



**Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia Elétricae de Computação**

Trabalho de Conclusão de Curso

Modelagem Computacional de um Relé de Sub/sobrefrequênci Utilizando o ATP

Autor

Henrique Coqueiro Pires

Orientador

José Carlos de Melo Vieira Junior

São Carlos, Novembro de 2013

Henrique Coqueiro Pires

Modelagem Computacional de um Relé de Sub/sobrefreqüência Utilizando o ATP

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São
Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com
ênfase em Sistemas de Energia e
Automação

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

São Carlos, Novembro de 2013

**AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.**

C786m

Coqueiro Pires, Henrique
Modelagem Computacional de um Relé de
Sub/sobrefreqüência Utilizando o ATP / Henrique
Coqueiro Pires; orientador José Carlos de Melo Vieira
Júnior. São Carlos, 2013.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2013.

1. Relés de frequência. 2. ATPDRAW. 3. ATP. 4.
Geração distribuída. 5. Sistemas Distribuídos. I.
Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Henrique Coqueiro Pires

Título: "Modelagem computacional de um relé de sub/sobrefreqüência utilizando o ATP"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 25/11/2013,

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

*Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior - (Orientador -
SEL/EESC/USP)*

Prof. Dr. Mário Oleskovicz - (SEL/EESC/USP)

*Mestre Wellington Maycon Santos Bernardes - (Doutorando -
SEL/EESC/USP)*

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Homero Schiabel

Dedicatória

Aos meus pais, Jesuíno e Aparecida,
e aos meus irmãos, Francine e
Mateus, com amor, carinho e
admiração por tudo o que já
fizeram e fazem por mim.

Agradecimentos

- A Deus, em primeiro lugar, por sempre me guiar nas decisões corretas.
- A minha família pelo incondicional apoio em todos os momentos da minha vida.
- Ao professor José Carlos pela confiança em mim depositada e a ajuda a mim prestada.
- Ao LSEE pela acomodação e a disponibilização dos equipamentos por mim utilizados.
- A todos os meus amigos de São Carlos pelo companheirismo por todos esses anos.

Sumário

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	17
1.1) Cenário Energético	17
1.2)Justificativa e Objetivos do Presente Trabalho	20
1.3)Estrutura do Documento	20
CAPÍTULO 2 – TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE ILHAMENTO	23
2.1)Técnicas Remotas	23
2.2)Técnicas Locais	24
2.3) Relés de Frequência	27
CAPÍTULO 3 – MODELAGEM DO SISTEMA E METODOLOGIA DAS SIMULAÇÕES	29
3.1) Modelagem do Relé de Frequência	29
3.2) Modelagem do Sistema Elétrico	32
3.3) Metodologia das Simulações	35
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1) Déficit de Potência Ativa	41
4.2)Excesso de Potência Ativa	45
4.3)Rejeição de Carga	48
4.4)Retomada de Carga	49
4.5) Justificativa do Uso do Filtro Passa Baixa no Relé de Frequência	50
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES	53
CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
APÊNDICE A – DADOS DO SISTEMA ELÉTRICO	57

Lista de Figuras

Figura 1: Previsão da Matriz Energética Brasileira em 2030.....	17
Figura 2: Ocorrência de Ilhamento.....	19
Figura 3: Diagrama de Blocos de um Relé de Sub/sobrefrequência.....	27
Figura 4: Modelagem do Relé de Frequência no ATP.....	30
Figura 5: Sistema Elétrico Utilizado	32
Figura 6: Sistema Elétrico Modelado no ATPDraw.	33
Figura 7: Sistema de Controle de Excitação do Gerador Distribuído.	34
Figura 8: Sistema de Controle de Torque do Gerador Distribuído.	34
Figura 9: Potência Ativa Fornecida pelo Gerador Distribuído ao Longo do Tempo (MW)	39
Figura 10: Tempo de Atuação dos Relés para os Casos de Déficit de Potência Ativa.	43
Figura 11: Potência Ativa Fornecida pelo Gerador para o Caso de Estudo com Déficit de Potência Ativa (MW).	44
Figura 12: Frequência do Sistema para o Caso de Estudo com Déficit de Potência Ativa (Hz)..	44
Figura 13: Tempo de Atuação dos Relés para os Casos de Excesso de Potência Ativa.	46
Figura 14: Potência Ativa Fornecida pelo Gerador para o Caso de Estudo com Excesso de Potência Ativa (MW).	47
Figura 15: Frequência do Sistema para o Caso de Estudo com Excesso de Potência Ativa (Hz).	47
Figura 16: Frequência do Sistema para o Caso de Rejeição da Carga 1 (Hz).....	49
Figura 17: Frequência do Sistema para o Caso de Rejeição da Carga 2 (Hz).....	49
Figura 18: Tempo de Atuação dos Relés para os Casos de Déficit de Potência Ativa sem o Uso do Filtro Passa-Baixa do Relé de Frequência.....	51
Figura 19: Tempo de Atuação dos Relés para os Casos de Excesso de Potência Ativa sem o Uso do Filtro Passa-Baixa do Relé de Frequência.....	52
Figura 20: Comparação da Frequência Medida pelo Relé de Frequência com e sem o Uso do Filtro Passa-Baixa (Hz).....	52
Figura 21: - Sistema Elétrico Analisado.....	57
Figura 22: Sistema de Controle de Excitação do Gerador Distribuído.	58

RESUMO

PIRES, C. Henrique. **Modelagem Computacional de um Relé de Sub/sobrefreqüência Utilizando o ATP.** 2013, Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013, 59p.

Sistemas de distribuição de energia elétrica dotados de geradores distribuídos correm o risco de operarem sobre situação ilhada após a ocorrência de um evento que desconecte a subestação da concessionária de energia local do restante da rede de distribuição. Nesta situação, os geradores distribuídos são as únicas fontes de energia presentes na rede e isto pode ocasionar diversos danos tanto para a rede quanto para o próprio gerador em si. Em função disso, o procedimento recomendado pelas concessionárias de distribuição de energia elétrica a ser seguido nesta situação é a desconexão dos geradores distribuídos da rede de distribuição tão logo ocorra o ilhamento. Neste contexto, têm sido desenvolvidas diversas técnicas de proteção de sistemas elétricos que visam detectar as situações de ilhamento. Uma dessas técnicas consiste no uso do relé de frequência, pois, em determinadas situações, a caracterização da situação de ilhamento pode acarretar em variações na frequência do sistema e, desta forma, a frequência do sistema pode ser um indicativo da ocorrência do ilhamento. Neste trabalho objetiva-se propor um modelo de relé de frequência a ser implementado no programa ATPDraw, que consiste em uma interface gráfica para o programa ATP. O ATP, por sua vez, é um programa amplamente utilizado pelas empresas do setor elétrico e pelas universidades para executar estudos de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos de potência. Os resultados obtidos com as simulações encontram-se de acordo com o comportamento esperado para o relé de frequência, demonstrando, desta forma, que o modelo proposto pode ser utilizado em trabalhos futuros.

Palavras-chave: relés de frequência, ATPDraw, ATP, geração distribuída, sistemas distribuídos.

ABSTRACT

PIRES, C. Henrique. **Frequency Relay Modeling Using ATP**.2013, Course Final Paper – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2013, 59p.

Electric distribution systems with distributed generators can be operated on islanded situation after the power utility substation be disconnected from the distribution grid. In this situation, the distributed generators are the only energy sources in operation, which can lead to a number of safety and technical problems. So, power utilities recommend that in islanded situation all the distributed generators must be disconnect to the distributed systems just after the island situation happens. Thus, several islanding detection methods have been proposed in the last years. One of these techniques is the frequency relay, because in some island situations the system frequency changes, so it can be a parameter that islanding happened. This paper aims to propose a frequency relay model to be implemented in the ATPDraw, that consists in a graphical interface of the ATP program (Analysis Transients Program). The ATP is frequently used in the electrical companies and universities for electromagnetic transient studies in power systems. The results of the simulations are in accordance with the expected to the frequency relay operation, so the proposed model can be used in future works.

