário do transformador da concessionária. Através deste gerador de sinais é possível realizar a comunicação com todos os alimentadores (DIDUCH, 2004), (ROPP, 2004).

É necessário que todos os geradores tenham um receptor destes sinais que trafegam através da própria rede elétrica. Caso um dos geradores não receba esse sinal será considerado que ocorreu um ilhamento, pois o circuito entre a subestação e o gerador foi aberto. Identificando o gerador que necessita ser isolado é enviado um sinal de abertura e desligamento do gerador.

As vantagens deste sistema estão na grande confiabilidade, adaptabilidade à expansão da rede, já que a inserção de um novo receptor não altera a estrutura de transmissão central

dos sinais. Os pontos negativos são relacionados aos custos de instalação dos transmissores e receptores, à necessidade de uma estrutura de tecnologia da informação dedicada ao sistema e o custo elevado dos dispositivos instalados na média tensão (MARTEL, 2004),(ROPP, 2004).

2.1.1.3 Redes de comunicação de dispositivos de proteção

Esta metodologia prevê que todos os elementos utilizados para a proteção contra a ocorrência de ilhamento sejam conectados por uma rede de comunicação. O relé presente na subestação principal emite informações sobre a situação analisada e um sinal de bloqueio que é transmitido através da rede elétrica. Por sua vez, os relés presentes nas estruturas conectadas aos geradores síncronos comparam os valores recebidos com os aferidos localmente. Nos casos de divergência durante a comparação, o sinal de bloqueio é desabilitado, possibilitando que os relés dos geradores operem e enviem o sinal de abertura para o disjuntor (BRIGHT, 2004). Analisando a técnica, é perceptivo que esta não melhora a detecção do ilhamento, mas reduz as possibilidades de atuação indevida principalmente em sistemas de transmissão (JR, 2001).

2.1.2 Técnicas Locais

As técnicas locais apresentam uma ampla gama de aplicações e estudos para determinação e localização de ilhamento. Essas técnicas se utilizam dos parâmetros presentes no ponto de conexão entre a rede e o gerador distribuído para determinar a ocorrência do ilhamento, e nesses casos, tomar as medidas necessárias de abertura do disjuntor. O trabalho (JR, 2001), apresenta uma subdivisão deste grupo de técnicas. Algumas destas estão em plena sincronia com este trabalho e serão elucidadas nas próximas seções.

2.1.2.1 Técnicas locais passivas

Essas técnicas utilizam as grandezas medidas no ponto de conexão entre o sistema agregado ao gerador distribuído e a rede elétrica. A detecção nestes casos é realizada caso ocorra uma variação significativas de algum ou vários desses parâmetros.

Para o desenvolvimento deste trabalho, este grupo de técnicas é de suma importância, dado que as metodologias a serem propostas utilizam a relação entre a frequência e o desbalanço de potência ativa entre o sistema do gerador distribuído e a rede elétrica para determinar os casos de envio do sinal de abertura do relé para o disjuntor. Por conta disto, este tema será descrito em maiores detalhes nos próximos parágrafos.

Devido às características de alteração da frequência, relés do tipo sub e sobrefrequência, de taxa de variação de frequência e relés de deslocamento de fase podem ser requeridos nesse tipo de proteção, sendo amplamente difundidos dentro das técnicas consideradas passivas (JR, 2001), (MARTEL, 2004), (DIDUCH, 2004), (FITZGERALD, 2005). Isto ocorre pois desbalanços

de potência ativa entre a eventual ilha e o sistema podem acarretar em grandes variações nos parâmetros de frequência do sistema momentaneamente isolado.

Outro ponto de atenção para estes esquemas de proteção é sua facilidade de instalação em sistemas elétricos já existentes, custo relativamente baixo e grande utilização em sistemas de distribuição (JR, 2001), contando com o ponto negativo de apresentar falhas operativas que prejudicam o desempenho em casos nos quais o desbalanço de potência é muito baixo.

Como mencionado anteriormente, este tipo de configuração de detecção se utiliza amplamente de relés baseados em frequência, dentre eles têm-se uma descrição prática como sendo:

- Relés de Sub e Sobrefrequência:

Apresentam operação baseada na diferença entre a frequência medida e o valor ajustado do relé.

- Relés de taxa de variação de frequência (df/dt):

Tendo característica de acelerar a detecção doilhamento no sistema de geração, principalmente nos casos que a variação da frequência na eventual ilha é lenta (JR, 2001), (MARTEL, 2004), (FITZGERALD, 2005); é tema recorrente de estudo nas aplicações de detecção de ilhamento como apresentado no trabalho referência (PITOMBO, 2010).

- Relés de deslocamento de fase ou "Salto de vetor" Sendo estudados nas referências (MARTEL, 2004), (FITZGERALD, 2005) estes relés operam quando o deslocamento do ângulo de tensão na barra de geração ultrapassa o ajuste previamente definido.

Dado os tipos de relés de frequência existentes na literatura e testados em sistemas de distribuição com geração distribuída, é válido salientar que este trabalho apresenta um escopo voltado à utilização e estudo dos relés de Sub e sobrefrequência. Isto ocorre devido a motivadores como a forte utilização das referências (JR, 2006), (PITOMBO, 2010) no trabalho, grande aplicabilidade dessa família de relés em sistemas de distribuição entre outras questões (técnicas e não técnicas) que já foram ou ainda serão explicadas e exemplificadas no decorrer do trabalho.

Outras técnicas passivas utilizam a relação entre a medida de tensão e o desbalanço de potência reativa na rede ilhada em relação a rede elétrica subjacente (DIDUCH, 2004), (BELTRAN FRANCISCO GIMENO; TORRELO, 2006). Para este grupo de configurações pode-se utilizar técnicas de sub ou sobretensão, variação de tensão entre outras metodologias baseadas na relação entre a tensão e o desbalanço de potência reativa para uma eventual ilha.

Existem outras técnicas passivas de detecção de ilhamento como, por exemplo, a utilização de medidas de frequência para detecção de ilhamento de maneira *off-line*. Este esquema adaptativo permite ajustar os dispositivos de proteção conforme necessário para a configuração de carga atual, sendo que o conhecimento das variações de carga na rede de distribuição é de

suma importância para o método (PITOMBO, 2010). Por este motivo os pontos negativos destes métodos são baseados na fidelidade e aquisição dos dados de carga do sistema (JR, 2001). Esta técnica mencionada é construída e discutida durante todo este trabalho, sendo assim trabalhada conforme o avanço dos próximos capítulos.

Uma observação importante a ser feita sobre as técnicas passivas é que nenhuma delas apresenta eficácia total na detecção (JR, 2001). Sendo assim, é esperado que existam zonas de não detecção, como as apresentadas e estudadas no trabalho (JR, 2006), podendo estas zonas assumirem tamanhos e proporções diferentes dependendo dos ajustes e configurações dos dispositivos de proteção. Uma das conclusões adquiridas em (JR, 2006) foi a de que quanto menos sensíveis forem os ajustes (buscando sempre evitar falsos positivos), maiores serão as regiões de não detecção e, conseqüentemente, menor a eficiência da proteção contra a permanência de um sistema ilhado. Um grande paradigma das técnicas passivas é garantir que os sistemas de proteção atuem de maneira correta mantendo a menor zona de não detecção possível. Uma saída viável para esta situação seria a apresentada pelas técnicas de detecção ativas, que serão citadas e sucintamente descritas na próxima seção.

2.1.3 Técnicas locais ativas

Essas técnicas são baseada na injeção de sinais por parte do gerador distribuído provocando pequenas alterações no sistema que possibilitam a detecção do ilhamento. Apesar da grande aplicabilidade dessa técnica, ela não é desenvolvida nesse trabalho pelo fato de ser onerosa e fugir do escopo. Como medida informativa, os principais métodos são mencionados a seguir, sendo que foram apresentados no trabalho (PITOMBO, 2010) e são desenvolvidos através do trabalho (BELTRAN FRANCISCO GIMENO; TORRELO, 2006),(KUNDUR, 1994).

- Técnicas de medida da alteração da impedância após o ilhamento.
- Técnicas de variação da potência reativa e tensão do gerador.
- Técnicas que utilizam inversores.

SISTEMA ELÉTRICO NO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO.

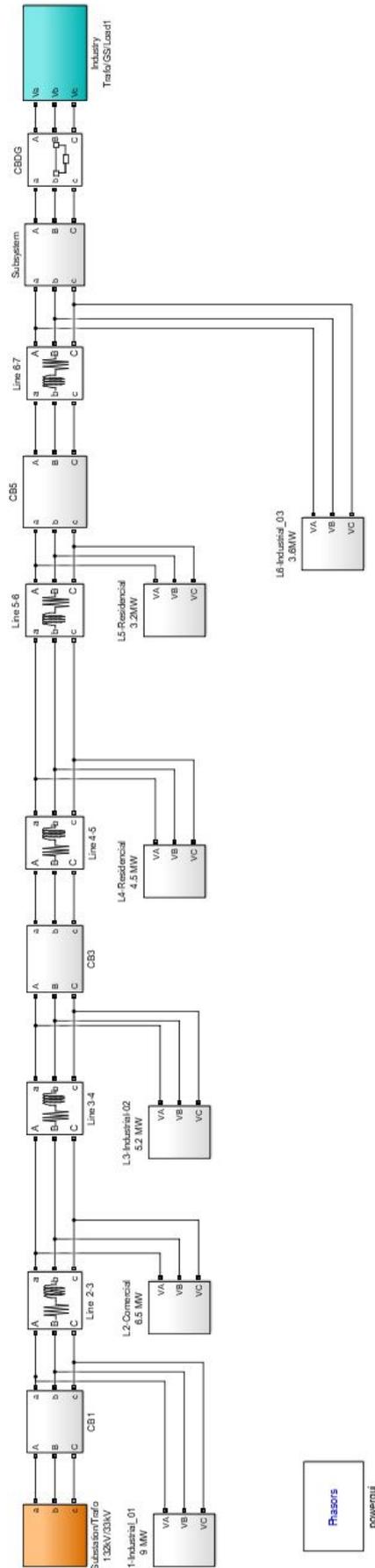
Sendo o capítulo anterior focado no embasamento teórico até então desenvolvido para a realização da detecção de ilhamento, este capítulo busca modelar um sistema elétrico de distribuição que possibilite a realização de simulações e desenvolvimento de metodologias sobre o assunto em um ambiente de simulação controlado. O sistema elétrico foi inteiramente construído dentro do ambiente do *SimPowerSystems*, que proporciona interface integral com o *Matlab*.

As próximas seções irão demonstrar e explicar qual o modelo do sistema elétrico como um todo e como foi escolhido cada um dos blocos existentes em sua construção. A ideia é que ao fim deste capítulo seja possível ter uma rede de distribuição completamente funcional para que os testes e validações possam ser realizadas

Como uma etapa inicial da construção, é necessário apresentar como seria o modelo trifilar da rede elétrica utilizada em todo o trabalho e como é esperado que o sistema de distribuição dentro do ambiente de simulação seja contemplado e construído.

Para as simulações do sistema de proteção contra ilhamento foi escolhido um sistema elétrico como demonstrado na Figura 1 em sua representação trifilar. A Figura 1 busca dar uma ideia da configuração da rede estudada. As seções posteriores buscam mostrar em detalhe cada um dos elementos que compõem a rede e levantar possíveis pontos de alteração ou adaptação necessárias para as simulações e estudos posteriores.

Figura 1 – Diagrama de blocos do sistema elétrico de distribuição.



As seções seguintes apresentarão descrições simplificadas dos elementos do sistema elétrico estudado e estão organizadas da seguinte maneira:

1. Entrada do sistema de distribuição;
2. Blocos de medição e chaves temporizadas;
3. Bloco do gerador síncrono;
4. Bloco do regulador de tensão;
5. Alimentadores;
6. Transformadores;
7. Cargas;
8. Curvas de cargas;
9. Modelo do relé de Sub e Sobre frequência.

3.1 Entrada do sistema de distribuição

Nesse modelo de simulação tem-se representada no bloco laranja a fronteira de um sistema de subtransmissão trifásico apresentando 132 kV, 60 HZ e 1.500 MVA de potência de curto circuito. Esse alimentador fornece 33 kV ao sistema de distribuição através de um transformador 132kV/33kV com ligação Delta/Estrela aterrada (Δ/Yg).

3.2 Blocos de medição e chaves temporizadas

Os blocos representados por CB1, CB3 e CB5 trazem em sua composição um medidor trifásico de corrente, medidor de tensão, medidores de fluxo potência ativa e potência reativa e uma chave de abertura temporizada que representa um disjuntor. As medições são utilizadas para a construção das curvas após a abertura da chave temporizada presente em cada um dos blocos. Essas chaves podem ser escolhidas para abrir conforme as necessidades de simulação, em tempos pré-definidos, proporcionando dinamismo e grande versatilidade do modelo.

Um exemplo da aplicabilidade desses blocos é na abertura da chave de CB1: As medidas de potência ativa e reativa podem ser computadas no medidor trifásico e repassadas ao ambiente de simulação. Por isolar o sistema em dois, as chaves propiciam simular redes ilhadas analisadas no trabalho. As potências ativas e reativas medidas dentro do bloco denominado CB1, representam os desbalanços de potência entre o sistema e a ilha. A mesma estrutura de medição dos parâmetros elétricos ocorre nos blocos *Subsystem* e na chave temporizada *CBDG*, que precede a entrada do bloco do *Industry*.

3.3 Bloco do gerador síncrono

Este bloco final da estrutura destacado em azul comporta primeiramente, um transformador de entrada 33kV/6,9kV com ligação Delta/Estrela aterrada (Δ/Y_g). O bloco do gerador síncrono em si contém em sua composição o gerador síncrono trifásico que alimenta a rede de distribuição e um regulador de tensão. Este elemento do sistema tem o papel de manter a tensão terminal do sistema constante, ou dentro de padrões aceitáveis de qualidade de energia, ou manter a potência reativa (fortemente influente no fator de potência) constante durante toda a operação.

Para as aplicações do trabalho em sistemas de distribuição, o gerador é considerado como sendo um elemento que mantém a potência mecânica e potência elétrica ativa do sistema constante, não participando da regulação de frequência do sistema elétrico durante a geração, tanto em casos que a rede de distribuição está importando energia quanto nos casos que esta exporta energia.

Para a construção do sistema elétrico que baseou o desenvolvimento das simulações no trabalho, foi utilizado um gerador síncrono com um modelo que considera o sub-transitório, e a dinâmica do estator e as características elétricas dos enrolamentos de campo e de amortecimento.

A parte elétrica do gerador é representada por um sistema de sexta ordem em espaço de estados. Esta modelagem é obtida desprezando os transitórios do estator presentes no modelo de oitava ordem.

Para aplicação no ambiente de simulação oferecido pela biblioteca do *SimPowerSystems*, este gerador é modelado conforme demonstrado na Figura 2 (PITOMBO, 2010), (KUNDUR, 1994).

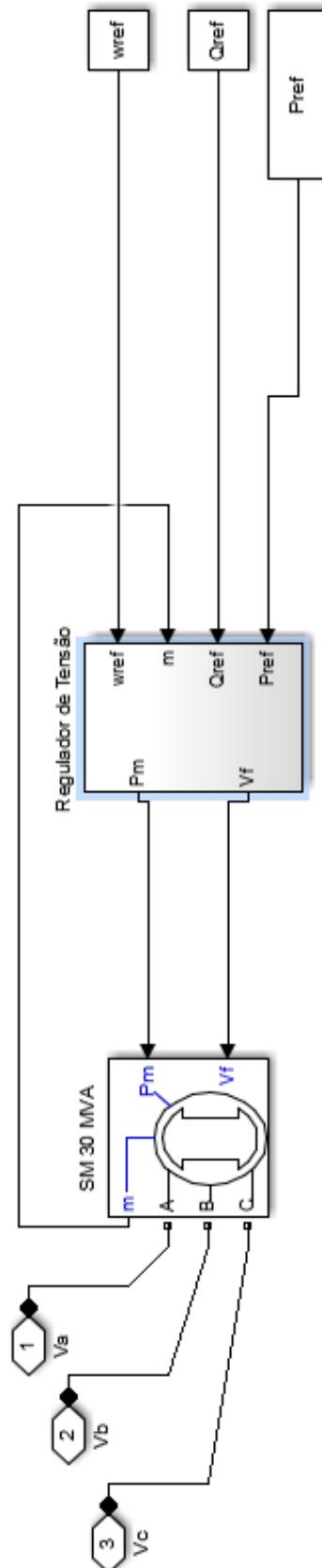
3.4 Estrutura do gerador

Para todas as simulações deste trabalho foi utilizado um gerador síncrono modelado dentro do ambiente de simulação do *Simulink*, através de um modelo que pode chegar até a oitava ordem, sendo que este tipo de modelagem pode ser empregado tanto em casos dinâmicos quanto discretos. Sua representação $dq0$ como apresentado na Figura 2, esta modelagem e representação foi obtida através da base bibliográfica (KUNDUR, 1994).

É válido considerar que, para aplicações em redes de distribuição, os geradores síncronos tendem a manter uma potência ativa constante (PITOMBO, 2010). Pelas características das simulações serem rápidas em comparação aos tempos de respostas das turbinas e seus respectivos controles (IEEE, 1992), (KUNDUR, 1994), foi considerado que, para a modelagem do gerador síncrono, os reguladores de velocidade do gerador e da turbina foram desprezados, e levado em consideração o torque mecânico constante.