Keywords: frequency relay, ATPDraw, ATP, distributed generation, distributed systems.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1) Cenário Energético

Desde a revolução industrial, a competitividade econômica dos países e a qualidade de vida de seus cidadãos são intensamente influenciadas pela energia. Ao longo do século XX o Brasil deixou de ser um país puramente agrário e foi se industrializando, gerando um alto crescimento econômico e, consequentemente, crescentes necessidades por energia. Para ilustrar, tem-se que o consumo de energia no país deve alcançar a casa dos 550 milhões de TEPs (Toneladas Equivalente de Petróleo) no ano de 2030 sendo composta, basicamente, da forma apresentada na figura 1 [1].

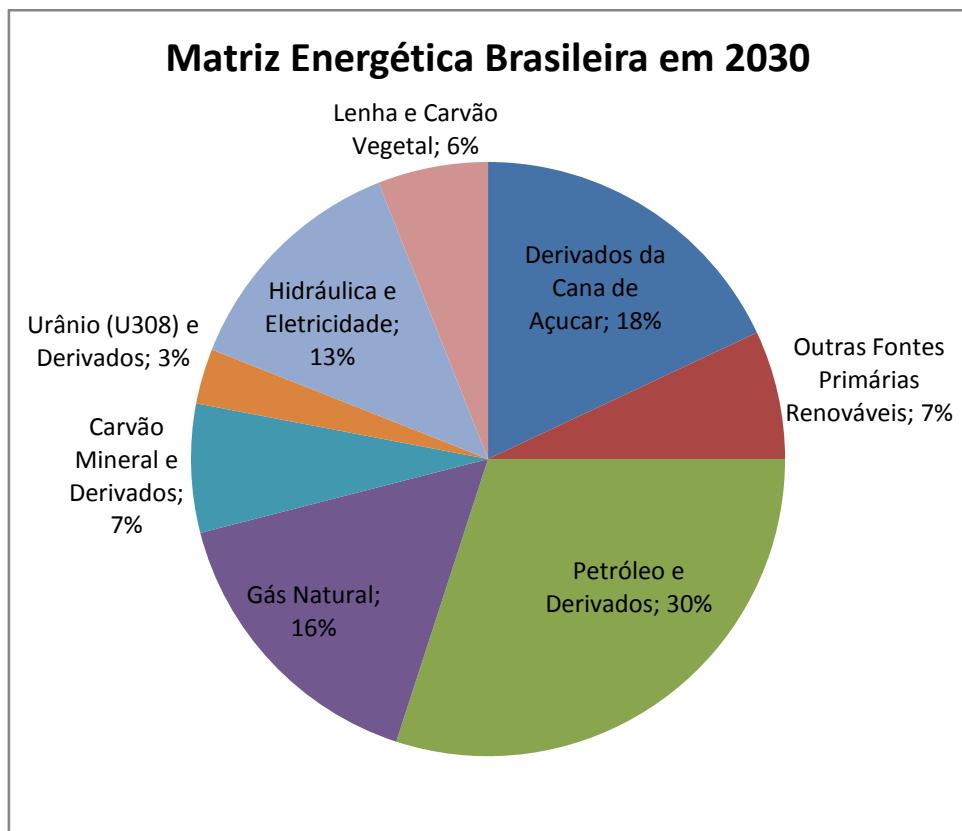


Figura 1: Previsão da Matriz Energética Brasileira em 2030

Da figura 1 nota-se que em 2030 a energia elétrica representará cerca de 16% (Hidráulica e Eletricidade mais Urânio e Derivados) do total da energia consumida no país, ou seja, algo em torno de 88 milhões de TEPs. A geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (que abrange aproximadamente 97% da energia elétrica total produzida no país) em 2012 foi de 44 milhões de TEPs [2]. Pode-se então estimar que a produção de energia elétrica no Brasil deverá dobrar nos próximos 18 anos.

Em se tratando especificamente de energia elétrica, atualmente cerca de 70% do total produzido no país vêm das usinas hidrelétricas [3], o que coloca o Brasil entre os maiores produtores de hidroeletricidade no mundo. Estima-se ainda que o Brasil possua um potencial de geração hidrelétrico inexplorado em torno de 170 GW [3], demonstrando assim o enorme potencial hidráulico brasileiro.

Por outro lado a maior parte deste potencial inexplorado encontra-se na bacia do rio Amazonas, uma região distante dos grandes centros consumidores e de difícil acesso, o que dificulta a construção das usinas hidrelétricas e o posterior transporte da energia produzida, exigindo, para isto, a construção de longas linhas de transmissão. Além disso, as questões ambientais e sociais também têm atuado no sentido de reduzir a construção destes empreendimentos no Brasil.

Neste contexto, nota-se que os futuros desafios para o setor eletro-energético são grandes. Em função disto investe-se cada vez mais na busca por novas fontes de energia, na tentativa de aumentar a oferta, visando suprir as necessidades, e também de reduzir os impactos ambientais inerentes do processo de exploração. Uma das alternativas para o abastecimento energético do país está ligada a geração distribuída de eletricidade.

O conceito de geração distribuída consiste na instalação de pequenos geradores elétricos no sistema de distribuição das concessionárias. Esta tendência ganhou força nos Estados Unidos durante a década de 70, quando o planeta enfrentou a primeira crise do petróleo. Na época o governo americano começou a criar incentivos com a finalidade de promover o desenvolvimento de geradores não pertencentes às concessionárias de distribuição. As principais características da geração distribuída são as seguintes [4]:

- Os geradores estão localizados nas proximidades das cargas, eliminando assim os custos de implantação de linhas de transmissão e reduzindo as perdas no sistema;
- Podem ser utilizadas diversas fontes primárias de energia, tanto renováveis (eólica, solar, etc.) quanto não renováveis (carvão, petróleo, gás, etc.);
- O proprietário do gerador distribuído pode ser um produtor independente, a concessionária de distribuição local ou até mesmo os consumidores.

Por outro lado, apesar da geração distribuída estar demonstrando ser uma alternativa viável na resolução dos problemas de demanda por energia elétrica crescente e de redução dos impactos ambientais inerentes dos grandes empreendimentos energéticos, a mesma deve ser cuidadosamente analisada do ponto de vista técnico. De forma simplificada, devem ser asseguradas garantias de que a conexão destes geradores na rede não causará impactos no

funcionamento do sistema elétrico como um todo. Desta forma, o ponto de conexão entre o gerador e a rede de distribuição deverá ser dotado de um sistema de proteção adequado, que vise a proteção tanto do gerador como do sistema elétrico local.

Um dos problemas que pode ocorrer na operação do gerador distribuído é o chamado ilhamento (figura 2). Esta situação se caracteriza quando parte do sistema de distribuição torna-se desconectado da fonte de energia principal (geralmente a subestação da concessionária local), mas continua energizado por um gerador distribuído. Neste caso o procedimento requisitado pelas concessionárias é desconectar o mais rápido possível o gerador da rede de distribuição, uma vez que a operação do sistema nessas condições pode ser prejudicial tanto ao gerador quanto ao próprio sistema.

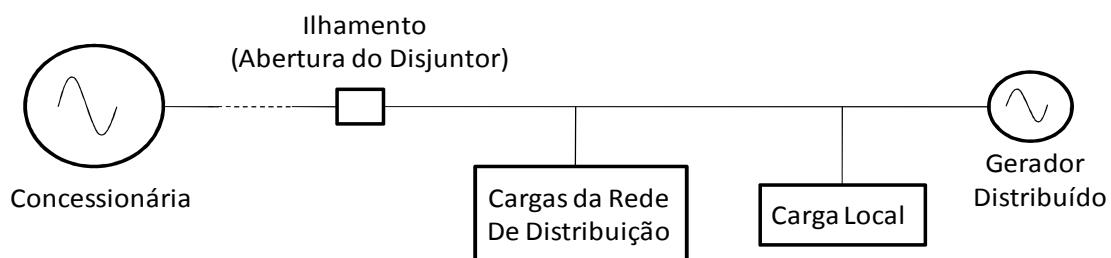


Figura 2: Ocorrência de Ilhamento.

Os principais problemas decorrentes do atraso ou não detecção da condição de ilhamento são [5]:

- Os trabalhadores da empresa concessionária de energia podem sofrer acidentes devido a áreas da rede elétrica que continuaram energizadas.
- A empresa concessionária de energia pode sofrer eventuais penalidades em função da qualidade da energia fornecida pelos geradores ilhados não atenderem às exigências da ANEEL;
- O sistema de proteção pode perder a coordenação devido as alterações nos níveis de curto-círcuito;
- O aterramento do sistema pode ser prejudicado;
- No instante de reenergização da rede, é grande a possibilidade do gerador estar fora de sincronismo, causando assim danos a si próprio e ao restante do sistema.

Com o objetivo de reduzir os riscos citados acima, têm sido desenvolvidas técnicas que detectam as situações de ilhamento e protegem o sistema, desconectando os geradores distribuídos.

Os dispositivos de proteção mais utilizados em sistemas elétricos de potência são os chamados relés de proteção. Os primeiros relés de proteção que surgiram eram equipamentos eletromecânicos, que trabalhavam baseados em princípios das interações entre campos elétricos e campos magnéticos. Os relés de proteção modernos em uso no mercado atualmente consistem em dispositivos microprocessados, que possuem inteligência artificial, são completamente automatizados e coordenados entre si. Dentro desse contexto, os relés de frequência, tema deste trabalho, têm sido aplicados para detectar as mais variadas ocorrências de faltas em sistemas elétricos, entre elas a detecção da situação de ilhamento.

Neste trabalho, o foco é a proteção contra variações excessivas de frequência, mais especificamente realizada por um relé (ou função) de sub e sobre-frequência. Esta função é comumente empregada em geradores de energia elétrica, motores de grande porte, sistemas de rejeição de carga e para a detecção de ilhamento de geradores distribuídos. Dentro deste contexto, este trabalho de conclusão de curso visa a modelagem computacional de um relé (ou função de proteção) de sub/sobre-frequência utilizando o *Alternative Transients Program* (ATP), mais especificamente o módulo denominado *Transient Analysis of Control Systems* (TACS) [1]. A motivação para o uso do ATP é que este é um programa amplamente conhecido e utilizado por empresas concessionárias de energia elétrica e por importantes universidades e centros de pesquisa em todo o mundo. Logo, o modelo do relé de sub/sobre-frequência poderá ser disponibilizado à comunidade científica nacional e internacional, mediante demonstração de interesse.

1.2) Justificativa e Objetivos do Presente Trabalho

O objetivo deste trabalho é propor um modelo de relé de frequência e, posteriormente, analisar a eficácia na detecção de situações de ilhamento de geradores distribuídos. Para este objetivo serão modelados, no programa ATP, um relé de frequência nos padrões comerciais e um sistema elétrico que tem sido utilizado em trabalhos anteriores na análise e detecção de situações de ilhamento.

Além da análise da eficácia do relé em situações de ilhamento, será também analisada a robustez do relé de frequência para que não atue em situações que não a de ilhamento. Para este objetivo serão simulados casos de tomada e de rejeição de cargas.

1.3) Estrutura do Documento

Este documento está organizado da seguinte forma:

- **Capítulo 1:** Introdução ao cenário elétrico atual brasileiro e contextualização da geração distribuída e da detecção de ilhamento.
- **Capítulo 2:** Detalhamento da questão da detecção de ilhamento na geração distribuída e do relé de frequência.
- **Capítulo 3:** Apresentação do programa ATP (*Alternative Transients Program*) utilizado nas simulações do sistema elétrico e da ferramenta TACS (*Transient Analysis of Control Systems*) que foi utilizada na modelagem do relé de frequência.
- **Capítulo 4:** Apresentação dos resultados obtidos com as simulações e discussões a respeito dos mesmos.
- **Capítulo 5:** Conclusões obtidas com o trabalho e sugestões para trabalhos futuros no tema.

CAPÍTULO 2 – TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE ILHAMENTO

Em função dos problemas anteriormente apresentados decorrentes do atraso ou não detecção da condição de ilhamento, vários trabalhos têm sido apresentados na tentativa de desenvolver ou aperfeiçoar os métodos de detecção de ilhamento. Existem atualmente diversas técnicas para a detecção das situações de ilhamento, sendo que essas técnicas podem ser separadas da seguinte forma [5].

- Técnicas remotas;
- Técnicas locais.

2.1) Técnicas Remotas

As técnicas de detecção remotas consistem em estabelecer algum meio de comunicação entre a concessionária e os geradores distribuídos. A principal vantagem do uso das técnicas remotas é o seu alto desempenho na detecção de situações de ilhamento. Por outro lado, temos que uma desvantagem é o alto custo da instalação. Em razão deste alto custo de instalação, esta opção torna-se desinteressante para pequenos geradores distribuídos. As principais técnicas de detecção de ilhamento remotas são relacionadas abaixo:

a) Técnicas Baseadas em Sistemas Supervisórios

Os sistemas supervisórios consistem em estações de controle onde podem ser controlados um vasto número de dispositivos e equipamentos. Este tipo de sistema ainda é pouco utilizado em redes de distribuição de energia elétrica devido ao seu alto custo de implementação. Para proteger a rede elétrica contra situações de ilhamento, o sistema supervisório atua monitorando os estados de todos os disjuntores da rede em questão, desde a subestação da concessionária até os geradores. Quando da ocorrência de uma situação de ilhamento, o sistema supervisório identificaria a área isolada e atuaria comandando o desligamento dos geradores distribuídos. Embora este sistema seja eficiente, conforme citado anteriormente, o alto custo de instalação acaba desestimulando o seu uso [5].

b) Técnicas Baseadas em Sistemas PLCC (*Power Line Carrier Communication*)

Este tipo de técnica de detecção consiste em utilizar um gerador de sinais de alta frequência conectado a subestação da concessionária de distribuição de energia local e receptores nos geradores distribuídos. Os sinais gerados na subestação trafegam pela própria rede de distribuição e chegam até os receptores conectados aos geradores distribuídos. Com este tipo de comunicação é possível detectar com alta eficiência as situações de ilhamento. Como desvantagem temos novamente o custo de implementação, uma vez que envolve as instalações tanto do gerador quanto dos receptores de sinais em média tensão [5].

c) Técnicas baseadas em Redes de Comunicação entre Relés

Esta técnica de detecção consiste em estabelecer *links* de comunicação entre todos os dispositivos de proteção da rede elétrica. Com este *link* de comunicação, os dispositivos podem trocar informações e, desta forma, detectar, caso ocorra, uma situação de ilhamento [5]. Como vantagem segue a alta eficiência e como desvantagem o alto custo de implementação.

2.2)Técnicas Locais

O princípio básico das técnicas locais é detectar o ilhamento usando medidas de tensões ecorrentes (ou outra variável) disponíveis no local de instalação do gerador distribuído. Essas técnicas se dividem em passivas e ativas, as quais são abordadas nos itens seguintes.

a. Técnicas Ativas

As técnicas ativas consistem em injetar sinais nos geradores distribuídos na tentativa de perturbar o seu funcionamento. Medindo-se o nível de perturbação causado para um dado sinal injetado é possível determinar se o gerador está ou não operando de forma ilhada. Seguem abaixo alguns exemplos deste tipo de técnica de detecção:

- Medida da Impedância → Quando ocorre uma situação de ilhamento, a impedância “vista” nos terminais do gerador distribuído varia e, desta forma, esta variação pode ser utilizada para detectar o ilhamento. Esta técnica consiste em injetar um sinal de alta frequência na rede e, posteriormente, medir a impedância do sistema. Uma vantagem do

uso desta técnica reside no fato de que a eficácia da detecção não depende do desbalanço entre potência ativa entre a rede original e a rede ilhada. Uma desvantagem é que o desempenho deste método é prejudicado quando existem vários geradores distribuídos conectados na rede, uma vez que os seus respectivos sinais sofrem interferência uns dos outros.