Para que fosse realizada uma correta simulação deste elemento gerador, foi alocado no bloco de gerador, um regulador de tensão como representado na Figura 2.

Figura 2 – Bloco do gerador.



Nesta figura 2 pode-se observar o modelo do gerador síncrono conectado ao regulador de tensão em uma extremidade e as fases da rede de distribuição em outra extremidade. O bloco do regulador de tensão não é de grande enfoque nesta etapa. No entanto, pode-se perceber que chegam neste bloco três parâmetros de simulação que podem ser alterados no decorrer do código dentro do ambiente de simulação, sendo estes parâmetros a potência ativa gerada, a potência reativa gerada e a frequência padrão de geração.

Os dados nominais do gerador síncrono são os seguintes:

- Potência nominal = 30M [VA];
- Tensão nominal linha-linha = 6,9K [Vrms];
- Frequência = 60 [Hz];

Sendo apresentado o modelo do gerador pode-se considerar e avaliar quais alterações em seus parâmetros influenciam nos tempos de abertura esperados.

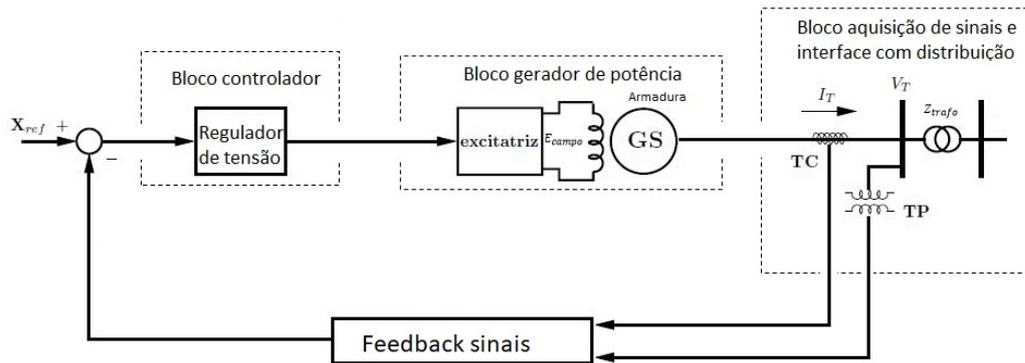
3.5 Bloco regulador de tensão

Neste bloco estão presentes elementos de controle do gerador, como o regulador de tensão terminal do gerador, a excitatriz do gerador e alguns medidores de parâmetros elétricos retirados do gerador e utilizados no decorrer das simulação. Entre os parâmetros medidos estão: a frequência e a tensão terminal, que são utilizadas como parâmetros de tomada de decisão do relé digital.

3.5.1 Excitatriz

Os sistemas de excitação para geradores síncronos são propostos para manter a tensão terminal ou a potência reativa (fator de potência) constantes (SYSTEMS, 1993), (JR, 2001), (MUMMERT, 1999). No entanto, neste trabalho, foi apenas abordado o caso de regulação da tensão terminal do gerador, sendo que este parâmetro é necessário para a determinação de condições operativas que proporcionem a criação e estudo das curvas de desempenho. Para uma explicação mais concreta foi utilizada a Figura 3 (JR, 2006), que a representa a configuração simples para o controle do sistema de excitação utilizando uma realimentação de corrente e de tensão medidos no terminal do gerador.

Figura 3 – Diagrama de controle para a excitatriz (JR, 2006).



Na Figura 3 está presente o regulador de tensão, a excitatriz do gerador, elementos de aquisição de sinais dados por um TC (Transformador de Corrente) e um TP (Transformador de Potencial) ligados na barra de saída do gerador, e uma realimentação de sinais que transporta as informações para o processamento aplicado no regulador.

Os sinais de erro fornecido pelos transdutores alimentam o regulador que determina a tensão de campo E_{fd} . Algo a se notar é a presença de um sistema de proteção que previna situações de sub ou sobre-excitação do gerador, dependendo das condições de operação e das condições de carregamento do dia.

O sistema de controle presente na Figura 3 (JR, 2006), possibilita que a tensão seja sempre mantida constante pelo gerador, além de isolar magneticamente o sistema de controle, dado que a aquisição de dados é feita pelos TC e TP. Um ponto a ser notado é o fato de existirem na literatura diversas configurações de controle possíveis para esta aplicação (KUNDUR, 1994), (MUMMERT, 1999). No entanto, esta configuração atende aos requisitos de controle nos trabalhos (JR, 2006), (PITOMBO, 2010), que proporcionam as bases teóricas para esta pesquisa.

3.5.2 Regulador de tensão

Para analisar esse elemento foi utilizada a Figura 3, sendo que nela têm-se representados os parâmetros elétricos necessários para determinação da equação de correlação entre os parâmetros:

- X_c Reatância de compensação para a corrente reativa;

- V_T Tensão terminal do gerador;
- I_T Corrente no gerador síncrono;
- Z_{trafo} Transformador entre gerador e rede de distribuição;
- TC (Transformador de Corrente);
- TP (Transformador de Potencial);
- E_{fd} Tensão de campo.

$$X = ||V_T - jI_T X_c|| \quad (3.1)$$

Como demonstrado em (3.1) o valor de X depende dos parâmetros de tensão terminal e reatância de compensação. Essa reatância é utilizada no compartilhamento de potência reativa entre diversos geradores de uma mesma rede (caso não abordado neste trabalho mas extremamente viável no contexto de expansão da geração distribuída) (JR, 2006),(PITOMBO, 2010).

Os valores de X são dependentes da variação do parâmetro X_c e como esta alteração de comportamento altera o valor resultante de X (ROPP, 2004). Desconsiderando o valor de X_c , aproximação possível para este escopo, a variável de controle torna-se a tensão terminal do gerador (4.2).

$$X = V_T \quad (3.2)$$

3.6 Alimentadores

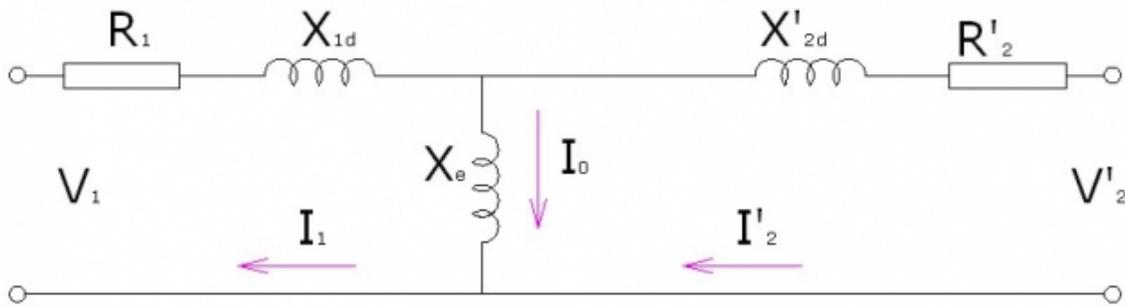
Os blocos descritos como linhas de transmissão no modelo, são alimentadores com impedância RL em série, sendo a mesma representação utilizada em linhas de distribuição.

Para as necessidades deste trabalho, admite-se estes elementos são linhas curtas, podendo desprezar parâmetros de derivação, como capacitância *shunt*.

3.7 Transformadores

Os transformadores utilizados nas simulações são modelados pelo modelo T, com perdas de núcleo (KUNDUR, 1994), (??), que podem ser encontrados nas bibliotecas do *SimPowerSystems*. Este modelo T é representado por uma resistência R_1 e reatância X_{ld} no lado de alta, uma reatância de magnetização shunt X_e , uma resistência R'_2 e reatância X_{l2d} no lado de baixa, como representado na Figura 4.

Figura 4 – Modelo T de transformadores.



Sendo os parâmetros do transformador descritos a seguir:

- R_1 Resistência do enrolamento primário.
- X_{1d} Reatância de dispersão do enrolamento primário.
- X_e Reatância de magnetização
- R'_2 Resistência do enrolamento secundário referida ao primário.
- X'_{2d} Reatância de dispersão do enrolamento secundário referida ao primário.

3.8 Cargas

Para as representações de cargas utilizadas nas simulações, foi utilizado o modelo dependente da tensão (IEEE, 1992),(SYSTEMS, 1993), como representado em (3.3) e (3.4):

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{n_p} \quad (3.3)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{n_q} \quad (3.4)$$

Sendo os parâmetros:

- P Potência ativa consumida na carga (p.u);
- Q Potência reativa consumida na carga (p.u);
- P_0 Potência ativa nominal (p.u);
- Q_0 Potência reativa nominal (p.u);
- V tensão nodal na carga (p.u);
- V_0 tensão nominal na carga (p.u);

- n_p expoente que determina o comportamento variante da potência ativa da carga em relação à variação da tensão nodal na mesma;
- n_q expoente que determina o comportamento variante da potência reativa da carga em relação à variação da tensão nodal na mesma.

A variação dos parâmetros n_p e n_q determina o tipo de carga, podendo ser de potência constante, impedância constante e corrente constante. Para este trabalho foram utilizadas apenas cargas do tipo impedância constante, significando que os expoentes n_p e n_q são iguais a 2. Nos trabalhos de apoio e outros presentes na literatura, a discussão sobre a modelagem das cargas é analisada devido a sua grande influência na maneira que as simulações são realizadas e nos resultados obtidos em decorrência destas.

Olhando com um foco maior nas cargas do sistema que será simulado, é necessário ter em mente que, em um sistema real de distribuição, as cargas apresentam diferenças significativas no decorrer do dia. Um exemplo seria que uma carga residencial apresenta um valor significativamente maior às 3 horas da tarde do que as 3 da manhã. Essa variação deve ser levada em conta caso se queira aproximar o sistema simulado do encontrado comercialmente. Este adendo deve ser levado em conta para a construção de toda a metodologia do trabalho, de maneira que a cada etapa seja propiciada a estrutura necessária para simular a variação das cargas no decorrer do dia.

3.9 Curvas de carga

Será utilizado um conjunto de curvas de cargas reais que representam um perfil de cargas de uma região da cidade de São Paulo (JARDINI C.TAHAN, 2000), dividida em grupos de carga residencial, comercial, industrial.

O sistema elétrico utilizado neste trabalho é composto por 6 blocos de cargas, sendo que estas cargas podem ser representadas com características de uma carga residencial, comercial ou industrial, como representado na Figura 1. Em cada um destes blocos foi alocado um perfil de cargas com variação linear que têm como objetivo simular a variação de uma curva de carga genérica.

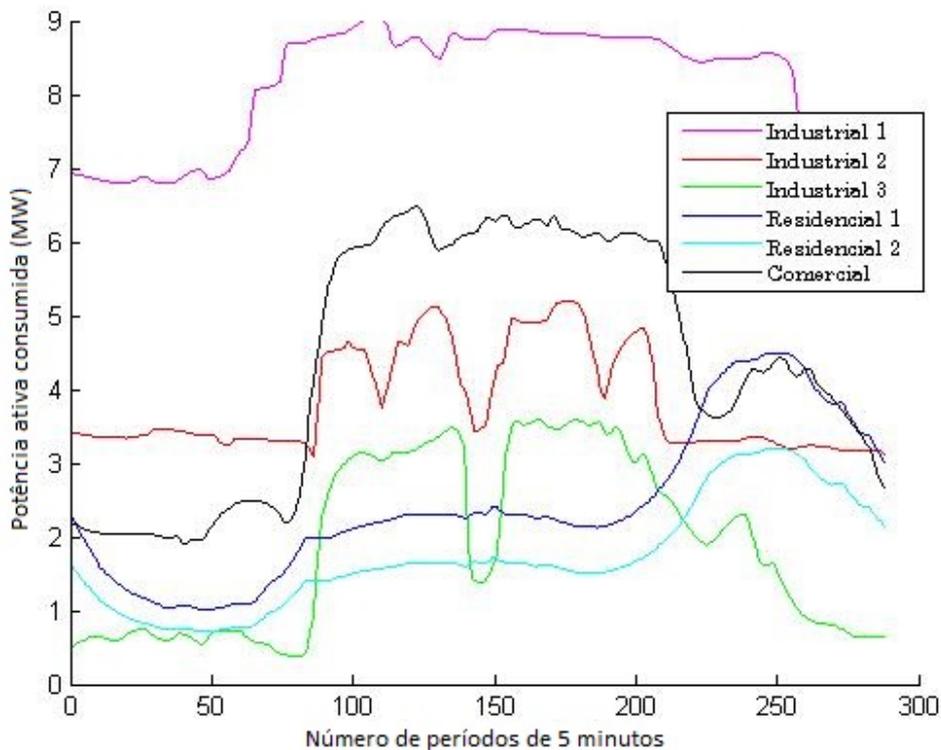
De uma maneira geral, foram empregados em cada um dos blocos um perfil de carga diferente que busca representar o bloco de carga proposto, um exemplo, seria que um perfil de carga com características residenciais apresentam pontos de maior demanda no começo e no fim do dia. Já uma carga com perfil industrial apresentaria uma demanda um tanto quanto uniforme no decorrer do horário comercial, quando todo o maquinário industrial está operando.

Os próximos passos irão demonstrar como estas curvas foram obtidas, inseridas no sistema de simulação e como alteraram os dados obtidos pelas simulações.

3.9.1 Obtenção das curvas de carga

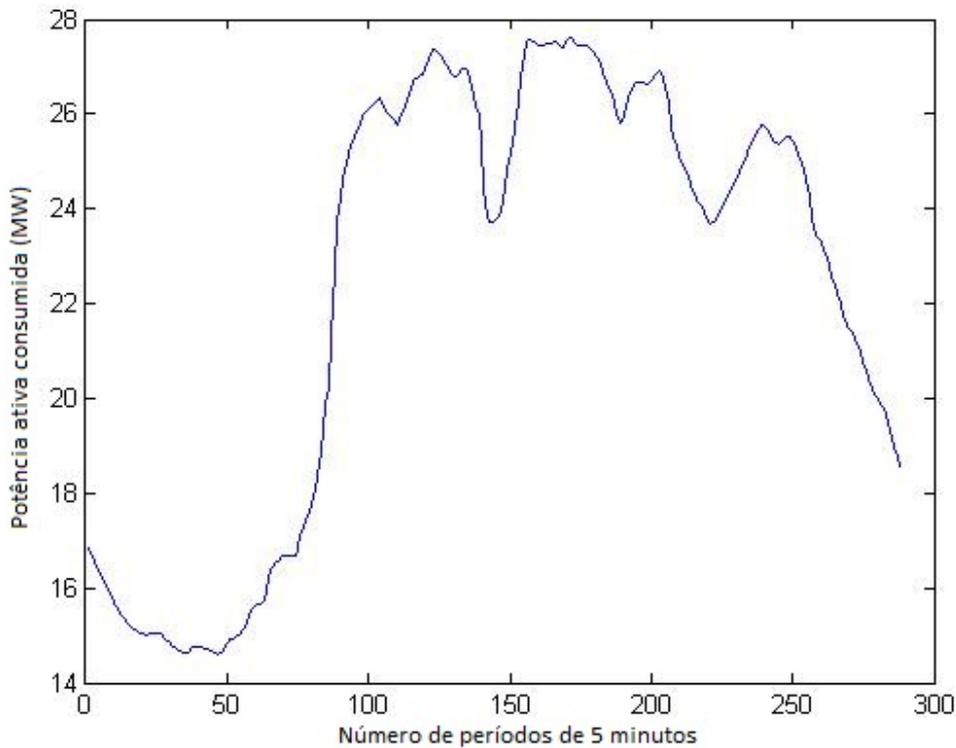
As curvas de carga foram obtidas em (JARDINI C.TAHAN, 2000) e seus formatos são representados na Figura 5 para as diferentes classes de consumidores.

Figura 5 – Perfis de carga para a rede de distribuição estudada.



A soma das cargas dos blocos está representada na Figura 6. Esta curva representa a carga total vista pela chave CB1 no decorrer de todo um dia, para a rede de distribuição simulada que apresenta em sua configuração parâmetros de uma rede de distribuição reais.

Figura 6 – Curva de carga total no sistema.



O perfil das cargas somadas contempla uma potência consumida total na faixa de até 28 MW, dependendo do momento do dia. Esta análise inicial das cargas permite prever que o comportamento de detecção do relé será diferente para momentos do dia, já que está diretamente relacionado com a diferença de potência ativa entre a ilha e o sistema de distribuição.

O sistema de distribuição utiliza, em sua maioria, elementos de compensação de potência reativa que mantêm o fator de potência por volta de 0,92, considerando o escopo proposto. Dado isso, o perfil de carga da potência ativa tem o mesmo comportamento da potência reativa. No trabalho foi utilizado em cada bloco de carga do sistema elétrico o mesmo perfil (residencial, comercial ou industrial) para a potência ativa e reativa.

3.10 Modelo do relé de Sub e Sobrefrequência

Pela grande correlação entre a variação de potência ativa e a frequência no sistema ilhado, a variação da potência ativa consumida pelo sistema gera distúrbios de frequência na rede que podem ocasionar a detecção do ilhamento pelos relés de frequência (IEEE, 1992), (KRAUSE, 1986). Um ponto negativo desses relés é o grande período necessário para a detecção, no caso da diferença de potência ativa ser pequena. Como as empresas distribuidoras e órgãos reguladores estabelecem um limite temporal para a detecção de ilhamento, os relés de frequência podem não operar frente a reduzidos desbalanços de potência ativa.

No sistema elétrico utilizado durante as simulações, existe um gerador síncrono que fornece potência ativa e reativa, além de cargas de vários tipos que consomem potência ativa e reativa. As variações devido a estes elementos alteram as grandezas observados pelo relé determinando ou não sua atuação.

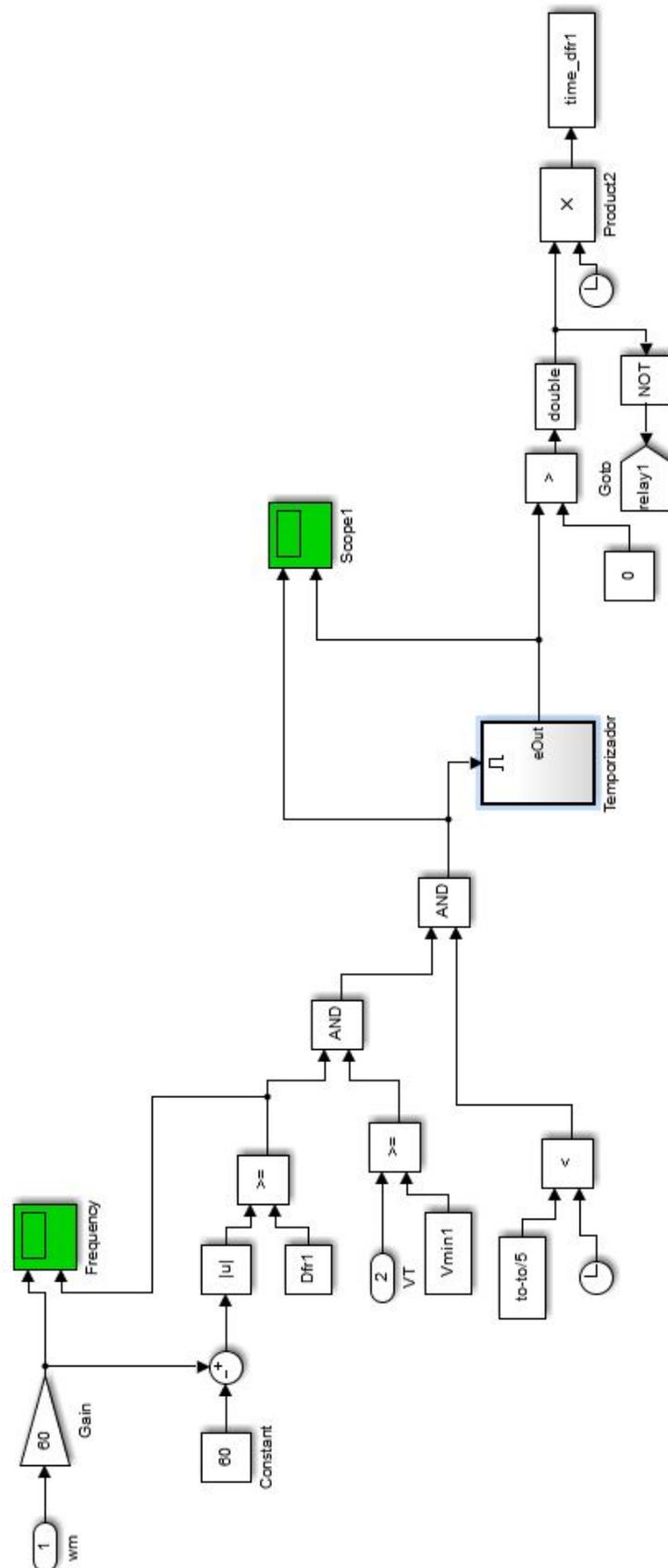
Para este trabalho, foi utilizado o relé de Sub e Sobrefrequência, apesar de existirem trabalhos que utilizam outros relés baseados em medida de frequência (IEEE, 1992), (KRAUSE, 1986), alguns deles citados e exemplificados anteriormente.

O relé baseado em frequência aplicado ao trabalho utiliza janelas de medição baseadas na forma de onda de tensão da barra a qual está conectado para calcular a frequência elétrica. Além disso os relés de Subfrequência e Sobrefrequência apresentam ajustes de mínima tensão de disparo para evitar falsa atuação em casos de curto-circuito, partida de geradores ou manobras na rede. Ajustes de temporização de disparo podem ser regulados conforme a necessidade do projeto de proteção, sendo que um tempo mínimo de atuação foi determinado no trabalho como sendo de 80 ms devido às necessidades de cálculos computacionais dos sinais obtidos na barra, como analisado em (SIEMENS, 1997).

Após o cálculo da frequência no ponto de operação, essa frequência é comparada com os ajustes de subfrequência ou sobrefrequência, e resultam em decisões de abertura e configurações de proteção. Caso a frequência na barra seja maior que o ajuste de sobre frequência (β_1) ou menor que o ajuste de subfrequência (β_2) no tempo de janela T_{set} , e a tensão medida for maior que a tensão mínima de atuação do relé V_{min} o mesmo envia um sinal de abertura para o disjuntor correspondente.

A Figura 7 representa o diagrama de blocos de um relé de frequência. A estrutura de tomada de decisão é baseada nos parâmetros elétricos descritos anteriormente, é visualizável a entrada dos parâmetros relativos aos tempos de temporização mínima, tensão de abertura mínima, elementos que possibilitam a visualização das ondas no sistema e a saída do sistema determinam o tempo de abertura necessário para aquela configuração do sistema.

Figura 7 – Modelo de simulação do relé



MÉTODO DAS CURVAS DE DESEMPENHO.

Sendo uma metodologia relativamente nova apresentada e trabalhada em (JR, 2006), estas curvas buscam fornecer uma melhor compreensão do comportamento de relés de tensão e de frequência quanto à detecção do ilhamento.

As curvas são baseadas na relação existente entre as medidas de tensão, o desbalanço de potência reativa, e da relação entre o desbalanço de potência ativa e a medida de frequência. No trabalho (JR, 2006) foram desenvolvidas diversas simulações e justificativas que validam as relações entre os desbalanços de potência e seus respectivos parâmetros elétricos mensuráveis, como tensão e frequência.

Foi utilizada a aplicação da metodologia no caso de medidas de frequência, devido a sua ampla utilização em estudos sobre o tema e outras justificativas anteriormente mencionadas, especificamente utilizando relés de subfrequência e sobrefrequência.

Mesmo reconhecendo a relação entre o desbalanço de potência ativa e a medida de frequência, essa relação não é aplicável para casos em que o desbalanço é pequeno, exigindo um tempo de detecção muito acima do recomendado. O mesmo é reconhecido no caso de grandes desbalanços de potência, nos quais a detecção é rápida e aplicável para sistemas de proteção contra ilhamento. Apresentados esses dois pontos, fica visível a necessidade de entender a relação que existe entre o tempo de detecção do ilhamento e as medidas de desbalanço de potência.

Nesse sentido, o trabalho (JR, 2006) busca desenvolver essa metodologia analisando curvas que são construídas com o tempo de detecção no eixo das ordenadas e o desbalanço de potência ativa no eixo das abscissas (sendo utilizados relés de sub sobrefrequência), além de outras análises com relés de tensão e estudo do desbalanço de potência reativa que estão fora do escopo deste trabalho. As curvas em questão são obtidas com simulações não-lineares considerando diferentes relações entre carga e geração no eventual sistema ilhado. Por essa característica, diferentes ajustes dos relés e configurações do sistema de geração distribuída podem ser comparados, buscando o melhor sistema de detecção de ilhamento.

As próximas seções buscam aplicar os conhecimentos adquiridos pelos trabalhos base (JR, 2006), (PITOMBO, 2010) e condensá-los em códigos e *Softwares* que possibilitem realizar as análises propostas neste trabalho.

4.1 Softwares e plataforma de simulação

Para as simulações de obtenção das curvas de desempenho foi utilizada a plataforma *SimPowerSystems*, uma ferramenta computacional para análise de transitórios, sendo que toda a etapa de codificação, análise dinâmica dos parâmetros e tomada de decisões lógicas foram realizadas utilizando o ambiente de simulação *Matlab/Simulink*.

A escolha do *SimPowerSystems* se deu pela sua extensa biblioteca de elementos elétricos de potência aliado a compatibilidade de modelos desenvolvidos no *Simulink* ou com linguagens de programação descritiva de sistemas elétricos, com melhor performance de processamento, como C (??).

A biblioteca apresenta quase todos os modelos requeridos para a construção do sistema elétrico, como modelos de carga RLC, modelos de linha de transmissão, modelos de transformadores, chaves temporizadas que simulam disjuntores, componentes de eletrônica de potência, blocos de medição entre outras funcionalidades que propiciam o desenvolvimento do trabalho.

Apesar de ter sido utilizada essa ferramenta no decorrer do trabalho, a metodologia desenvolvida busca ser universal em sua aplicabilidade, podendo ser útil a todos os ambientes de simulação que tenham interface com geração distribuída em redes de distribuição.

O primeiro passo para a utilização do *SimPowerSystems* é a construção do sistema na plataforma com o apoio do *Simulink*, utilizando os elementos adicionados pelo usuário das bibliotecas do *Simulink* ou blocos criados pelo próprio usuário. No trabalho em questão foram utilizados todos os componentes trifásicos, dado que o *SimPowerSystems* utiliza essa representação na modelagem de máquinas elétricas e seus periféricos (??).

Após esse passo o ambiente, de forma automatizada, obtém os parâmetros de cada bloco e nó elétrico, separados em blocos lineares e não lineares. Após a determinação da topologia o ambiente de simulação constrói um modelo de variáveis de estado para os blocos lineares. Nesse processo, a plataforma também calcula os valores iniciais das variáveis, cálculos de regime permanente e cálculo dos parâmetros de controle relacionados a máquina elétrica, através do fluxo de carga.

Os componentes não lineares são modelados utilizando relações de tensão-corrente *versus i*, sendo as saídas do programa relacionadas com variáveis elétricas, mecânicas e de controle escolhidas pelo usuário. A representação de espaço de estados pode ser utilizada tanto no caso contínuo quanto discreto. Já as equações diferenciais podem ser resolvidas com métodos de integração já presentes no *Matlab*, por exemplo, métodos utilizados em sistemas não lineares e

baseado no método de integração aliado ao método Runge-kutta(TAN, 2012),(DABNEY, 2003).

4.2 Obtenção das curvas de desempenho via simulação

Para obtenção das curvas de desempenho, é necessário realizar algumas simulações de um sistema elétrico com a presença de chaves que simulem o ilhamento.

A ideia é captar o tempo de detecção do ilhamento do relé para cada desbalanço de potência ativa, entre a eventual ilha e o sistema elétrico. Para que isto ocorra é necessário simular um desbalanço de potência ativa sendo que este pode ser obtido através do despacho de geração de potência ativa pelo gerador síncrono diferente do consumo das cargas do sistema ou por uma variação das cargas do sistema.

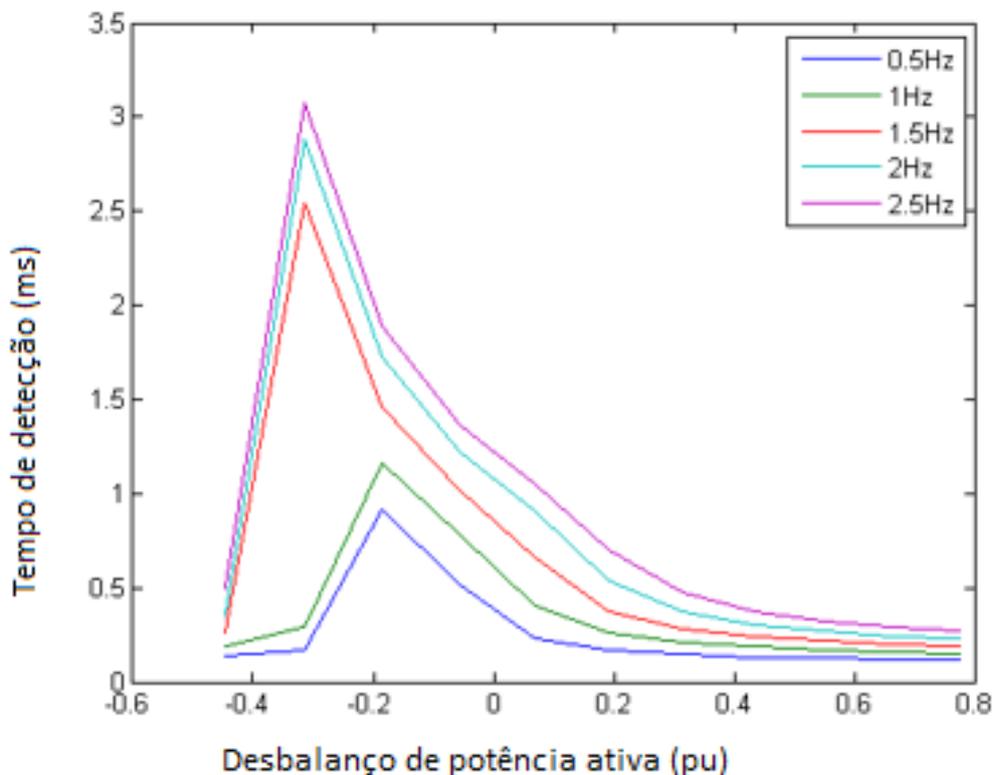
4.3 Construção de curvas de desempenho através de simulações de ilhamento

Utilizando a metodologia apresentada na seção anterior foram construídas algumas curvas para demonstrar o modelo do ambiente de simulação e o código de simulação utilizado. Foram construídas curvas para os casos de variação das cargas e variação da potência ativa, sendo que a aplicabilidade de cada um dos tipos vai ser enunciada posteriormente.

Para obter as curvas de desempenho considerando excesso de potência ativa, isto é, a provável ilha exporta potência ativa, manteve-se a potência do gerador no seu valor nominal e as cargas foram variadas de 0 até o seu valor máximo. Para cada variação e para cada ajuste considerado, simulou-se um ilhamento pela abertura da chave CB1 e registrou-se o tempo que o relé detecta o ilhamento e o desbalanço de potência ativa. Ao final tem-se um conjunto de pontos que relacionam o desbalanço de potência ativa e os tempos de detecção e constroem-se as curvas de desempenho.

A Figura 8 ilustra exemplos de curvas de desempenho obtidas para diferentes ajustes.

Figura 8 – Curvas de desempenho obtidas com variação de cargas



Analisando as curvas obtidas, observa-se rapidamente que, quanto maior o desbalanço de potência ativa, mais rápido o relé detecta o ilhamento. Para casos que o desbalanço de potência é baixo, observa-se um tempo maior para a detecção do ilhamento. Os valores de desbalanço de potência ativa negativos que ocorrem nos casos de variação das cargas, representam situações nas quais o sistema ilhado exporta energia para a rede de distribuição.

Levando como possível a variação de cargas no decorrer de um dia normal de operação, alguns períodos do dia podem apresentar cargas totais tão baixas que permitem que o gerador exporte energia para a rede de distribuição. Para estes casos, as curvas baseadas na variação das cargas devem ser utilizadas como curvas de desempenho padrão para a determinação dos tempos de abertura correspondentes.

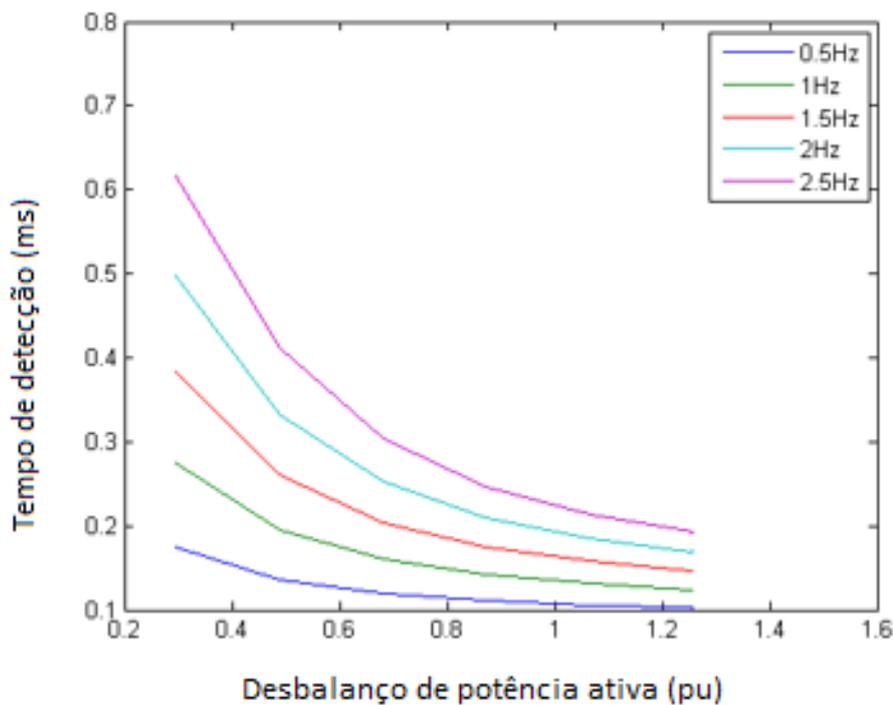
Esta conclusão será de grande utilidade em seções posteriores do trabalho, onde será necessária a construção de uma metodologia que utilize curvas de desempenho baseadas em variação de potência e cargas de maneira complementar.