- **Medida de Frequência** → Este método consiste em injetar um sinal de pequena amplitude na tentativa de variar a tensão terminal do gerador e, posteriormente, medir a frequência elétrica do mesmo. Caso o gerador esteja operando em paralelo com a concessionária, a variação na sua frequência elétrica é desprezível, mas, por outro lado, caso ele esteja em uma situação de ilhamento ocorre uma grande variação na sua frequência elétrica. Desta forma, injetando um sinal de pequena amplitude na tentativa de variar a tensão terminal do gerador, e medindo-se sua frequência elétrica, é possível detectar uma situação de ilhamento. As vantagens dessa técnica residem, mais uma vez, no fato de que a detecção não depende do desbalanço de potência ativa ou reativa entre a rede original e a rede ilhada. As desvantagens deste método são o seu alto custo de implementação e a sua lenta detecção das situações de ilhamento.
- **Medida de Potência Reativa** → Este método consiste, como o anterior, em injetar um sinal de pequena amplitude na tentativa de variar a tensão terminal do gerador, mas, no entanto, ao invés de se monitorar a frequência elétrica do gerador, monitora-se o valor de sua potência reativa. Como no caso anterior, as vantagens desse método residem na independência do desbalanço de potência ativa e reativa entre a rede original e a rede ilhada para a detecção do ilhamento. Suas desvantagens são o alto custo de implementação e a queda no desempenho da detecção quando existem diversos geradores conectados à rede utilizando esta técnica. Esta queda no desempenho da detecção deve-se à interferência de sinais que os geradores podem causar uns aos outros.

b. Técnicas Passivas

As técnicas passivas consistem em monitorar o comportamento de uma ou mais grandezas do gerador distribuído durante a sua operação e caracterizar a situação de ilhamento quando estas sofrerem determinadas alterações em seus valores. Seguem abaixo alguns exemplos desse tipo de técnica de detecção:

- Relés de sub ou sobre-frequência → Havendo um desbalanço de potência ativa entre o gerador e a carga na rede ilhada, ocorre uma variação no valor da frequência elétrica do sistema. Essa variação no valor da frequência pode ser detectada por um relé de frequência [8]. As vantagens desse tipo de aplicação são o seu baixo custo de implementação. Como desvantagem pode ser citado o fato da dependência da eficácia do método em função do nível de desbalanço de potência ativa entre a geração e a carga da rede ilhada.

Relés de taxa de variação de frequência → Como citado no caso do relé de sub/sobre frequência, com um desbalanço de potência ativa entre o gerador e a carga na rede ilhada, ocorre uma variação no valor da frequência elétrica do sistema. Por outro lado, dependendo do nível de desbalanço de potência ativa, a frequência do sistema varia lentamente e, desta forma, a detecção através dos relés de sub/sobre-frequência pode demandar um tempo elevado, uma vez que pode demorar além do tempo requerido pelas concessionárias (cerca de 200 ms podendo variar de concessionária para concessionária). O relé de taxa de variação de frequência observa não o valor da frequência em si, mas sim a sua taxa de variação no tempo. Como vantagem desse método está a aceleração do processo de detecção. Como desvantagem está o fato de que se a frequência variar muito lentamente (pequeno desbalanço de potência ativa) ela poderá atingir valores críticos e mesmo assim não ser detectada pelo relé, uma vez que ele observa apenas a sua taxa de variação [6].

- Relés de deslocamento de fase → Este relé atua medindo a diferença angular entre a tensão interna do gerador E_f e a sua tensão terminal V_t , conhecida como ângulo de carga ($\Delta\delta$). Quando ocorre uma situação de ilhamento, o ângulo de carga do gerador sofre alteração no seu valor e esta variação pode ser detectada pelo relé de deslocamento de fase. Assim como nos dois casos anteriores, quanto maior for o desbalanço de potência ativa entre o gerador e a carga na rede ilhada, mais eficaz será a atuação deste tipo de relé [6].
- Relés de Tensão → Este tipo de relé atua medindo o valor da tensão nos terminais do gerador e atua quando ela encontrar-se fora dos limites ajustados. Diferente dos outros modelos apresentados acima, a eficácia deste tipo de relé está diretamente relacionada ao desbalanço de potência reativa entre o gerador e a carga na rede ilhada, enquanto que a eficácia dos demais está diretamente relacionada ao desbalanço de potência ativa [6].

2.3) Relés de Frequência

Como o objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho do relé de sub/sobrefrequência na detecção de ilhamento, será apresentada uma breve descrição do funcionamento deste tipo de relé. A figura 3 mostra um diagrama de blocos que ilustra os seus principais componentes.

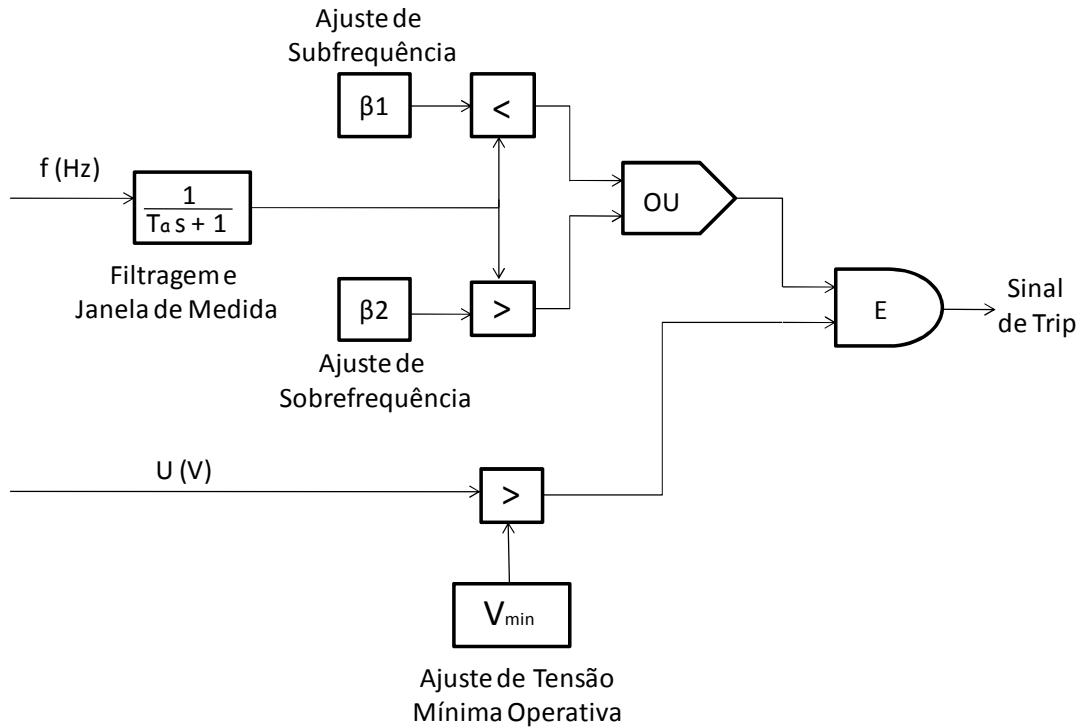


Figura 3: Diagrama de Blocos de um Relé de Sub/sobrefrequência.

De acordo com a figura 3 o funcionamento do relé de sub/sobrefrequência acontece da seguinte forma:

- O valor medido da frequência do gerador é filtrado e medido;
- O valor medido é comparado com os ajustes de sub e sobre-frequência do relé (β_2 e β_1 , respectivamente);
- Se o valor encontra-se fora da faixa de ajuste do relé (abaixo de β_2 ou acima de β_1) é enviado um sinal para o disjuntor abrir e desconectar o gerador síncrono distribuído da rede;

Ainda de acordo com a figura 3, este relé pode possuir também um dispositivo que bloqueia a operação do relé caso a tensão esteja abaixo de um valor pré-determinado (V_{min}). Este artifício é utilizado para evitar que o relé opere durante a partida do gerador.

Em [5] é feita uma análise sobre a eficácia dos relés de frequência, dos relés de taxa de variação de frequência e dos relés de deslocamento de fase na detecção de situações de ilhamento. Nesse trabalho é concluído que o desempenho dos relés de frequência e dos relés de deslocamento de fase é semelhante e que, desta forma, um pode desempenhar a mesma função do outro, evitando assim a necessidade do uso de dois relés. O trabalho também conclui que os relés de taxa de variação de frequência são os mais eficazes na detecção de ilhamento, mas que, por outro lado, nenhum dos relés mostrou-se confiável quando o desbalanço de potência ativa no sistema é pequeno (menor do que 10%).

Em [9] é feita uma análise sobre a eficácia dos relés de frequência e dos relés de deslocamento de fase na detecção de ilhamento. Neste trabalho são feitas simulações que visam demonstrar a eficácia destes tipos de relés na detecção de ilhamento e ainda os casos onde eles atuam indevidamente, ou seja, devido a situações de curto-circuito, rejeição de carga, tomada de carga, entre outras. Os resultados do trabalho reforçam a idéia da dificuldade de detecção de ilhamentos quando o desbalanço de potência ativa é pequeno e demonstra ainda que ajustes mais sensíveis nos relés, visando a detecção para os casos de baixo desbalanço de potência ativa, levam a operações indesejáveis, como no caso de curtos-circuitos ou de rejeição de carga.