O mesmo processo de validação da metodologia foi aplicado no caso de variação da potência ativa injetada pelo gerador síncrono. Então, para obter as curvas de desempenho considerando déficit de potência ativa, manteve-se a potência total das cargas no seu valor nominal e potência ativa do gerador foi variada de 0 até o seu valor máximo. Para cada variação e

para cada ajuste considerado, simulou-se um ilhamento pela abertura da chave CB1 e registrou-se o tempo que o relé detecta o ilhamento.

A figura 9 mostra algumas curvas de desempenho obtidas para o caso de déficit de potência ativa na provável ilha formada.

Figura 9 – Curvas de desempenho obtidas variando a potência gerada



Analisando as curvas apresentadas na Figura 9, observa-se, novamente, que quanto maior o desbalanço de potência ativa, mais rápido o relé detecta o ilhamento. Para casos que o desbalanço de potência é baixo, observa-se um tempo maior para a detecção do ilhamento.

Pela possibilidade de controle da geração no decorrer de um dia de operação, podem ocorrer situações em que a geração não consegue suprir as cargas do sistema. Para estes casos é necessário que o sistema importe energia da rede de distribuição. Levando isto em conta, as curvas baseadas na variação da geração devem ser utilizadas como curvas de desempenho padrão para a determinação dos tempos de abertura correspondentes nos casos de importação de energia.

4.4 Construção de curvas de desempenho padrões

Após a apresentação dos procedimentos necessários para a criação das curvas de desempenho e sua representação gráfica, o método pode ser aplicado na construção de duas curvas de referência, sendo uma variando as cargas e outra variando a potência gerada. A diferença agora é que, para as curvas de referência foram realizadas simulações com variação entre 0 e 1 (p.u) para 100 pontos de simulação. Essas curvas são representadas nas Figuras 10 e 11. Esta diferença de discretização permite obter curvas melhor desenhadas facilitando a visualização do comportamento.

Figura 10 – Curva de desempenho de referência variando as cargas

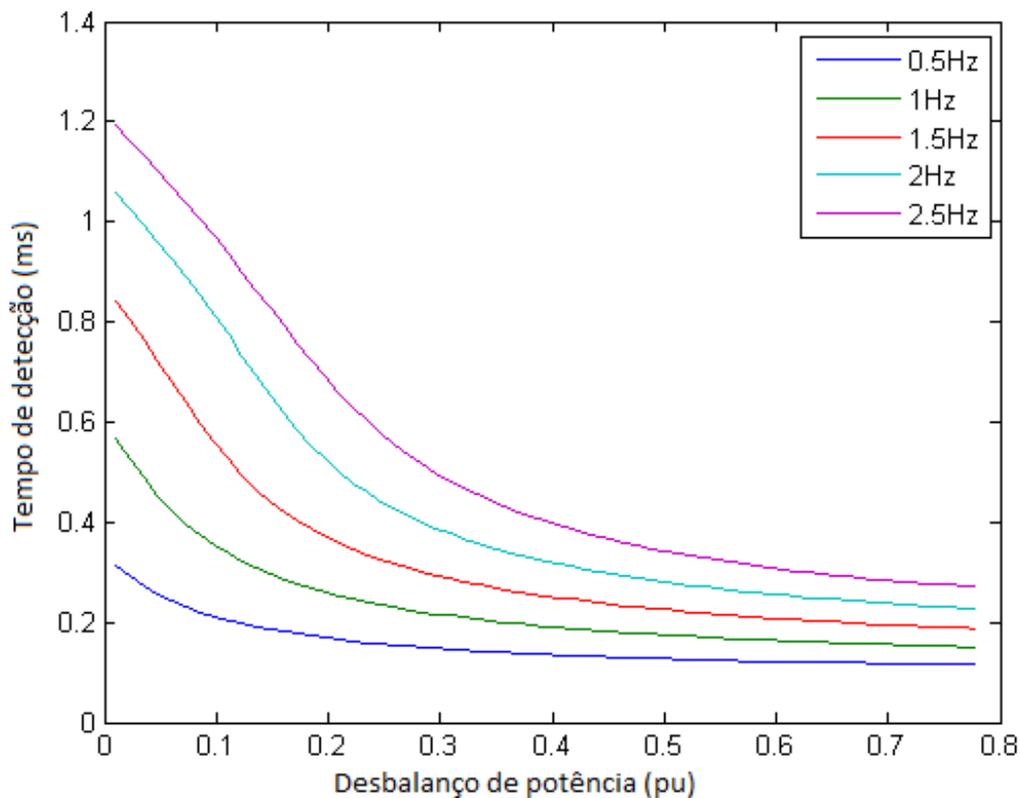
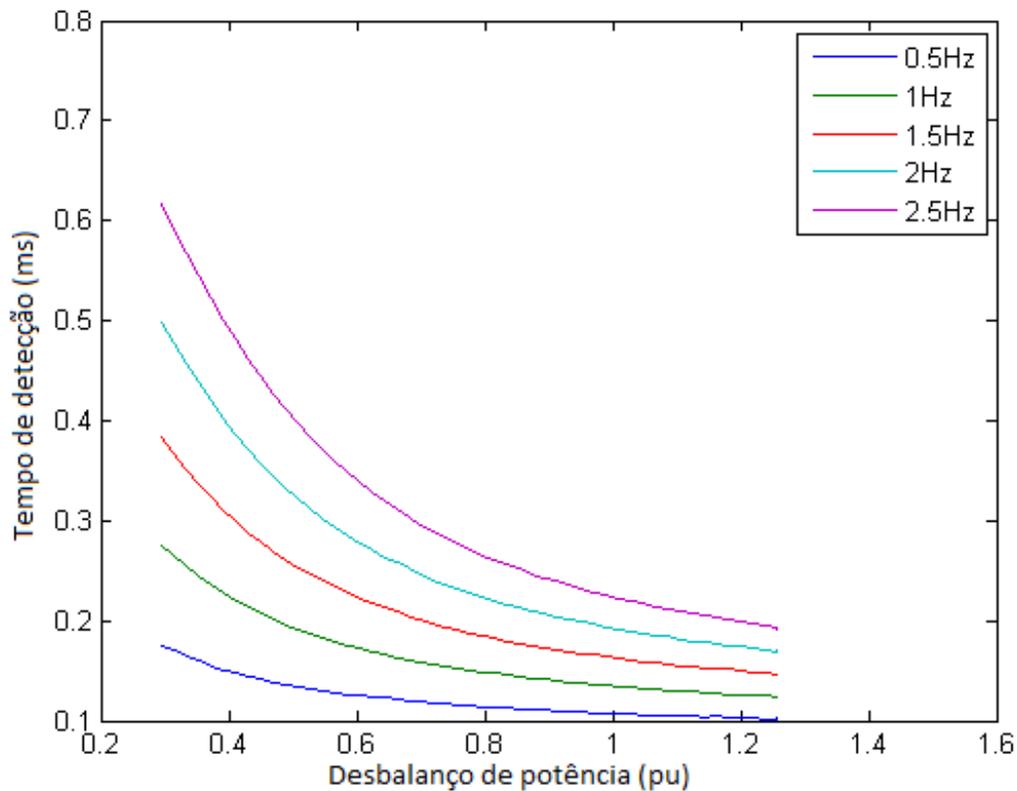


Figura 11 – Curva de desempenho de referência virando a potência gerada



Em ambas as curvas de referência pode-se analisar as características observadas entre o tempo de detecção e o desbalanço de potência ativa na ilha. Um ponto a ser analisado é a questão de como o ajuste de sub/sobrefrequência influencia no tempo de detecção. Para ajustes de menores valores em módulo, a detecção é muito mais rápida para todos os valores de desbalanço aplicáveis. O inverso ocorre para grandes ajustes de módulo.

4.5 Aproximação polinomial aos resultados das curvas

Tendo o intuito final de utilizar as curvas de desempenho para analisar ajustes para o relé de sub/sobrefrequência, foi considerada a aplicação de uma aproximação polinomial aos dados obtidos nas curvas de referência. Os resultados são apresentados nas Figuras 12e 13.

Figura 12 – Aproximação polinomial para a variação do coeficiente de potência das cargas.

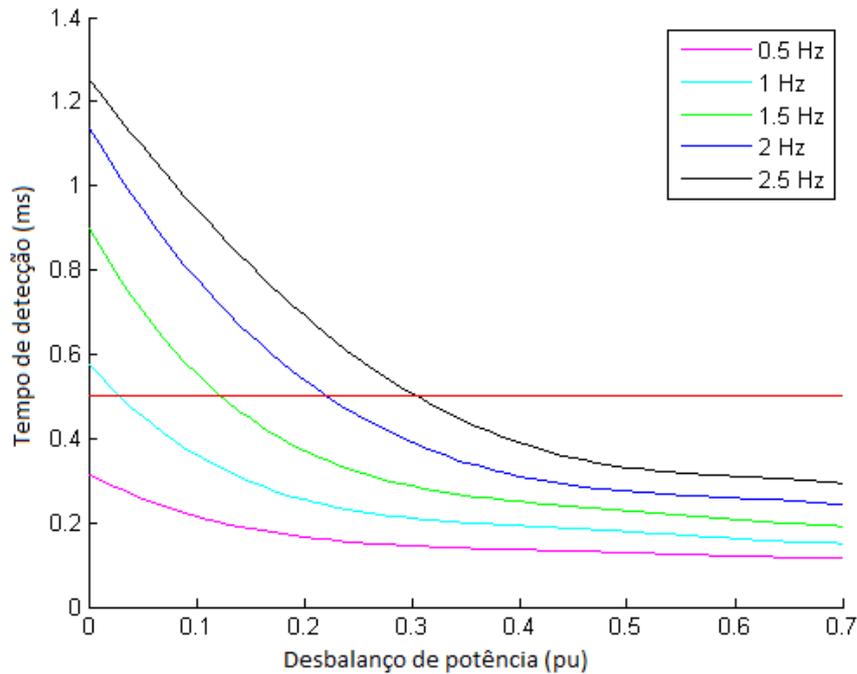
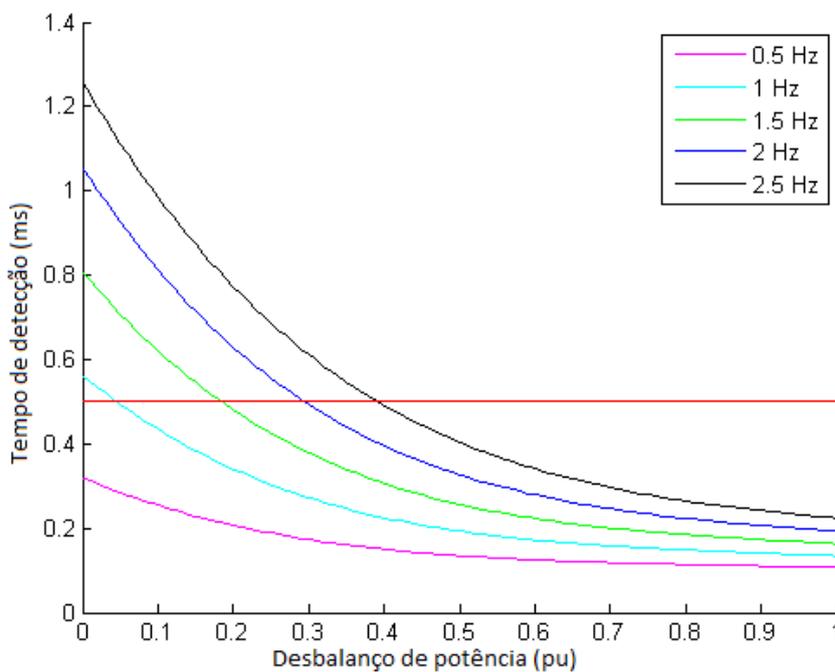


Figura 13 – Aproximação polinomial para a variação da potência de referência.



A aproximação polinomial, para um grau 3 de polinômio, foi obtida por meio de uma função inserida no ambiente de simulação aplicado. Esta função realiza uma aproximação polinomial através dos pontos fornecidos, nesse caso, pelo vetor de pontos da curva de desempenho. Tendo o polinômio resultante, pode-se utilizá-lo para encontrar os valores da função em diversos

pontos, auxiliando na maneira que aplicamos as curvas de desempenho dentro do ambiente de simulação para determinar os tempos de abertura.

É notável a grande semelhança entre os gráficos da curva de desempenho padrão do obtido utilizando a aproximação polinomial. Esta semelhança acrescenta muito na dinâmica das próximas simulações, permitindo analisar as curvas pelo limite superior de 0,5 segundos para abertura de forma automática. Assim, pode-se determinar quais ajustes são aplicáveis para um sistema em cada período do dia, considerando as variações por períodos das curvas de carga.

Analisando as curvas obtidas utilizando a aproximação polinomial no ambiente de simulação, percebe-se uma forte correlação entre seus perfis e sua dinâmica de atuação. Esta característica de similaridade permite que a metodologia de aproximações lineares seja utilizada na construção das curvas de desempenho, sendo estas aplicáveis no decorrer de todo o trabalho utilizando os polinômios obtidos.

4.6 Simulações do sistema baseadas em curvas de desempenho

A primeira etapa deste capítulo desenvolveu todo o conceito de curvas de desempenho, sua metodologia e aplicabilidade. Seguindo esta linha de pensamento, esta seção avançará no conceito de curva de desempenho, desenvolvendo uma aplicabilidade prática de como elas poderiam ser utilizadas para determinar o tempo de abertura de um relé em diversos momentos do dia, e como os ajustes reagem diferentemente em cada um desses períodos, sempre contando com o apoio das curvas de carga implementada. Para que fosse possível o avanço do desenvolvimento das curvas de desempenho, foi necessário o desenvolvimento dos dois grupos de simulações agregando as curvas de cargas. Uma das abordagens é obtida variando a potência ativa gerada pelo gerador síncrono e a outra variando a carga do sistema elétrico. O desenvolvimento, implementação e resultados destas abordagens serão demonstrados e discutidos a seguir.

4.7 Curvas de desempenho

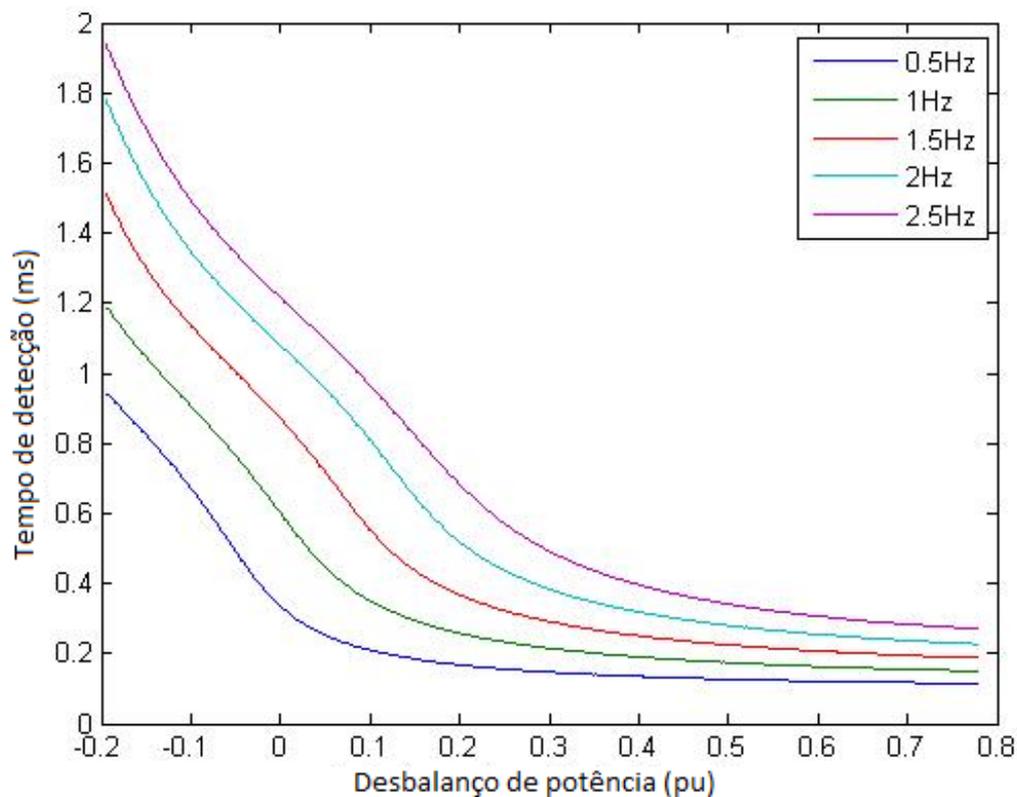
No processo de construção das curvas de desempenho, foram apresentadas duas maneiras de simular o sistema. Uma delas variando a carga do sistema entre 0 e seu valor máximo, e a outra variando a geração entre 0 e 1 p.u. Em ambos os casos, a motivação é simular excesso e deficit de potência ativa entre a ilha e a rede de distribuição.

4.7.1 *Curva de desempenho variando a carga do sistema*

Foram realizada uma simulação para a construção das curvas de desempenho com 1.000 pontos na variação das cargas, de 0 até seu valor máximo. Esta quantidade de pontos é justificável

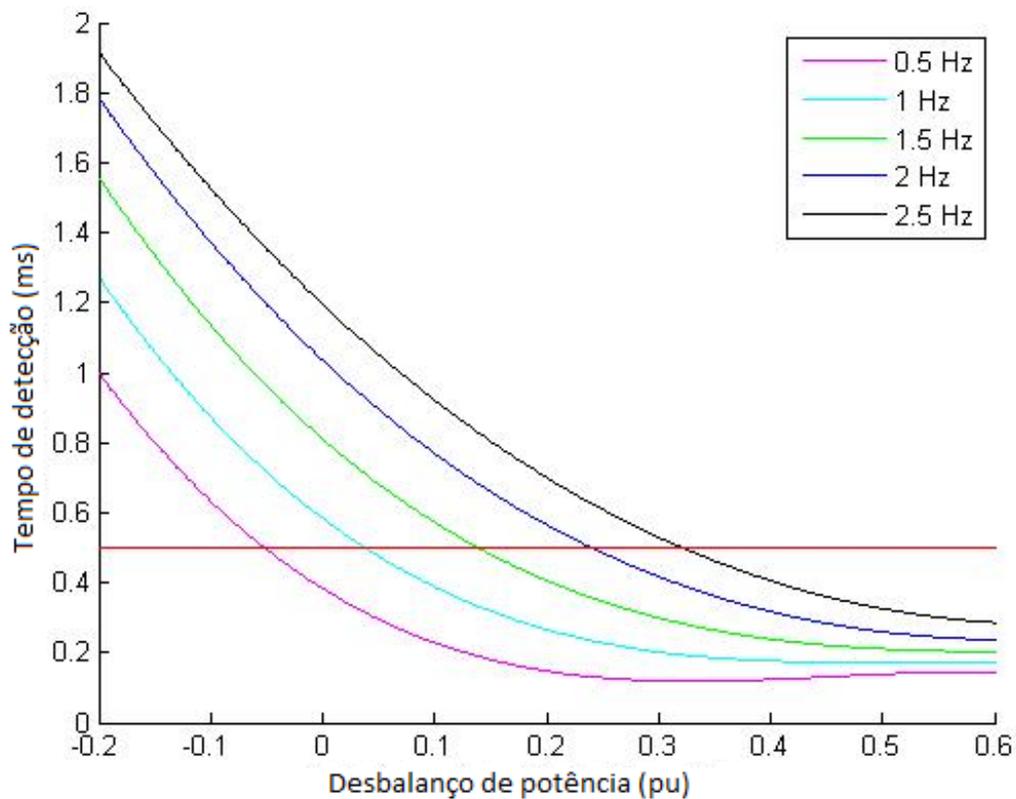
pois estes dados serão utilizados em uma aproximação polinomial no ambiente de simulação. A simulação utilizando 1.000 pontos da curva de desempenho variando as cargas está representada na Figura 14.

Figura 14 – Curvas de desempenho obtidas variando as cargas para 1.000 pontos de simulação.



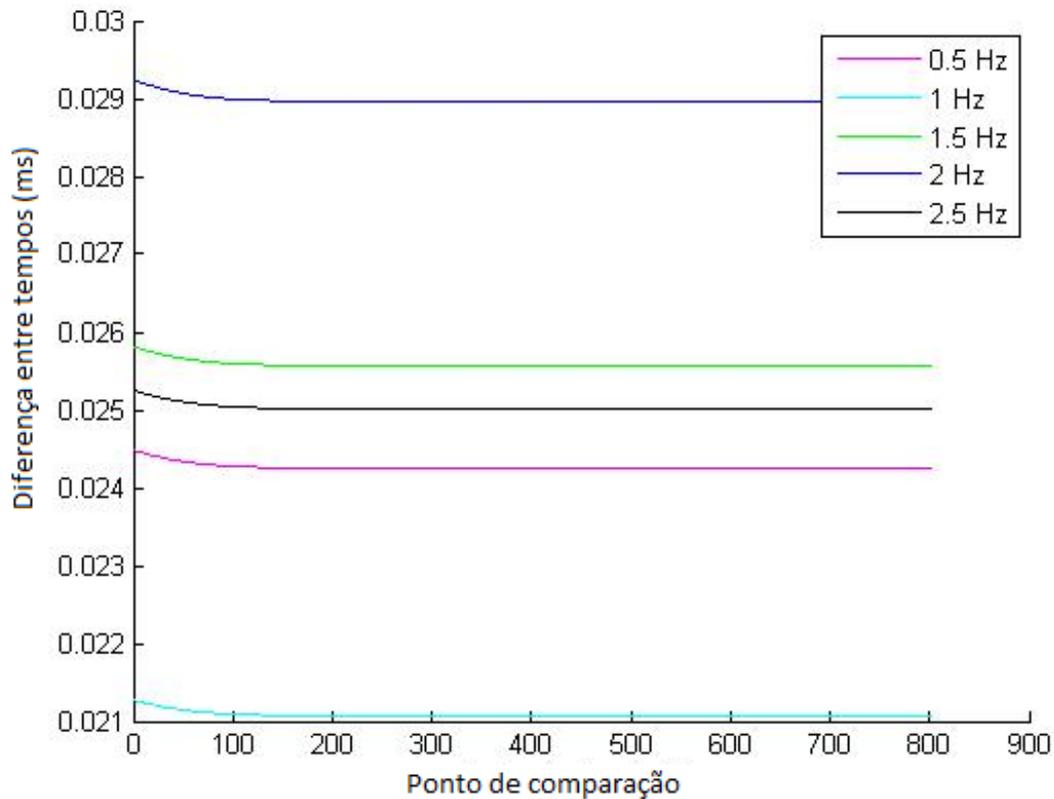
Como observado na Figura 14, a curva de desempenho para os casos de variação das cargas apresenta uma faixa de atuação entre -0,2 e 0,8 p.u, ou seja, a curva de desempenho prevê, nesta faixa, valores de tempo de abertura correspondentes a cada um dos 5 ajustes simulados. Com o intuito de utilizar a curva no modelo final de simulação, foi realizada a aproximação polinomial da curva de desempenho. A simulação utilizando 1.000 passos permite uma aproximação polinomial mais refinada, proporcionando maior qualidade na construção das curvas padrões baseadas na variação das cargas. As curvas pela aproximação polinomial estão representadas na Figura 15.

Figura 15 – Curvas de desempenho obtidas através da aproximação polinomial variando as cargas.



Para demonstrar a aplicabilidade dessas aproximações no escopo deste projeto, foi realizado um estudo dos erros relativos a cada curva de ajuste simulado. Como pode ser observado na Figura 16, os baixos erros em relação ao valor esperado permitem a utilização desta ferramenta. Um ponto de atenção é que este erro será admitido no momento de validação da metodologia como uma fonte de erro do modelo.

Figura 16 – Erro obtido ao utilizar a aproximação polinomial variando as cargas.

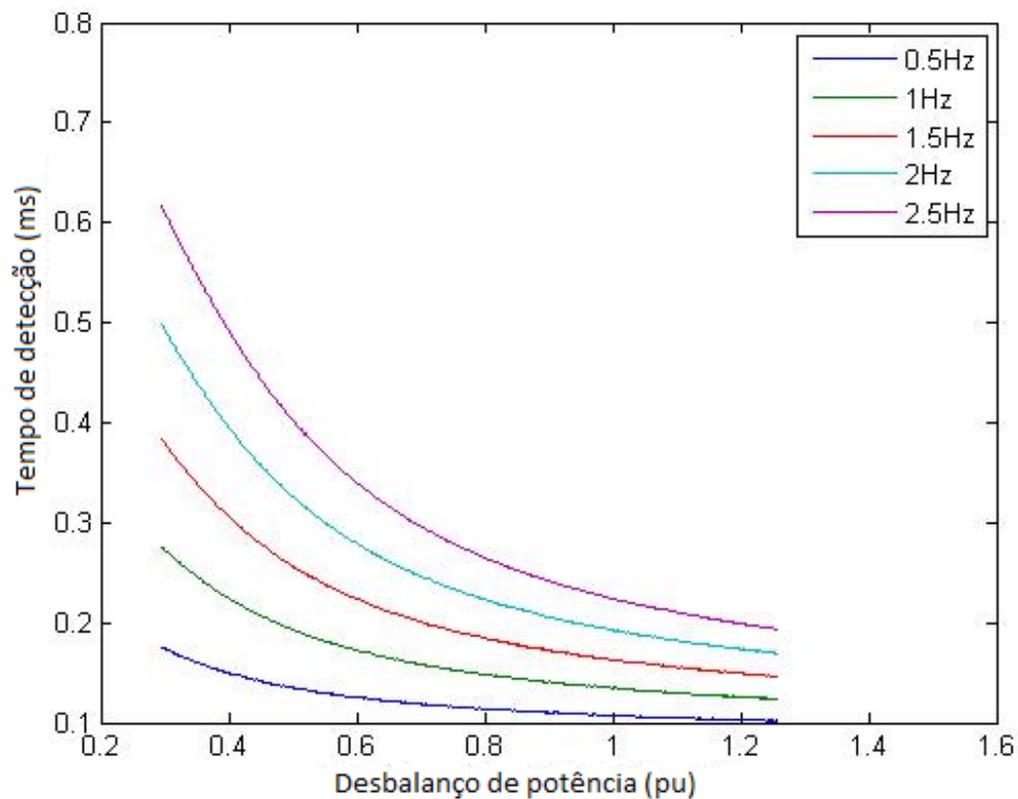


4.7.2 Curva de desempenho variando a potência gerada

A segunda abordagem no sentido de construção das curvas de desempenho para o modelo final de simulação é baseada na variação da potência gerada pelo gerador síncrono. Neste caso, a diferença das potências entre a ilha e o sistema de distribuição é obtida baseada na ideia que o gerador têm sua potência de geração controlada. No caso de uma geração máxima de sua potência, a diferença de potência ativa vista no disjuntor CB1 seria dada pela potência ativa do gerador menos as cargas do sistema, que, neste caso, foram consideradas constantes mantendo as cargas em seus valores máximos. Desta maneira, variando o valor da potência gerada nas simulações entre 0 e seu valor máximo, constroem-se curvas para os ajustes estudados em diversos valores de desbalanço de potência que, conseqüentemente, são representados nos tempos de detecção do relé de detecção de ilhamento.

Como no caso anterior, variando as cargas do sistema foi construída uma curva variando a potência gerada de 0 a seu valor máximo, considerando 1.000 pontos de simulação demonstrada na Figura 17.

Figura 17 – Curvas de desempenho obtidas variando a potência gerada para 1000 pontos de simulação.



Analisando as curvas de desempenho construídas, podemos observar que ela cobre uma faixa de cerca de 0,3 p.u até cerca de 1,3 p.u de desbalanço de potência ativa. Como no caso da variação das cargas, foi realizada a aproximação polinomial das curvas no ambiente de simulação. A representação das aproximações polinomiais para cada ajuste está na Figura 18.

Pode-se analisar a similaridade entre a curva simulada e a obtida por meio da aproximação polinomial. Para demonstrar esta similaridade, foi obtida a curva de erro entre os tempos de detecção, representada na Figura 19.

Figura 18 – Curvas de desempenho obtidas através da aproximação polinomial variando a potência gerada

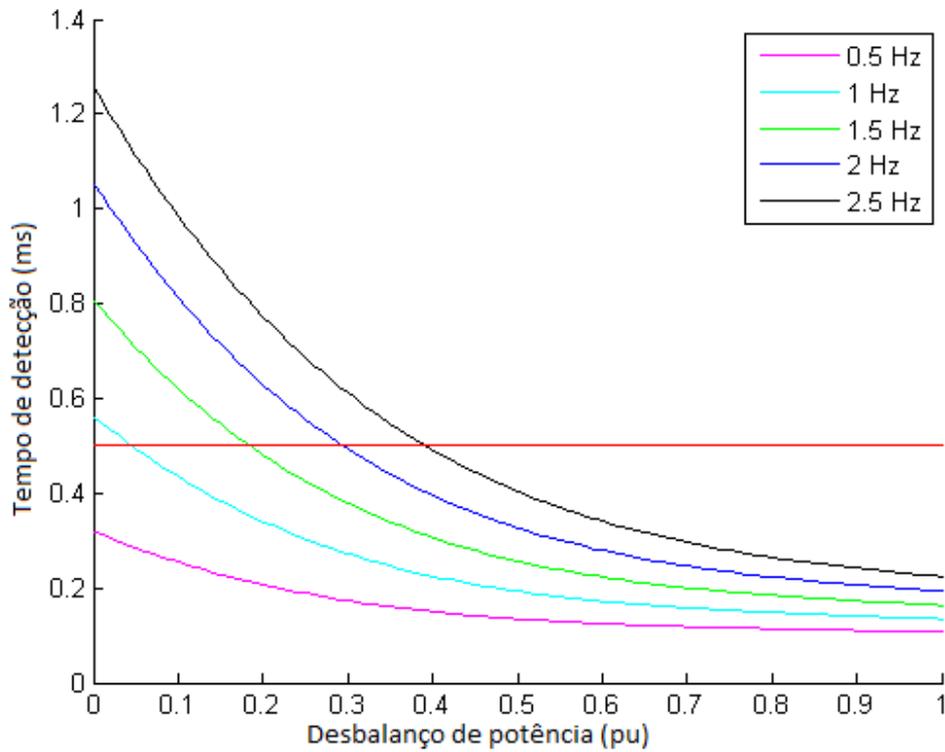
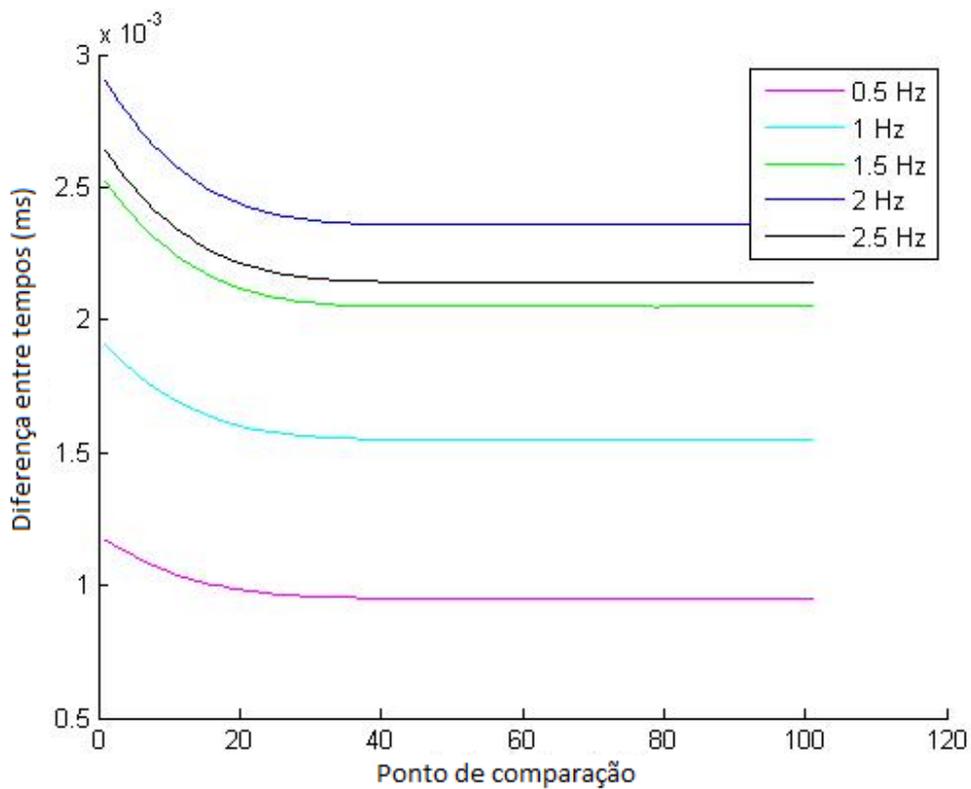


Figura 19 – Erro obtido ao utilizar a aproximação polinomial variando a potência gerada

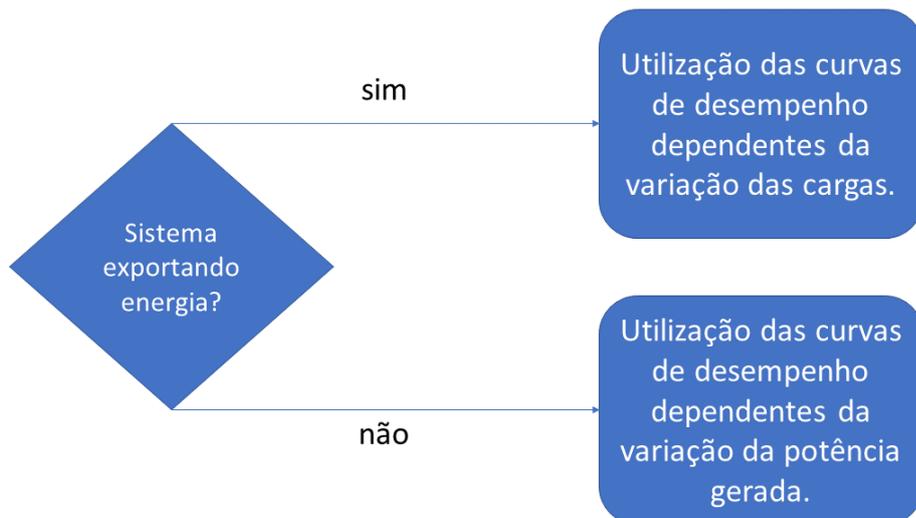


Analisando a curva com os erros entre as metodologias, observa-se um valor baixo para todos os desbalanços simulados. Por essa razão, pode-se considerar a aplicabilidade das aproximações polinomiais no modelo final que irá determinar os tempos de abertura.