Este capítulo realizou uma revisão das técnicas de detecção de ilhamento conhecidas, desde as técnicas remotas até as técnicas locais, subdividindo a segunda entre técnicas ativas e passivas. Além disso, foi dada atenção especial ao relé de frequência, uma vez que este é o objetivo principal deste trabalho. No próximo capítulo será apresentada a modelagem do relé de frequência e do sistema elétrico utilizado, bem como a metodologia empregada nas simulações que se seguiram.

CAPÍTULO 3 – MODELAGEM DO SISTEMA E METODOLOGIA DAS SIMULAÇÕES

Para a simulação do sistema elétrico modelo foi utilizado o programa ATPDraw, que consiste em uma interface gráfica para o programa ATP (*Alternative Transients Program*). O ATPDraw foi desenvolvido com o intuito de fornecer um ambiente mais amigável para os usuários do ATP. O ATP é um programa para simulação de fenômenos de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos de potência conhecido mundialmente e amplamente utilizado pelas concessionárias de energia elétrica. Com este programa, complexas redes elétricas e seus respectivos sistemas de controle podem ser simulados com o objetivo de compreender melhor o funcionamento da rede em estudo.

Dentro do ATP existe uma poderosa ferramenta chamada TACS (*Transient Analysis of Control Systems*) que foi desenvolvida para a simulação das interações dinâmicas entre sistemas de controle e os componentes das redes elétricas. Nesta ferramenta, os sistemas de controle são descritos na forma usual de diagrama de blocos com configurações arbitrárias dos componentes básicos, funções e/ou dispositivos, e as equações dos sistemas de controle são resolvidas pela TACS no domínio do tempo por integração implícita, através da regra de integração trapezoidal. Pelo fato de permitir uma forma simples de representar os sistemas de controle e apresentar soluções compatíveis com o sistema real, a TACS tem sido amplamente utilizada na modelagem de sistemas de corrente contínua, de compensadores estáticos, de relés de proteção, de sistemas de excitação, de regulação de máquinas síncronas, etc. A possibilidade de inclusão de expressões lógicas e algébricas em FORTRAN permite a formulação de algoritmos diversos, seja para a modelagem de componentes ou mesmo para a realização de cálculos [7].

3.1) Modelagem do Relé de Frequência

A modelagem do relé de frequência no ATP foi realizada utilizando funções da ferramenta TACS descrita anteriormente. A figura 4 ilustra a função de cada um dos blocos do relé e entre parênteses é descrita qual função TACS foi utilizada na modelagem de cada um deles.

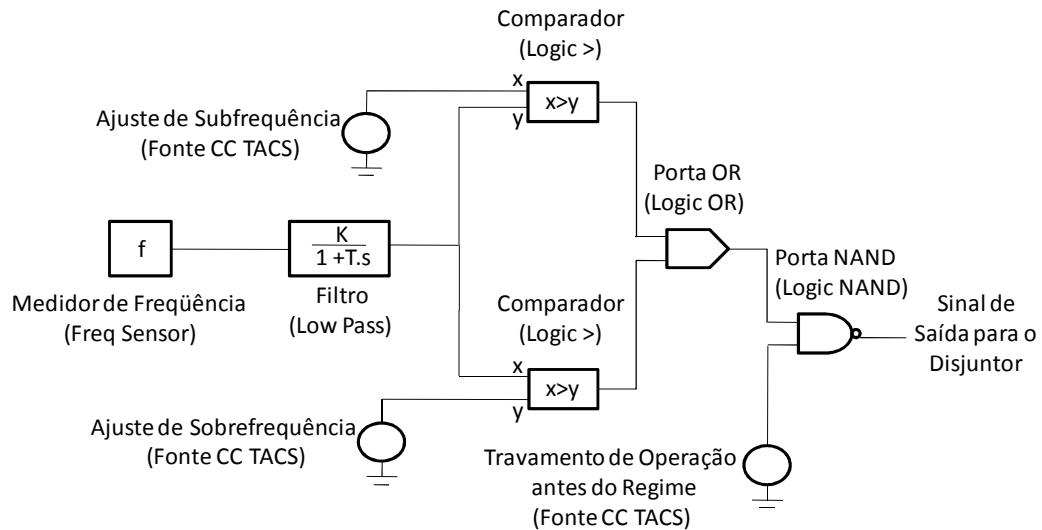


Figura 4: Modelagem do Relé de Frequência no ATP.

- **Medidor de Freqüência:** Este bloco tem como função estimar a freqüência elétrica a partir da tensão na saída do gerador distribuído. A medida da freqüência por este bloco é executada através da amostragem do sinal e segue o método da passagem por zero [8].
- **Filtro:** Este bloco tem como função filtrar o sinal medido pelo bloco *Freq Sensor*, eliminando assim os transitórios de alta freqüência do sinal. Ele consiste em um filtro passa baixa, onde podem ser definidos o seu ganho e a sua constante de tempo. O ganho do filtro, neste caso, foi definido como 1 e a constante de tempo como 0,1segundo.
- **Ajustes de Sub/Sobre-freqüência:** Este bloco tem como função definir os máximos valores de sub e de sobre-freqüência suportados pelo relé. Ele consiste em uma fonte de tensão de valor constante. Para os casos de ajustes de sub/sobre-freqüência, a amplitude do sinal da fonte é o próprio valor de ajuste de sub/sobre-freqüência desejado.
- **Comparador:** Este bloco tem como função comparar o valor da freqüência medido e filtrado com os valores definidos de máximas sub e sobre-freqüência suportados pelo relé, verificando, desta forma, se a freqüência do sistema ultrapassa os limites preestabelecidos. Ele consiste em um comparador lógico que retorna um sinal de amplitude igual a 1 (um) caso a comparação seja verdadeira e um sinal de amplitude igual a 0 (zero) caso a comparação seja falsa.

- **Porta OR:** Este bloco tem como função verificar se algum dos comparadores de sub ou sobre-frequência foram acionados, ou seja, verificar se a frequência do sistema ultrapassou os limites preestabelecidos. Ele consiste em uma porta OR comum, ou seja, retorna um sinal de amplitude igual a 1 (um) caso alguma de suas entradas forem acionadas, ou então um sinal de amplitude 0 (zero) caso contrário.
- **Bloqueio de Operação antes do Regime:** Este bloco tem como função impedir que o relé atue antes que o gerador distribuído tenha completado o seu processo de partida, ou seja, impede que o relé atue antes que o sistema alcance o regime permanente. Ele consiste, como no caso dos ajustes de sub e sobre-frequência, em uma fonte CC daTACS. Esta fonte é ajustada para fornecer uma saída de amplitude constante igual a 1 (um) à partir de 3 segundos de simulação, liberando assim a porta NAND e, consequentemente, desbloqueando a atuação do relé.
- **Porta NAND:** Este bloco tem como função verificar se as duas condições para a atuação do relé foram satisfeitas, ou seja, verificar se a frequência do sistema encontra-se fora dos limites preestabelecidos e se o gerador já completou o seu processo de partida. Ele consiste em uma porta NAND comum, ou seja, retorna um sinal de amplitude igual a 1 (um) caso alguma das suas entradas não tenha sido acionada, ou então um sinal de amplitude 0 (zero) caso todas as suas entradas tenham sido acionadas. Vale ressaltar que o uso de uma porta NAND ao invés de uma AND tornou-se necessário uma vez que o disjuntor de conexão do gerador distribuído permanece fechado enquanto recebe um sinal de amplitude igual a 1 (um) e é aberto enquanto recebe um sinal de amplitude igual a 0 (zero).
- **Disjuntor:** Este bloco tem como função executar a conexão do gerador distribuído à rede da concessionária enquanto receber um sinal de amplitude igual a 1 (um) do relé de frequência e executar a abertura da conexão quando receber um sinal de amplitude igual a (0) do relé de frequência. Ele consiste em uma chave controlada por TACS, onde pode ser definido qual sinal de TACS fará o controle da chave.

3.2) Modelagem do Sistema Elétrico

O sistema elétrico utilizado nas simulações consiste em uma rede de subtransmissão de 132 kV, com um nível de curto circuito de 1.500 MVA, alimentando uma rede de 33 kV, onde existem cargas conectadas e um gerador síncrono de 30 MVA, conforme ilustrado na figura 5.