Realizando um paralelo entre os dois tipos de curvas de desempenho construídas, pode-se analisar alguns pontos interessantes. O primeiro ponto diz respeito à faixa de abrangência de cada um dos conjuntos de curvas, no caso da variação das cargas do sistema. Têm-se ocorrências de valores de desbalanço de potência ativa menores que zero, ocorrendo em casos nos quais a eventual ilha está exportando energia para a rede de distribuição. Ou seja, a geração do gerador distribuído ultrapassa o consumo das cargas da ilha e envia o excedente de energia para a rede de distribuição. Este fato é inerente à construção desta família de curvas. Por isto, propõe-se que elas sejam utilizadas nos casos que a rede exporte energia para o sistema de distribuição. Já as curvas construídas variando a potência gerada, são mais indicadas para casos nos quais a ilha está consumindo energia do sistema, ou seja, o gerador não consegue suprir as cargas e importa a energia necessária da rede de distribuição.

O segundo ponto de atenção é a possibilidade de utilização das curvas em conjunto no modelo final. Neste caso realiza-se o ajuste das curvas de desempenho baseadas na variação das cargas para o caso que a ilha exporta energia, e a curva de variação da potência gerada nos casos que a ilha importa energia do sistema de distribuição. Uma representação desta proposição é ilustrado pelo fluxograma da Figura 20.

Figura 20 – Fluxograma de escolha entre as curvas de desempenho



A próxima etapa do trabalho será dividida em dois capítulos. O capítulo 5 diz respeito à utilização das curvas de desempenho para determinar o tempo de abertura do relé. Já no capítulo 6 realiza-se a simulação do sistema sem a utilização das curvas de desempenho. Porém,

foram consideradas as curvas de carga e a metodologia de determinação dos tempos de abertura utilizadas para determinar as curvas de desempenho na primeira etapa do trabalho.

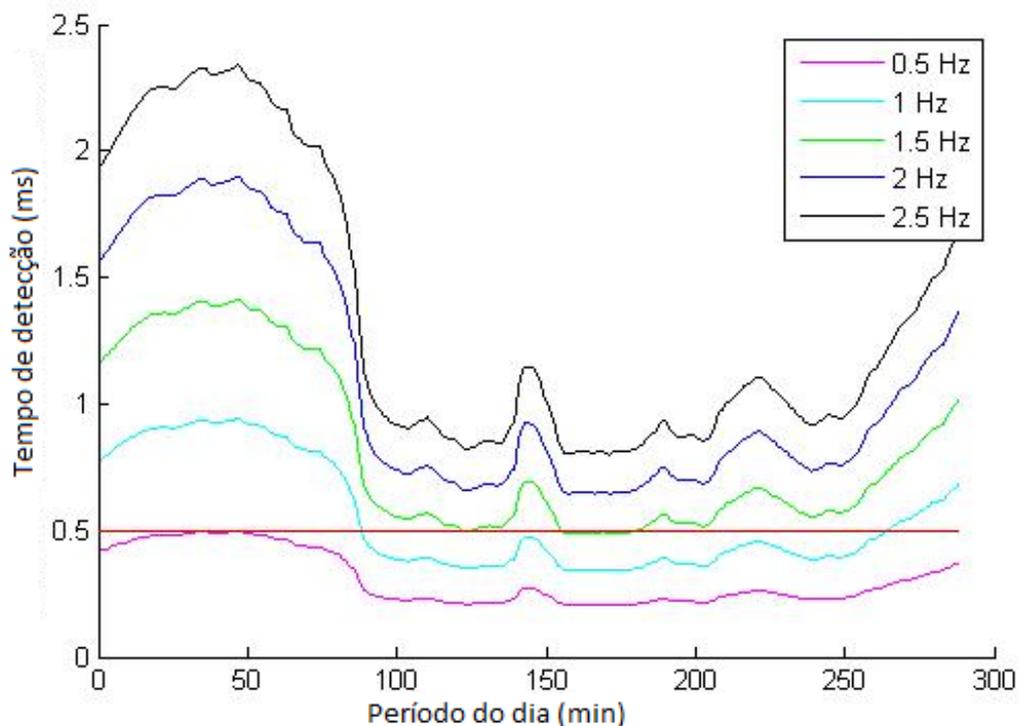
METODOLOGIA DE DETERMINAÇÃO DOS TEMPOS DE ABERTURA UTILIZANDO CURVAS DE DESEMPENHO.

5.1 Obtenção dos tempos de abertura utilizando curvas de desempenho obtidas com variação da potência de geração

A primeira etapa da proposta consiste em analisar a simulação feita apenas com a curva de desempenho obtida na variação da potência de geração, representada na Figura 21.

Para obter estas curvas, fez-se o uso das curvas de carga inseridas em cada bloco de carga do sistema da Figura 1. Considerando a potência do gerador fixa em 1 pu, foi-se percorrendo cada ponto da curva de carga e calculou-se o desbalanço de potência ativa. Com este valor calculado, utilizou-se a curva de desempenho da Figura 18 para determinar os tempos de detecção para cada ajuste considerado.

Figura 21 – Simulação dos tempo de abertura utilizando a curva de desempenho construída variando a potência de geração



Pode-se perceber pela Figura 21 que ocorre um comportamento muito diferente dos tempos de abertura no decorrer do dia, para cada um dos ajustes do relé. Para valores de ajustes de frequência mais elevados, os tempos de detecção são maiores, no entanto, a chance de ocorrência de falsos positivos é menor.

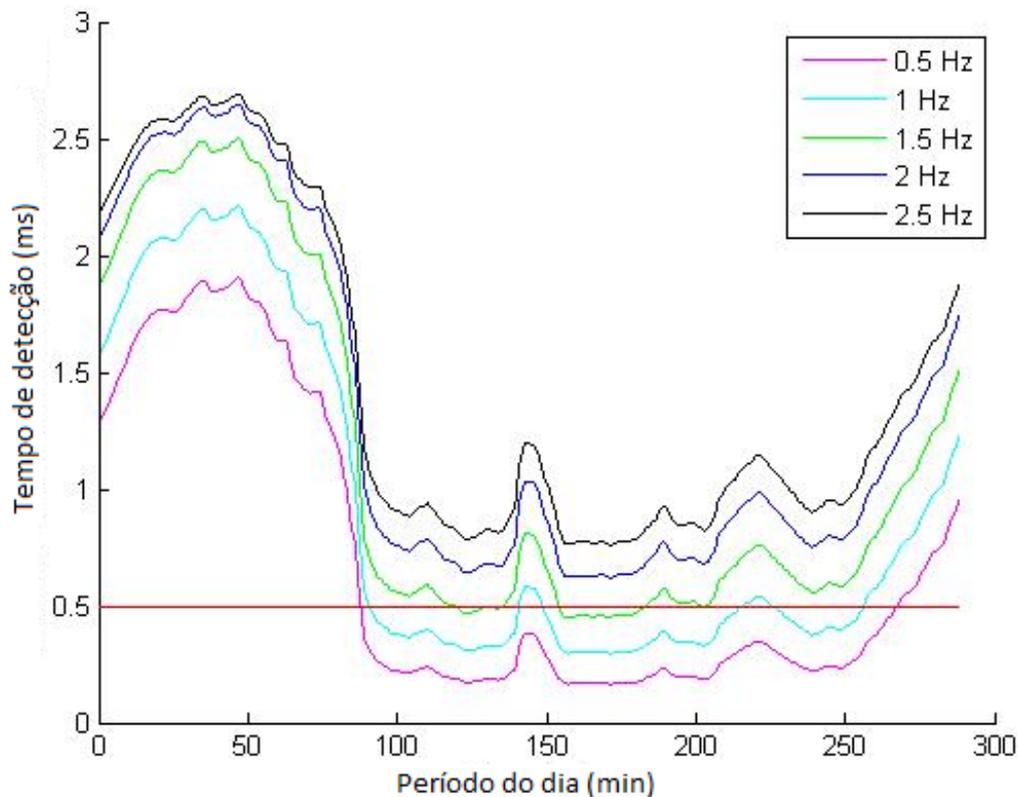
Outro ponto a ser notado é o fato de períodos nos quais as cargas apresentam valores muito pequenos (frequentemente na madrugada), os tempos de abertura estão muito elevados. Esta observação carece de um estudo mais aprofundado sobre a operação com cargas leves, e como se comportam outros parâmetros do sistema como tensão nos nós e variabilidade da frequência. Esses estudos serão propostos nas sugestões de trabalhos futuros e revisitados quando necessário.

5.2 Obtenção dos tempos de abertura utilizando curvas de desempenho obtidas com variação das cargas do sistema

A segunda etapa da proposta é a simulação utilizando curvas de desempenho construídas com a variação das cargas do sistema. Como dito anteriormente, estas curvas de desempenho abrangem uma faixa maior de desbalanços de potência, o que será de boa aplicabilidade para os

casos em que o desbalanço de potência for negativa, ou seja, quando o sistema está exportando energia. A representação dos resultados simulados com esta família de curvas baseadas na variação das cargas está na Figura 22. De forma semelhante ao realizado na seção anterior, a Figura 22 foi obtida mantendo-se a potência do gerador em 1 pu e, para cada instante da curva de carga, foram obtidos os desbalanços de potência ativa. Em seguida foi utilizada a curva de desempenho da Figura 17 para obter os tempos de detecção do ilhamento.

Figura 22 – Simulação dos tempos de abertura utilizando as curvas de desempenho obtidas com variação de carga.



Novamente, percebe-se pela Figura 22 a ocorrência de um comportamento muito diferente dos tempos de abertura no decorrer do dia para cada um dos ajustes do relé. Para valores de ajustes mais elevados os tempos de detecção são maiores. No entanto a chance de ocorrência de falsos positivos é menor.

Observam-se novamente tempos muito elevados em períodos da madrugada, o que desvincula este comportamento da variação da potência de geração, e acrescenta a suspeita de análise de outros parâmetros elétricos, como mencionados anteriormente.

Algumas conclusões são retiradas após a realização das duas construções de curvas. O primeiro ponto de atenção é em relação ao comportamento das curvas nos momentos do dia correspondentes à madrugada, utilizando a variação das cargas. Nestas horas, têm-se valores altos de tempos de abertura, algo que também ocorreu no caso das curvas de variação de geração, mas com uma intensidade menor. Pode-se suspeitar que esta diferença é parcialmente dada pelo

fato de que as curvas baseadas em variação das cargas apresentam pontos de simulação com valores de desbalanço de potência negativos. Assim, a obtenção dos resultados para esta região seria mais verossímil utilizando as curvas baseadas em variação de carga.

O segundo ponto de atenção diz respeito ao fato de as curvas obtidas utilizando a variação das cargas resultam em tempos de detecção um pouco mais alto do que as curvas utilizando variação de geração. Algumas suspeitas para este comportamento estão relacionadas com diferenças entre o comportamento das cargas ao serem variadas de maneira linear e no caso da geração. As utilizações das aproximações lineares tendem a influenciar nessas diferenças. Apesar disto, o perfil muito similar das curvas permite que estas sejam fundidas em um modelo no qual a característica de exportar ou importar energia seja determinante para utilizar uma ou outra curva.

Após ser discutida de maneira superficial as diferenças entre as duas abordagens e como cada uma delas é melhor aplicável a uma faixa de desbalanço de potência, um passo natural seria realizar simulações com as duas curvas operando de maneira conjunta.

Para realizar esta governança de dados de quando utilizar cada uma das curvas, foi desenvolvido no código uma estrutura lógica de decisão. Observando as curvas de desempenho construídas foi determinado, que para valores negativos de desbalanço de potência será utilizada a curva de desempenho obtida pela variação das cargas, e que para valores de desbalanço de potência maiores ou iguais a zero, serão utilizadas as curvas de desempenho baseadas na variação da potência gerada. Esta tomada de decisão lógica leva em conta a própria diferença estrutural das curvas de desempenho, como já foi mencionado no decorrer do trabalho.

Dito isto o sequenciamento final do modelo de simulação fica evidenciado como sendo: Determinação e fixação dos parâmetros iniciais do sistema, simulação do sistema elétrico para cada um dos períodos, obtenção do resultado de desbalanço das potências analisadas das simulação do sistema, direcionamento lógico nos casos de desbalanço positivo e negativo. Para a decisão lógica tomada é obtido o tempo de abertura com a curva de desempenho correspondente. Este valor é salvo e o sistema vai para o próximo período de simulação do dia.

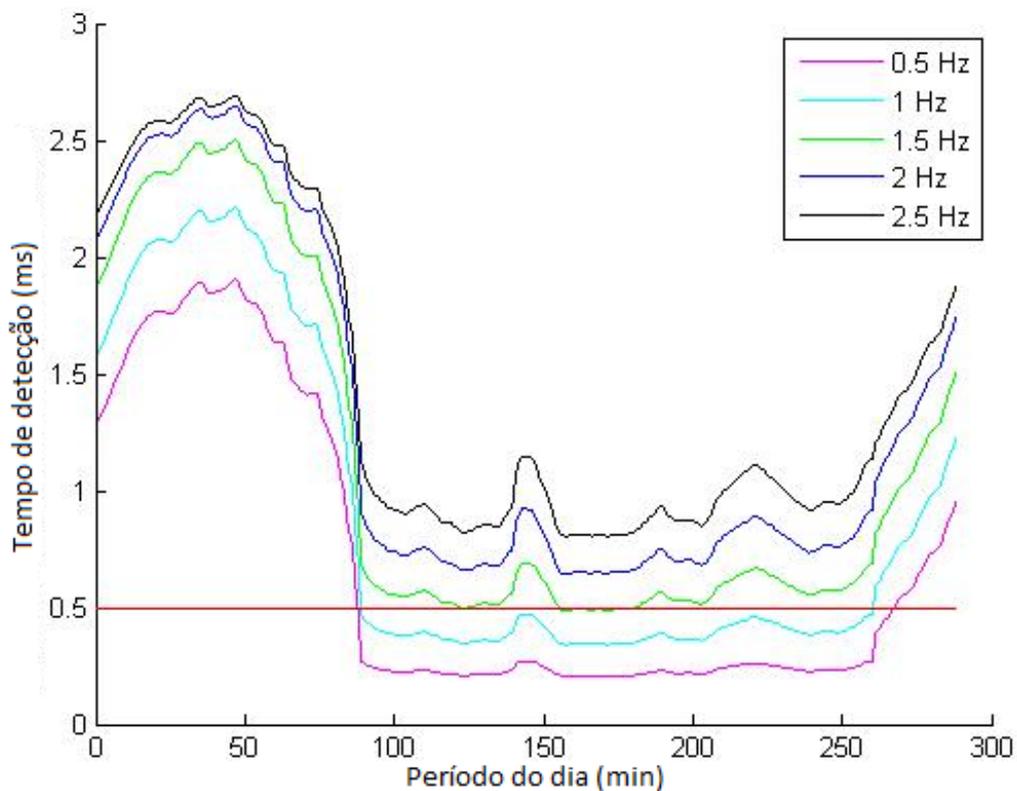
O fluxograma do modelo final de determinação dos tempos de abertura via curvas de desempenho é representado na Figura 23.

Figura 23 – Fluxograma utilizando curvas de desempenho baseadas em cargas e potência gerada de maneira complementar.



Como descrito no parágrafo anterior e representado no fluxograma da Figura 23, foram realizadas simulações evidenciadas na Figura 24.

Figura 24 – Tempos de abertura utilizando as curvas de desempenho baseadas na geração e cargas e trabalhando de maneira complementar



Uma observação válida é que o tempo de simulação não é significativamente alterado pelo processo de tomada de decisão e seleção da curva de desempenho mais adequada. Na figura foi aplicada a tomada de decisão entre as curvas obtidas com variação das cargas e com variação da potência gerada, de maneira que cada curva estará associada a uma região de valores do fluxo de potência, sendo adequada para casos que o sistema exporte ou importe energia.

Observando o resultado da simulação com uso das duas curvas de desempenho, verifica-se o mesmo perfil de dados obtidos para cada uma das curvas de desempenho. Percebe-se também uma variação muito maior entre os períodos do dia, pelo fato de cada uma das curvas representar melhor uma situação de cargas entre a ilha e a rede de distribuição.