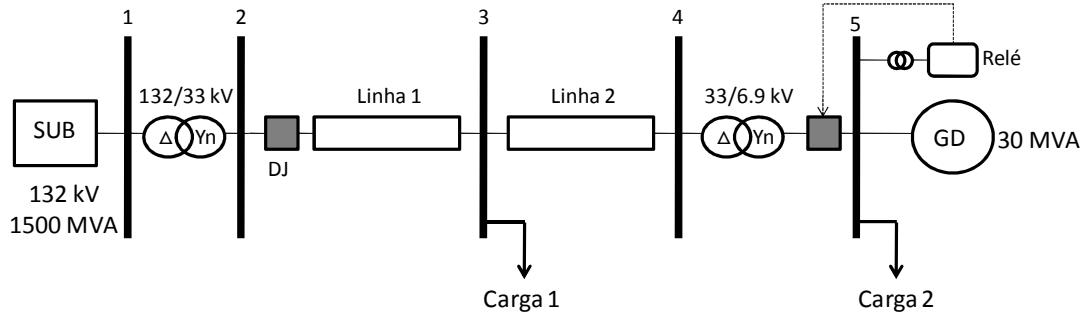


Figura 5: Sistema Elétrico Utilizado

Os modelos do ATP utilizados para cada um dos componentes do sistema elétrico da figura acima são descritos abaixo:

- **Subestação:** Para simular a subestação da concessionária local foi utilizada uma fonte de tensão alternada trifásica em série com uma indutância, onde pode ser definida a amplitude da tensão eficaz de linha e a sua frequência.
- **Transformadores:** Para simular os transformadores foram utilizados os modelos de transformadores não saturáveis, onde podiam ser definidas a relação de transformação, o tipo de conexão do lado primário e do lado secundário, e as impedâncias do lado primário e do lado secundário.
- **Linhas de Distribuição:** As linhas de distribuição foram representadas como impedâncias concentradas, através do modelo de impedância trifásica RLC disponível no ATP, onde podiam ser definidos os valores de resistência, de indutância e de capacitância da linha. Nas simulações realizadas, foram utilizados apenas os parâmetros RL da linha, ou seja, a sua capacitância foi desprezada.
- **Cargas:** As cargas foram todas modeladas como sendo do tipo impedância constante e, desta forma, foram modeladas através do modelo de impedância trifásica RLC disponível

no ATP da mesma forma que as linhas de transmissão. Como no caso das linhas de distribuição, as capacitações das cargas também foram desprezadas.

- **Gerador Distribuído:** Para simular o gerador distribuído foi utilizado o modelo de máquina *SM Synchronous*, onde podem ser definidas a tensão de linha de operação, a potência nominal, a frequência elétrica, a velocidade mecânica nominal, a resistência do enrolamento da máquina, as reatâncias transitórias e subtransitórias, os sistemas de controle de velocidade e excitação, entre outros parâmetros.

A figura 6 ilustra o sistema elétrico modelado no ATPDraw, com todos os blocos que compõe o sistema elétrico e o relé de frequência descritos anteriormente. Os parâmetros da potência fornecida pelo gerador distribuído e das cargas 1 e 2 são variados ao longo das simulações, sendo especificados cada uma delas na próxima seção. Por outro lado, os outros parâmetros do sistema são mantidos constantes e são apresentados no apêndice A.

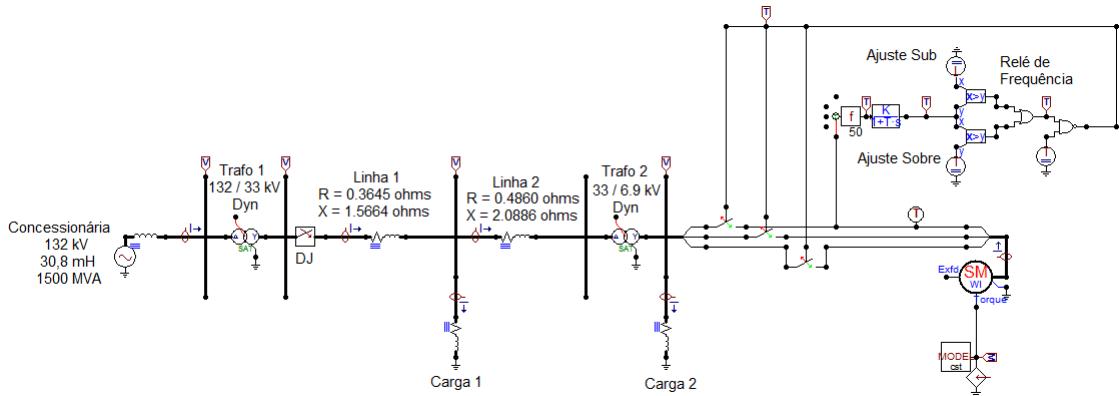


Figura 6: Sistema Elétrico Modelado no ATPDraw.

Para o controle do gerador distribuído, foram utilizados um sistema de controle de excitação e um sistema de controle de torque, que são apresentados nas figuras 7 e 8, respectivamente. O controle de excitação possui os mesmos parâmetros ao longo de todas as simulações e consiste em um sistema de controle já incluso no próprio modelo de máquina síncrona do ATPDraw. Seus parâmetros também serão apresentados no apêndice A e foram ajustados para que o gerador forneça sempre 1 pu de tensão. Por outro lado, o controle de torque foi implementado através de uma fonte de corrente controlada por TACS e um bloco de controle MODELS, e consiste em um valor constante que é variado para controlar a potência ativa fornecida pelo gerador ao longo das simulações.

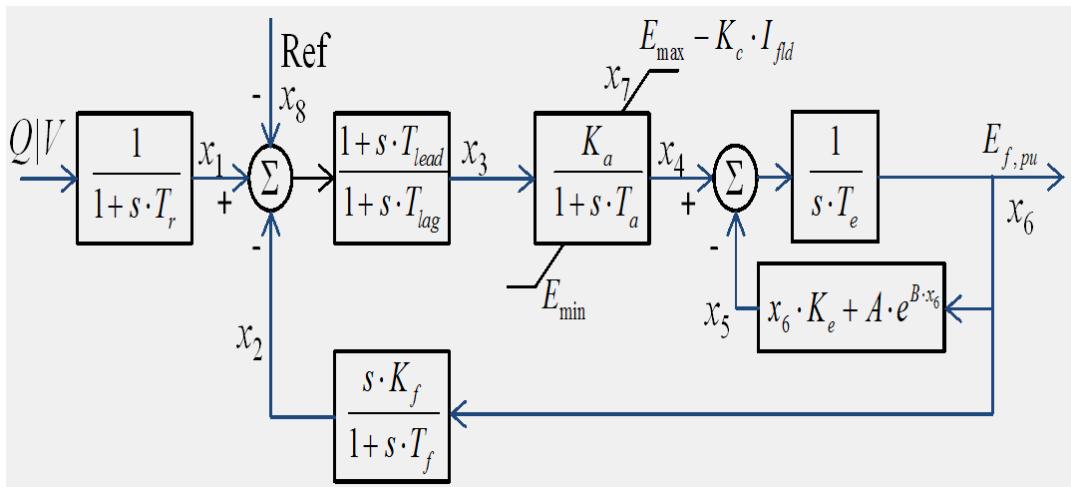


Figura 7: Sistema de Controle de Excitação do Gerador Distribuído.

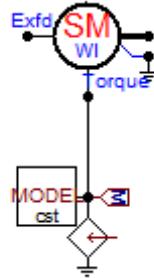


Figura 8: Sistema de Controle de Torque do Gerador Distribuído.

A situação de ilhamento do gerador distribuído foi simulada abrindo-se o disjuntor DJ representado nas figuras 5 e 6. Após a abertura deste disjuntor, pode-se perceber que a concessionária de distribuição de energia local deixa de fornecer energia para as cargas 1 e 2, ficando estas conectadas apenas ao gerador distribuído, caracterizando, desta forma, a situação de ilhamento. Esse processo de abertura do disjuntor DJ e caracterização da situação de ilhamento fora programada para ocorrer aos 5 segundos em todas as simulações. Esta escolha do tempo de abertura do disjuntor foi utilizada levando-se em consideração o tempo decorrido até que o gerador distribuído alcançasse o regime permanente, conforme será explicado posteriormente.