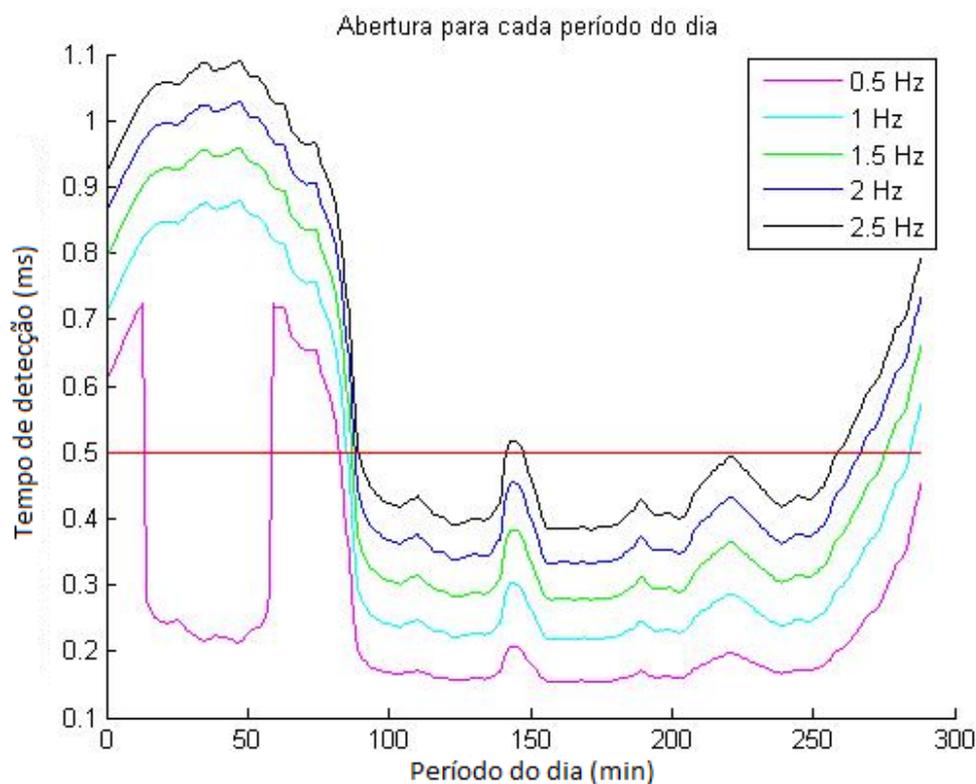
Um ponto interessante é o fato dos picos de demandas estarem nos mesmos períodos do dia obtidos nas outras simulações. O mesmo ocorre para os casos de ajustes que ficam a maior parte do dia abaixo da faixa de 500 ms. Por se tratar de um processo tomada de decisão que é feito a cada iteração do sistema, avaliando cada uma das curvas de desempenho, o método que utiliza as duas curvas de maneira complementar pode ser considerado mais assertivo que aquele que utiliza cada uma das curvas separadamente.

Para a validação dos métodos utilizando curvas de desempenho, foi proposto um conjunto de simulações e estudos focados no comportamento do tempo de abertura para um relé real, em um sistema de distribuição. As simulações de um sistema real são de grande importância para complementar a metodologia e modelo baseado em curvas de desempenho, aproximando os conceitos estudados com aqueles observados em redes que apresentam configurações de geração distribuída com geradores síncronos.

SIMULAÇÕES PARA COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DE UM SISTEMA SIMULADO COM CURVAS DE CARGA REAIS.

Como demonstrado no capítulo anterior, é necessário realizar uma verificação das simulações até agora efetuadas utilizando as curvas de desempenho. O questionamento desta etapa seria: Como é possível validar as simulações sendo que só existe acesso a curva de carga da rede de distribuição e os dados da curva de desempenho? Uma solução possível seria utilizando os blocos de carga com variações por períodos no decorrer do dia e realizar a simulação de todo o sistema elétrico como na etapa de construção das curvas, porém, neste caso realizando uma simulação para cada período do dia. Então, para cada valor da curva de carga e para cada ajuste, foi simulado umilhamento por meio da abertura de CB1, e registrou-se o tempo de detecção do ilhamento, mantendo-se a potência do GD fixa em 1 pu. Os resultados são apresentados na Figura 25.

Figura 25 – Simulação dos tempo de abertura utilizando a simulação de um sistema simulado com curvas de cargas reais.



Pode-se observar na Figura 25, que os tempos de abertura apresentam variações relacionadas ao ajuste específico do relé e ao período do dia analisado, comportamento já esperado devido às diferenças de carga em cada período do dia, e aos estudos realizados com as curvas de desempenho. É válido notar que nos períodos da madrugada o tempo de abertura foi muito acima dos valores do restante do dia, comportamento também já presenciado nas simulações utilizando as curvas de desempenho. Isto leva à hipótese de que o sistema elétrico, na prática, apresenta este comportamento nestes horários. Retornando à curva de carga total, pode-se perceber que, na madrugada, a carga do sistema é baixa o que pode culminar neste comportamento inesperado, que abre espaço para estudos complementares desta região de cargas leves.

Prosseguindo nas horas do dia simuladas no sistema, é notável a diminuição do tempo de abertura, o que dá a entender que os tempos de detecção retornaram a normalidade fora da faixa de exceção do período da madrugada. Por volta de 12 horas, ocorre um pico de demanda que corresponde a um aumento significativo nos tempos de detecção necessários. Outro ponto de atenção é por volta das 19 horas, onde ocorre um segundo pico de demanda e tempo de detecção, influenciado pelas cargas residenciais. Já no fim do dia, percebe-se um acréscimo nos tempos de detecção e um comportamento semelhante ao observado nos períodos da madrugada, fato que já foi discutido anteriormente e está em concordância com o observado na metodologia utilizando curvas de desempenho.

Realizando um detalhamento inicial das curvas obtidas com o sistema simulado com parâmetros reais, são notáveis alguns pontos de convergência em relação à metodologia de curvas de desempenho. As diferenças entre as metodologias serão discutidas nas próximas seções.

6.1 Comparativo entre os tempos de abertura do sistema simulado com parâmetros reais e os obtidos via metodologia das curvas de desempenho

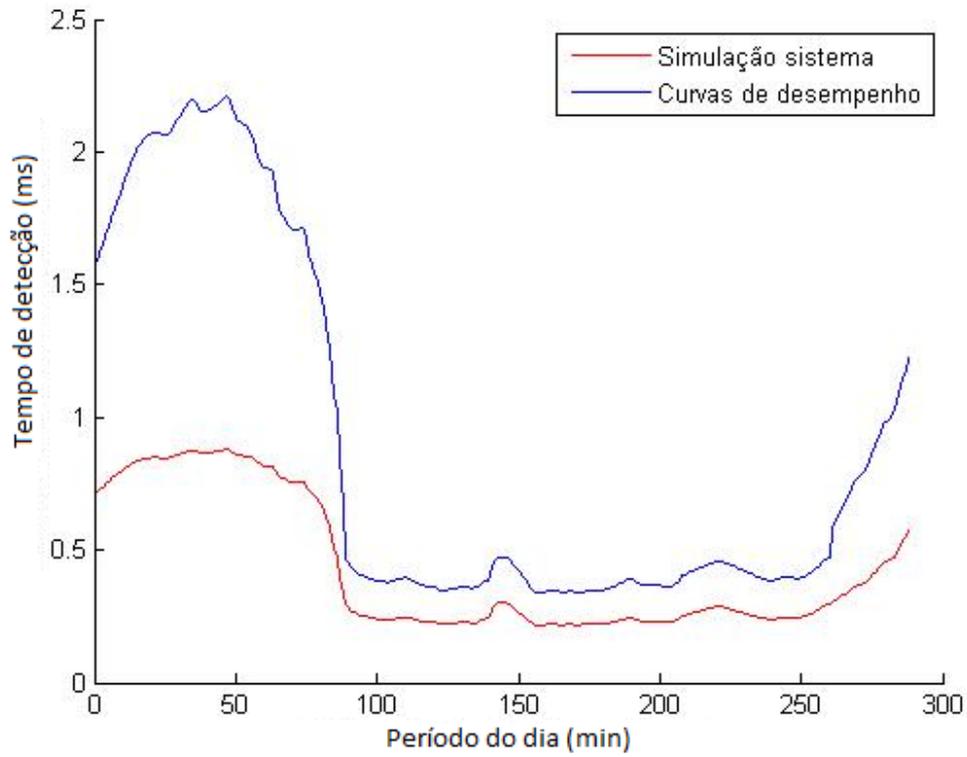
O próximo passo deste trabalho busca julgar os objetivos alcançados e como avaliar um incremento dos estudos refinaria as análises obtidas.

Com intuito de estabelecer um comparativo entre as abordagens (utilizando curvas de desempenho ou não), seus gráficos serão construídos conjuntamente, proporcionando o comparativo.

6.2 Análise comparativa entre as abordagens de obtenção do tempo de detecção

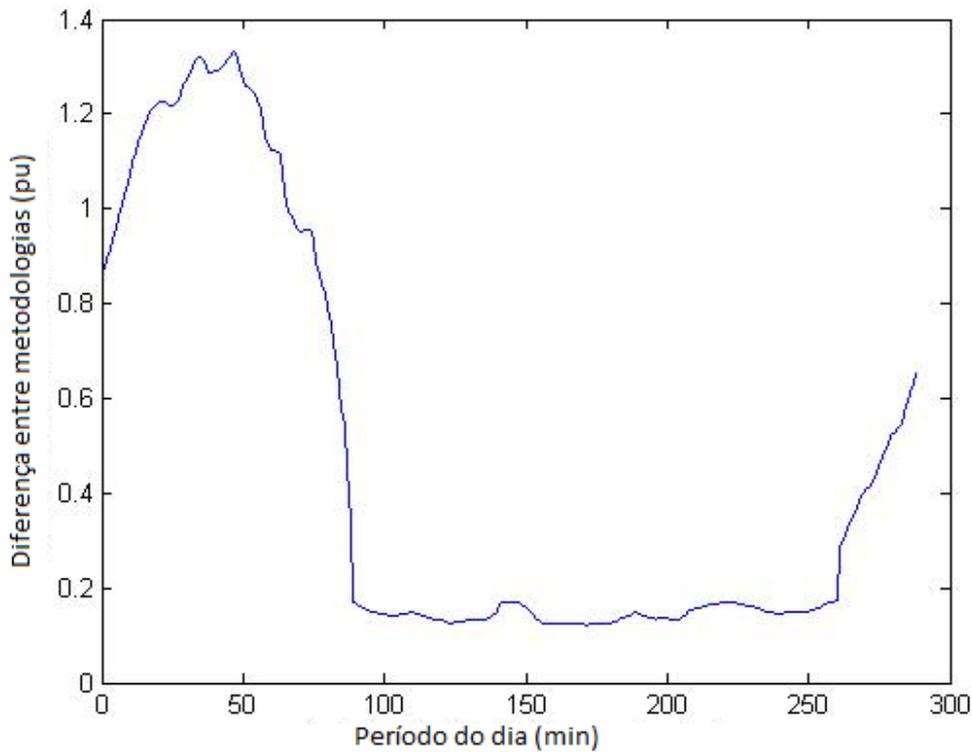
Esta seção busca apresentar as diferenças de resultados entre as metodologias utilizadas no trabalho, por meio do comparativo entre seus resultados gráficos. Para exemplificar as diferenças existentes, foi escolhido um ajuste entre os cinco ajustes simulados, que neste caso, foi o de 1 Hz, mantendo a geração em seu valor máximo. A primeira representação gráfica apresenta os dois resultados, como pode ser visualizado na Figura 26.

Figura 26 – Diferença entre as metodologias de curva de desempenho e simulação do sistema.



O segundo gráfico busca demonstrar o erro apresentado entre as metodologias para o ajuste de relé de 1 Hz. O erro é apresentado em termos da diferença dos tempos esperados de detecção, na Figura 27.

Figura 27 – Erro entre as metodologias em termos da diferença de tempo de detecção.



Observando as Figuras 26 e 27 percebe-se uma diferença significativa entre as metodologias para os casos de períodos da madrugada. Isso se deve às características da curva de desempenho nesses períodos e como estas resultam nos tempos de detecção. Para períodos posteriores a manhã observa-se uma redução significativa entre a diferença das metodologias. O gráfico de erro da Figura 29 busca enunciar estas diferenças em termos do tempo de detecção, sendo visível uma faixa de valores próximos a 0,2 segundos em períodos fora da madrugada.

O próximo conjunto de gráficos representa o comparativo das metodologias, mantendo a escolha do ajuste de 1 Hz, mas reduzindo a geração em (ambas as metodologias) para 0,5 p.u do valor de geração máxima. Os gráficos estão representados nas Figuras 28 e 29.

Figura 28 – Diferença entre as metodologias da curva de desempenho e simulação do sistema para 0,5 da geração máxima.

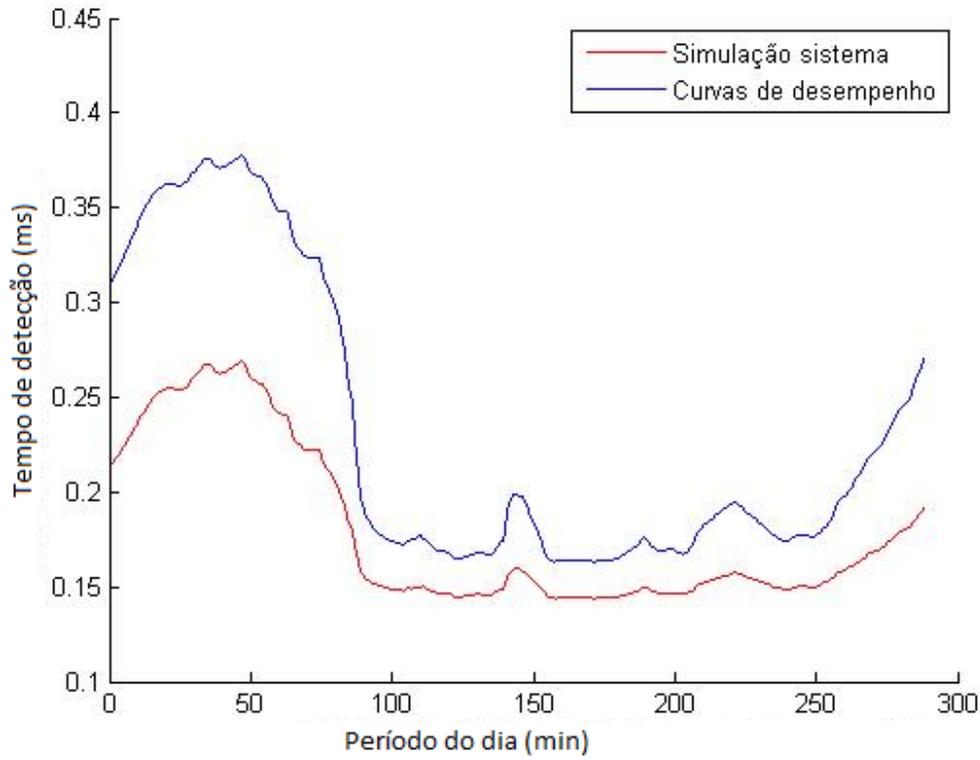
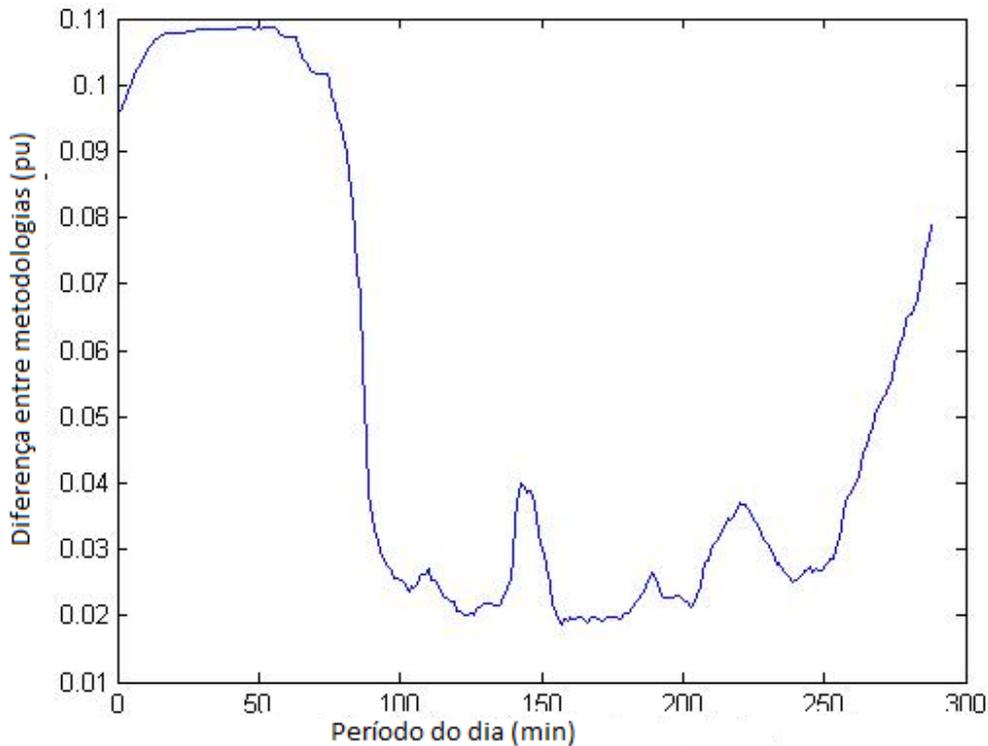


Figura 29 – Erro entre as metodologias em termos da diferença de tempo de detecção, para 0,5 da geração máxima.



Observando os gráficos do segundo grupo, é possível observar uma redução nos tempos de abertura devido à redução na geração. O ponto que mais chama atenção está no gráfico do erro entre as metodologias, que apresenta um valor de erro significativamente menor do que no caso da geração máxima. Um ponto de atenção continua sendo o período da madrugada, o qual apresenta tempos de abertura muito superior aos demais períodos.

Neste mesmo sentido, o próximo grupo de simulações será obtido para uma geração ainda menor, com um valor de 0,3 da geração máxima. Esses novos gráficos estão representados pelas Figuras 30 e 31.

Figura 30 – Diferença entre as metodologias da curva de desempenho e simulação do sistema, para 0,3 da geração máxima.

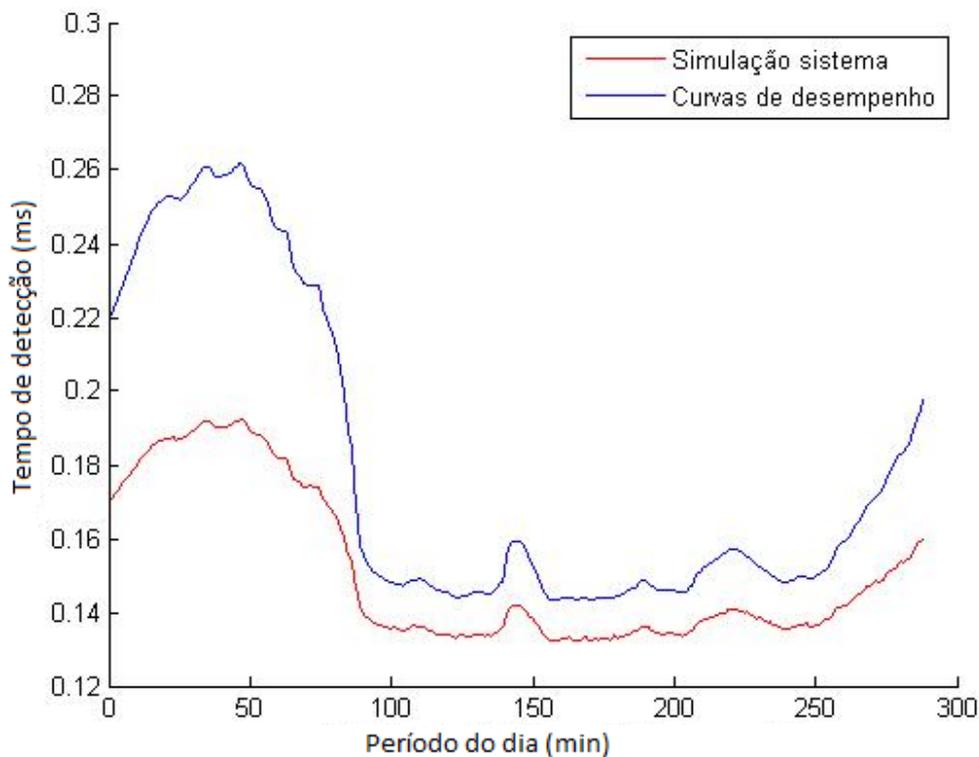
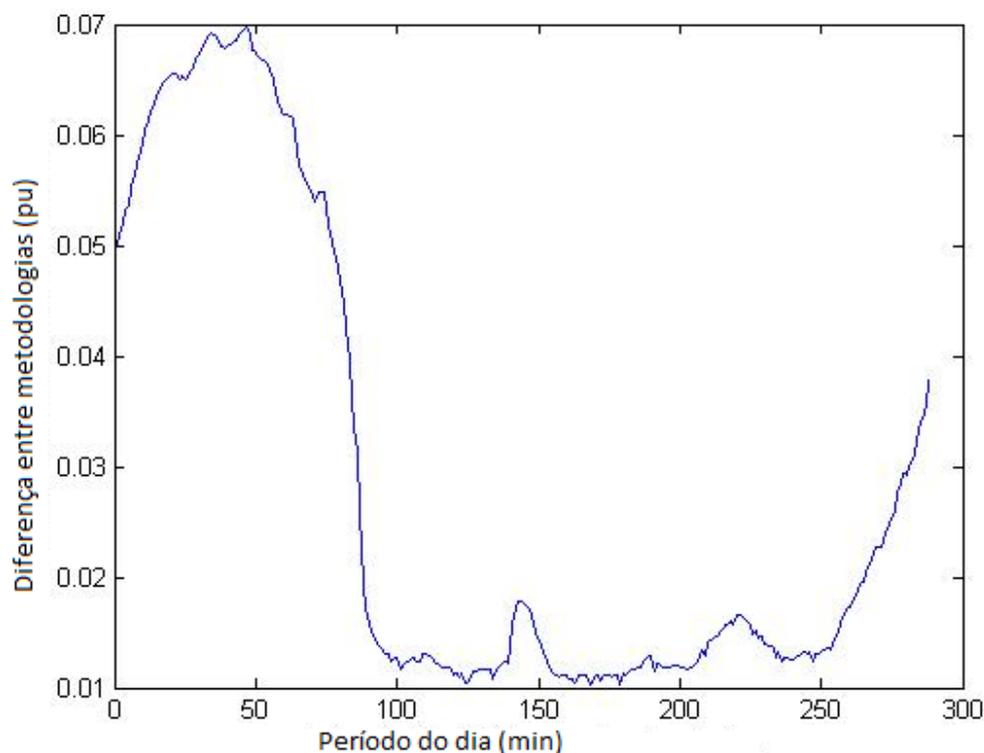


Figura 31 – Erro entre as metodologias em termos da diferença de tempo de detecção para 0,3 da geração máxima.



Pode-se observar que, nos casos utilizando uma geração de 0,3 p.u da máxima, os tempos de detecção do ilhamento caem ainda mais em relação a gerações superiores. O mesmo comportamento de queda ocorre para o erro entre as metodologias, o que leva a uma conclusão que, para gerações menores a metodologia das curvas de desempenho se aproxima dos resultados obtidos nas simulações do sistema utilizando parâmetros reais. Apesar da redução das taxas de erros para gerações menores, o período da madrugada continua sendo problemática metodologia, reforçando a necessidade de um enfoque nesta área de estudo.

Um ponto de atenção observado nos gráficos das diferenças é que a metodologia das curvas de desempenho apresenta sempre tempos superiores em relação à simulação do sistema. Esta conclusão vai ao encontro da ideia que, apesar, das diferenças, a metodologia proposta sempre atua de maneira conservadora em relação a simulação do sistema com parâmetros reais.

Estas últimas análises levam ao questionamento dos fatores que influenciaram para a divergência entre as respostas das duas abordagens desenvolvidas. Esta divergência é dada por um erro nas análises, o que não tira o prestígio de analisar as causas deste erro e como isto poderia ser aperfeiçoado devido a outros trabalho que utilizem a metodologia de tempo de detecção baseada nas curvas de desempenho.

Indo no sentido de entender a divergência entre a metodologia e a validação, a próxima seção busca levantar pontos de atenção que teriam a capacidade de gerar erros na obtenção das curvas pela metodologia. A ideia é que, estudando mais a fundo estas fontes de erro seja possível

melhorar a metodologia e, conseqüentemente, avançar nos estudos de detecção de ilhamento.

6.3 Fontes de erros na metodologia baseada em curvas de desempenho

6.3.1 Cargas de impedância constante

Como mencionado anteriormente, neste trabalho as cargas foram modeladas como sendo de impedância constante. Como determinado em (NEVES, 2008), as cargas de impedância constante apresentam características que são amplamente utilizadas em simulações estáticas e dinâmicas, podendo ser inadequadas a alguns trabalhos de grande complexidade pela sua simplificação inerente. Um ponto a ser notado que diz respeito a este trabalho é a alta correlação entre a carga de impedância constante e o comportamento da tensão no nó de conexão da carga. Assim, quando ocorre uma variação diferente em cada bloco de carga baseado nos perfis das curvas de cargas, ocorrem variações de tensão nos nós, o que influi para um erro em relação à simulação padrão e realística do sistema.

6.3.2 Distribuição de tensão

Como mencionado para as características de carga com impedância constante, ocorre uma distribuição de tensão diferente nos nós de carga dada a alteração das cargas em cada período. Essa alteração é diferente da apresentada no decorrer da construção das curvas de desempenho, na qual existiu uma variação linear das cargas ou da potência gerada. Ao realizar a simulação utilizando um sistema com cargas variáveis, essa alteração da tensão influi como fonte de erros no resultado final, sendo um dos motivos dos valores mais elevados para a metodologia baseada em curvas de desempenho.

6.3.3 Construção das curvas de desempenho

Para a construção das curvas de desempenho apresentadas nos capítulos anteriores foram realizadas simulações variando a carga total do sistema e variando a potência gerada, ambas entre 0 e 1 p.u. Utilizando como exemplo o caso no qual foi variada a carga, este valor foi variado de 0 a 1 p.u de maneira uniforme. Este tipo de variação adotada nas simulações de construção das curvas de desempenho mascaram a variabilidade da tensão dos nós (fruto da modelagem em impedância constante) que ocorreria em um sistema no caso de uma carga ir de 0.3 p.u até 1 p.u. Por exemplo, este crescimento linear utilizado na construção das curvas gera um erro no momento em que os pontos da simulação forem utilizados para determinar a curva de desempenho. Por esse comportamento ser um pouco destoante do que ocorreria na realidade, ele também pode ser considerado uma fonte de erro da metodologia.

6.3.4 Utilização de aproximação polinomial

Como parte integrante do modelo desenvolvido está a utilização de uma aproximação polinomial das curvas de desempenho. Apesar de ter demonstrado que este erro é pequeno, ele influi na variação entre o valor da metodologia e o valor obtido ao simular o sistema. Uma maneira de reduzir este erro seria reavaliar a aproximação linear ou desenvolver algoritmos mais sofisticados para esta função.

Após analisadas diversas fontes de possíveis erros ao resultado da metodologia, percebe-se que cada uma delas aborda uma nova frente de estudos para aperfeiçoamento dos métodos. Vale notar que alguma das fontes de erro, como o do tipo de modelagem de carga podem ser sanadas através do estudo de novas modelagens o que não era o foco principal deste trabalho.

CONCLUSÕES.

No decorrer do trabalho foram desenvolvidas ferramentas e metodologias relacionadas à detecção de ilhamento e proteção de sistemas de distribuição com geradores síncronos distribuídos. Por se tratar de um tema abrangente e em franca expansão o trabalho teve um foco muito forte na relação entre a potência ativa em uma eventual ilha e o relé baseado a em variação de frequência. Durante as simulações e discussões ficou evidente que a metodologia desenvolvida no trabalho apresenta um potencial de aplicação em todos os sistemas de distribuição que apresentem geradores síncronos. Dito isto, é considerável que a metodologia de tempo de detecção baseada em curvas de desempenho possa ser utilizada para definir o melhor ajuste do relé para cada período do dia.

Diversos aprendizados e conhecimentos foram sendo construídos no decorrer da realização do trabalho, sendo que os principais podem ser sucintamente descritos a seguir.

- Ambiente de simulação:

1. Para a realização de todas as etapas de simulações foi necessário utilizar um modelo de simulação do sistema elétrico. Este sistema elétrico de distribuição padrão foi construído conjuntamente com uma estrutura de geração distribuída que proporcionaria um ilhamento simulado.
2. Aprendizados de como modelar elementos elétricos dos tipos: cargas, alimentadores, reguladores de tensão, relés, entre outros, foram de extrema utilização e adaptação do sistema elétrico com o intuito de obter ferramentas e objetos de sustentação para a metodologia proposta neste trabalho.

- Construção das curvas de desempenho:

Sendo tema central de toda a metodologia desenvolvida, as curvas de desempenho foram exemplificadas, testadas e construídas no decorrer do trabalho, com o intuito de prover as

ferramentas necessárias para a escolha dos ajustes. Neste quesito foram desenvolvidas duas abordagens para as curvas de desempenho, sendo uma baseada na variação da geração de potência ativa e outra baseada na variação das cargas, sendo que ambas, conjuntamente, formam a base para o modelo que determina o tempo de abertura do relé para cada ajuste e período do dia.

- Tratamento e alocação de curvas de carga:

Para aproximar ainda mais a metodologia de um sistema real, foram alocados aos blocos de cargas curvas de cargas obtidas de um sistema de distribuição real. Para que isto fosse possível foi necessário tratar as informações e entender qual a melhor maneira de alocá-las dentro do ambiente de simulação

- Simulação de tempos de abertura para um sistema de distribuição:

Para a realização da validação da metodologia foi necessário simular um sistema de distribuição e obter qual seria o tempo de abertura do disjuntor em diferentes ajustes para cada momento do dia, segundo as curvas de carga. Esta abordagem permitiu um comparativo seguro da metodologia desenvolvida e demonstra a aplicabilidade da mesma em sistemas de distribuição reais.

Mais do que os pontos citados, o trabalho desenvolveu todo um modelo no ambiente de simulação que determina quais ajustes são possíveis para o relé de variação de frequência, utilizado na detecção de ilhamento em sistemas com geração síncrona distribuída. Além disto apresentou diversas oportunidades de aprimoramento e estudos como:

- Estudar sobre a melhor modelagem de elementos elétricos de distribuição dentro de ambiente de simulação.
- Desenvolver métodos e *Softwares* que tenham como objetivo gerar curvas de desempenho.
- Desenvolver funções que utilizam os dados obtidos nas simulações para diversas possibilidades presentes em um sistema elétrico.
- Estudo da aplicabilidade do modelo em cargas com modelagem estocástica.
- Estudos relacionados a qualidade das medidas realizadas e equipamentos de medição utilizados.
- Estudos relacionados a eficiência computacional e aplicação de algoritmos mais eficientes.
- Avançar nos estudos sobre o comportamento do método em casos de cargas leves.
- Aprimorar os estudos sobre a relação entre as cargas do sistema e o tempo de detecção esperado.

- Desenvolver frentes de estudo para a detecção de ilhamento e proteção de geradores distribuídos.

As conclusões do trabalho são que a metodologia baseada em curvas de desempenho possuem plena aplicabilidade na detecção de ilhamento. Ressalvas como os erros mencionados e sua baixa aplicabilidade em casos de pequenos desbalanços devem ser levados em conta.

A redução dos erros pode ser obtida por meio do desenvolvimento dos pontos de melhoria citados e do amadurecimento da metodologia. Outro ponto observado na diferença entre as metodologias é o comportamento da detecção nos casos de cargas leves. A resolutiva deste problema traria grandes avanços ao tema abordado neste trabalho.

REFERÊNCIAS

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional**. Citado na página 13.

BELTRAN FRANCISCO GIMENO, S. S.-C. H.; TORRELO, J. M. **Review of the islanding phenomenon problem for connection of renewable energy systems**. Valencia: [s.n.], 2006. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.

BRIGHT, C. Comparison of rate of change of frequency protection. a solution to the detection of loss of mains. **Developments in Power System Protection**, July 2004. Citado na página 19.

DABNEY, T. L. H. J. B. **Mastering Simulink. 1st ed.** [S.l.: s.n.], 2003. Citado na página 41.

DIDUCH, J. Y. . L. C. . C. **Recent developments in islanding detection for distributed power generation**. [S.l.], 2004. Citado 3 vezes nas páginas 18, 19 e 20.

FITZGERALD, A. E. **Electric Machinery (6th Ed)**. New York: McGraw-Hill, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

IEEE. **Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies**. [S.l.], 1992. Citado 5 vezes nas páginas 12, 26, 32, 35 e 36.

JARDINI C.TAHAN, M. G. J. Daily load profiles for residential, commercial and industrial low voltage consumers, vol 15. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.

JR, J. C. de M. V. Detecção de ilhamento de geradores distribuídos: Uma revisão bibliográfica sobre o tema. **Revista Eletrônica de Energia**, v. 1, 2001. Citado 5 vezes nas páginas 17, 19, 20, 21 e 29.

JR, J. C. de M. V. **Metodologias para ajuste e avaliação do desempenho de reles de proteção anti-ilhamento de geradores síncronos distribuídos**. Tese (Doutorado) — Universidade estadual de Campinas, Campinas, 2006. Citado 10 vezes nas páginas 7, 11, 13, 20, 21, 29, 30, 31, 39 e 40.

KRAUSE, P. C. **Analysis of Electric Machinery (McGraw-Hill series in electrical engineering)**. 1. ed. [S.l.]: Paul M. Anderson, 1986. v. 1. Citado 3 vezes nas páginas 12, 35 e 36.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. British Columbia: McGraw-Hill, 1994. Citado 4 vezes nas páginas 21, 26, 30 e 31.

MARTEL, W. X. M. **An Assessment of Distributed Generation Islanding Detection Methods and Issues for Canada**. varennes, 2004. Citado 4 vezes nas páginas 17, 18, 19 e 20.

MUMMERT, J. H. . L. B. . C. The adverse effects of excitation system var and power factor controllers. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 1999. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.

NEVES, M. **Modelagem de carga em sistemas de energia elétrica: Modelo matemático e sua validação com teste em campo**. Juiz de fora, 2008. Citado na página 69.

PITOMBO, S. **Metodologias para ajuste e avaliação do desempenho de reles de proteção anti-ilhamento de geradores síncronos distribuídos**. Tese de mestrado — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. Citado 10 vezes nas páginas 11, 12, 13, 17, 20, 21, 26, 30, 31 e 40.

ROPP, S. M. Using power line carrier communication to prevent islanding. **IEEE Photovoltaic Specialists**, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 18, 19 e 31.

SIEMENS. **Numerical Voltage, Frequency and Overflux Relay - SIPROTEC 7RW600 – v. 01**. [S.l.], 1997. Citado na página 36.

SYSTEMS, I. T. on P. **IEEE Transactions on Power Systems ,Load representation for dynamic performance analysis (of power systems)**. [S.l.], 1993. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 32.

TAN, J. **Numerical Methods for Ordinary Differential Equations with Two Parameters**. London: Zhu R, 2012. Citado na página 41.