3.3) Metodologia das Simulações

Conforme comentado anteriormente, o objetivo deste trabalho é avaliar a eficácia de um relé de frequência na detecção de situações de ilhamento em geradores distribuídos. A metodologia empregada para avaliar a eficácia dos relés de frequência na situação em questão constituiu-se em: após modelado o sistema elétrico e o relé de frequência no programa ATP, executaram-se diversas simulações onde alguns parâmetros do relé de frequência ou, então, alguns parâmetros do sistema elétrico em estudo foram variados e, posteriormente, os resultados decorrentes dessas variações são analisados. Os casos de estudo são descritos abaixo:

a) Déficit de Potência Ativa: Este caso de estudo tem como objetivo avaliar a eficácia do relé de frequência na detecção de situações de ilhamento onde existe déficit de potência ativa. Para simular este caso de estudo, as cargas 1 e 2 do sistema elétrico ilustrado na figura 5 são mantidas constantes e a potência ativa fornecida pelo gerador distribuído é variada conforme demonstrado na tabela 1. Foi então, posteriormente, avaliado o tempo de atuação do relé para 9 (nove) diferentes valores de potência ativa fornecida pelo gerador distribuído. Pode-se notar, pela tabela 1, que a potência ativa fornecida pelo gerador distribuído é sempre menor do que a potência ativa consumida pelas cargas, caracterizando, desta forma, uma situação de déficit de potência ativa no sistema após a ocorrência do ilhamento.

Potência Ativa do GD (MW)	Potência Ativa das Cargas (MW)	Carga 1		Carga 2	
		R (Ω)	L (mH)	R (Ω)	L (mH)
30,0	30,9	48,5079	45,0350	4,1043	4,3547
28,0	30,9	48,5079	45,0350	4,1043	4,3547
26,0	30,9	48,5079	45,0350	4,1043	4,3547
24,0	30,9	48,5079	45,0350	4,1043	4,3547
22,0	30,9	48,5079	45,0350	4,1043	4,3547
20,0	30,9	48,5079	45,0350	4,1043	4,3547
18,0	30,9	48,5079	45,0350	4,1043	4,3547
16,0	30,9	48,5079	45,0350	4,1043	4,3547
14,0	30,9	48,5079	45,0350	4,1043	4,3547

Tabela 1: Caso de Estudo com Carga.

b) Excesso de Potência Ativa: Este caso de estudo tem como objetivo avaliar a eficácia do relé de frequência na detecção de situações de ilhamento onde existe excesso de potência ativa. Para simular este caso de estudo, a potência ativa fornecida pelo

gerador foi mantida constante e a potência ativa consumida pelas cargas 1 e 2 foram variadas (mantendo-se, no entanto, o mesmo fator de potência). Foi então, posteriormente, avaliado o tempo de atuação do relé para 9 (nove) diferentes valores de potência ativa consumida pela carga. Pode-se notar, pela tabela 2, que a potência ativa fornecida pelo gerador é sempre maior do que a potência ativa consumida pelas cargas, caracterizando, desta forma, uma situação de excesso de potência ativa no sistema após a ocorrência do ilhamento.

Potência Ativa do GD (MW)	Potência Ativa das Cargas (MW)	Carga 1		Carga 2	
		R (Ω)	L (mH)	R (Ω)	L (mH)
30,0	12,91	89,0691	78,1577	26,3022	25,9426
30,0	14,92	81,5698	71,5771	16,5322	16,3062
30,0	16,82	75,6796	66,4084	12,1721	12,0057
30,0	18,82	70,2827	61,6727	9,5715	9,4406
30,0	20,76	65,7653	57,7086	7,8987	7,7907
30,0	22,70	61,6739	54,1185	6,7613	6,6688
30,0	24,73	57,9003	50,8072	5,8649	5,7848
30,0	26,70	54,7190	48,0156	5,1908	5,1198
30,0	28,90	51,8690	45,5148	4,6557	4,5920

Tabela 2:Caso de Estudo de Excesso de Potência Ativa.

c) Rejeição de Carga: Este caso de estudo tem como objetivo verificar possíveis atuações do relé de frequência modelado para casos de rejeição de carga. Lembrando que o relé não deve atuar para este tipo de caso, uma vez que ele deve atuar apenas para situações de ilhamento. Este caso de estudo foi simulado para duas situações distintas. A primeira delas consiste na rejeição da carga 1 do sistema e a segunda na rejeição da carga 2. Para ambos os casos, a potência ativa fornecida pelo gerador foi variada conforme as tabelas 3 e 4 e, além disso, durante a operação em regime permanente do sistema, foi executada a rejeição das cargas em questão.

Potência Ativa do GD (MW)	Potência Ativa Total das Cargas (MW)	Potência Ativa Rejeitada (MW)	Carga 1		Carga 2	
			R (Ω)	L (mH)	R (Ω)	L (mH)
30,0	30,9	20,20	48,5079	45,0350	4,1043	4,3547
28,0	30,9	20,20	48,5079	45,0350	4,1043	4,3547
26,0	30,9	20,20	48,5079	45,0350	4,1043	4,3547
24,0	30,9	20,20	48,5079	45,0350	4,1043	4,3547
22,0	30,9	20,20	48,5079	45,0350	4,1043	4,3547
20,0	30,9	20,20	48,5079	45,0350	4,1043	4,3547
18,0	30,9	20,20	48,5079	45,0350	4,1043	4,3547
16,0	30,9	20,20	48,5079	45,0350	4,1043	4,3547
14,0	30,9	20,20	48,5079	45,0350	4,1043	4,3547

Tabela 3: Caso de Estudo de Rejeição da Carga.

Potência Ativa do GD (MW)	Potência Ativa Total das Cargas (MW)	Potência Ativa Rejeitada (MW)	Carga 1		Carga 2	
			R (Ω)	L (mH)	R (Ω)	L (mH)
30,0	30,9	10,70	48,5079	45,0350	4,1043	4,3547
28,0	30,9	10,70	48,5079	45,0350	4,1043	4,3547
26,0	30,9	10,70	48,5079	45,0350	4,1043	4,3547
24,0	30,9	10,70	48,5079	45,0350	4,1043	4,3547
22,0	30,9	10,70	48,5079	45,0350	4,1043	4,3547
20,0	30,9	10,70	48,5079	45,0350	4,1043	4,3547
18,0	30,9	10,70	48,5079	45,0350	4,1043	4,3547
16,0	30,9	10,70	48,5079	45,0350	4,1043	4,3547
14,0	30,9	10,70	48,5079	45,0350	4,1043	4,3547

Tabela 4: Caso de Estudo de Rejeição da Carga 2.

d) Retomada de Carga: Assim como no caso do estudo de rejeição de carga, este caso também tem como objetivo avaliar a robustez do relé de frequência, mas, desta vez, avaliando a sua atuação para os casos de retomada de cargas. Também como no caso de rejeição de carga, este caso de estudo foi simulado para duas situações distintas. A primeira delas consiste na retomada da carga 1 do sistema e a segunda na retomada da carga 2. Para ambos os casos, a potência ativa fornecida pelo gerador foi variada conforme as tabelas 5 e 6 e durante a operação em regime permanente do sistema foi executada a retomada das cargas em questão.

Potência Ativa do GD (MW)	Potência Ativa Inicial das Cargas (MW)	Potência Ativa Retomada (MW)	Carga 1		Carga 2	
			R (Ω)	L (mH)	R (Ω)	L (mH)
30,0	10,70	20,20	-	-	4,1043	4,3547
28,0	10,70	20,20	-	-	4,1043	4,3547
26,0	10,70	20,20	-	-	4,1043	4,3547
24,0	10,70	20,20	-	-	4,1043	4,3547
22,0	10,70	20,20	-	-	4,1043	4,3547
20,0	10,70	20,20	-	-	4,1043	4,3547
18,0	10,70	20,20	-	-	4,1043	4,3547
16,0	10,70	20,20	-	-	4,1043	4,3547
14,0	10,70	20,20	-	-	4,1043	4,3547

Tabela 5: Caso de Estudo de Retomada da Carga 1.

Potência Ativa do GD (MW)	Potência Ativa das Cargas Antes da Retomada (MW)	Potência Ativa Retomada (MW)	Carga 1		Carga 2	
			R (Ω)	L (mH)	R (Ω)	L (mH)
30,0	20,7	10,70	48,5079	45,0350	-	-
28,0	20,7	10,70	48,5079	45,0350	-	-
26,0	20,7	10,70	48,5079	45,0350	-	-
24,0	20,7	10,70	48,5079	45,0350	-	-
22,0	20,7	10,70	48,5079	45,0350	-	-
20,0	20,7	10,70	48,5079	45,0350	-	-
18,0	20,7	10,70	48,5079	45,0350	-	-
16,0	20,7	10,70	48,5079	45,0350	-	-
14,0	20,7	10,70	48,5079	45,0350	-	-

Tabela 6: Caso de Estudo de Retomada da Carga 2

Para todas as simulações executadas dos casos de estudo aqui descritos, foi considerado um tempo de cinco segundos para que o gerador distribuído completasse o seu processo de partida e, com isto, o sistema alcançasse o regime permanente. Desta forma, todos os processos de ilhamento e de rejeição e tomada de cargas foram executados apenas após terem sido transcorridos 5 segundos de simulação. O uso de 5 segundos para o tempo de estabilização do sistema pode ser justificado através da figura 9, que demonstra a potência ativa fornecida pelo gerador ao longo do tempo. Na figura em questão é possível notar, logo no início da simulação, um período de transitório e estabilização do gerador (cerca de 2 segundos). Após esse período de regime permanente é possível notar um período onde a potência ativa possui um pequeno ruído (de 2 a 4 segundos). Temos então, que o gerador leva cerca de 4 segundos para completar o seu processo de partida e, então, o uso de 5 segundos para perturbar o sistema com as situações de ilhamento e de rejeição e retomada de cargas mostrou ser uma opção segura.

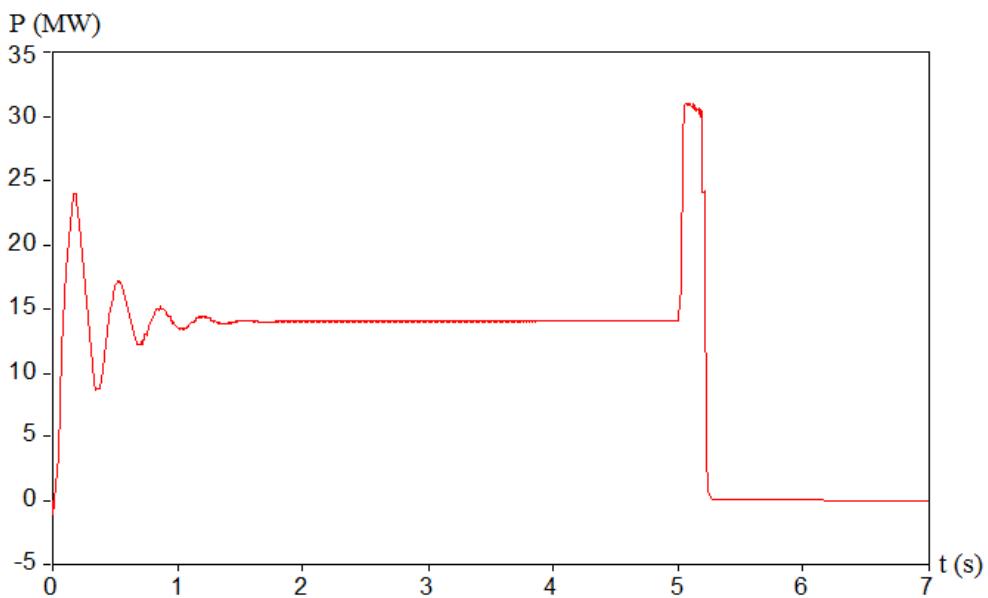


Figura 9: Potência Ativa Fornecida pelo Gerador Distribuído ao Longo do Tempo (MW).

Com a intenção de avaliar a eficácia do relé de frequência modelado em função dos seus ajustes de sub e sobre-frequência, todos os casos de estudo foram simulados para 2 (dois) diferentes ajustes desses parâmetros. O primeiro ajuste considera uma sub/sobre-frequência máxima de 1 Hz, ou seja, o ajuste do relé foi de 59 – 61 Hz. O segundo ajuste consistiu em suportar uma sub/sobre-frequência máxima de 1,5 Hz, ou seja, o ajuste do relé foi de 58,5 – 61,5 Hz. Os resultados de todas as simulações descritas acima são apresentados no próximo capítulo.

Além disso, em todas as simulações executadas a tensão de referência do gerador distribuído foi mantida em 1 pu e o fator de potência das cargas foi mantido constante (mesmo nos casos onde as cargas foram variadas para simular casos de excesso de potência ativa no sistema ilhado).

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com as simulações realizadas. Em primeiro lugar é feita a análise da eficácia do relé para os casos de detecção de ilhamento onde ocorre déficit de potência ativa na rede ilhada. Em seguida é feita a mesma análise, mas desta vez para os casos de detecção de ilhamento onde ocorre excesso de potência ativa na rede ilhada.

Após as análises da eficácia do relé de frequência modelado na detecção de ilhamento para os casos de déficit e de excesso de potência ativa na rede ilhada, é feita a análise de sua operação para os casos que não sejam de ilhamento. Vale ressaltar que o desejável é que o relé de frequência atue apenas para os casos de ilhamento. Com o objetivo de verificar essa indesejável atuação do relé, são simulados casos de rejeição e de retomada de cargas. Em um primeiro momento é feito a simulação dos casos de rejeição de carga, rejeitando primeiramente a carga 1 e posteriormente a carga 2. Em um segundo momento é feito a simulação dos casos de retomada de carga seguindo o mesmo procedimento do anterior, ou seja, retomando primeiramente a carga número 1 e posteriormente a carga número 2.

Para finalizar o capítulo é realizada uma análise do uso do filtro passa baixa na modelagem do relé de frequência. O uso deste filtro torna-se importante para eliminar das medidas de frequência os transitórios rápidos que ocorrem no sistema e que, se não filtrados, prejudicam a operação do relé.

4.1) Déficit de Potência Ativa

Os resultados obtidos com as simulações de déficit de potência ativa para os 2 ajustes dos relés são apresentados na tabela 7 e no gráfico da figura 10.

Potência Ativa do GD (MW)	Potência Ativa das Cargas (MW)	Atuação (ms) Ajuste 59,0 – 61,0 (Hz)	Atuação (ms) Ajuste 58,5 - 61,5 (Hz)
30,0	30,9	832,3	1.442,4
28,0	30,9	429,9	765,1
26,0	30,9	311,2	434,3
24,0	30,9	254,8	340,4
22,0	30,9	218,3	289,3
20,0	30,9	199,7	254,7
18,0	30,9	173,4	228,9
16,0	30,9	157,8	208,4
14,0	30,9	145,1	192,0

Tabela 7: Tempo de Atuação dos Relés para os Casos de Déficit de Potência Ativa

Pode se notar pela tabela 7 e pelo gráfico da figura 10 que o tempo de atuação do relé diminui a medida que o desbalanço de potência ativa do sistema ilhado aumenta. Este comportamento pode ser explicado através da equação de oscilação da máquina síncrona apresentado abaixo:

$$\frac{2 \cdot H}{\omega_0} \cdot \frac{d\omega}{dt} = P_M - P_{el}(1)$$

onde,

$H \rightarrow$ Constante de Inércia da Máquina

$\omega_0 \rightarrow$ Velocidade Angular Inicial da Máquina

$\omega \rightarrow$ Velocidade da Máquina

$P_M \rightarrow$ Potência mecânica fornecida à máquina

$P_{el} \rightarrow$ Potência elétrica requisitada da máquina

Após a ocorrência do ilhamento, tem-se que a potência elétrica requisitada da máquina aumenta para alimentar as cargas que antes eram alimentadas pela concessionária (figura 11). Por outro lado, a potência mecânica fornecida à máquina permanece constante. Em função disso, temos que, de acordo com a equação (1), a aceleração da máquina torna-se negativa e, então, a máquina desacelera, fazendo com que sua frequência diminua (figura 12). É possível notar ainda, pela equação (1), que quanto maior for a carga que o gerador deve assumir da concessionária, maior será a taxa de queda da velocidade do gerador e, portanto, mais rápido a frequência diminuirá.

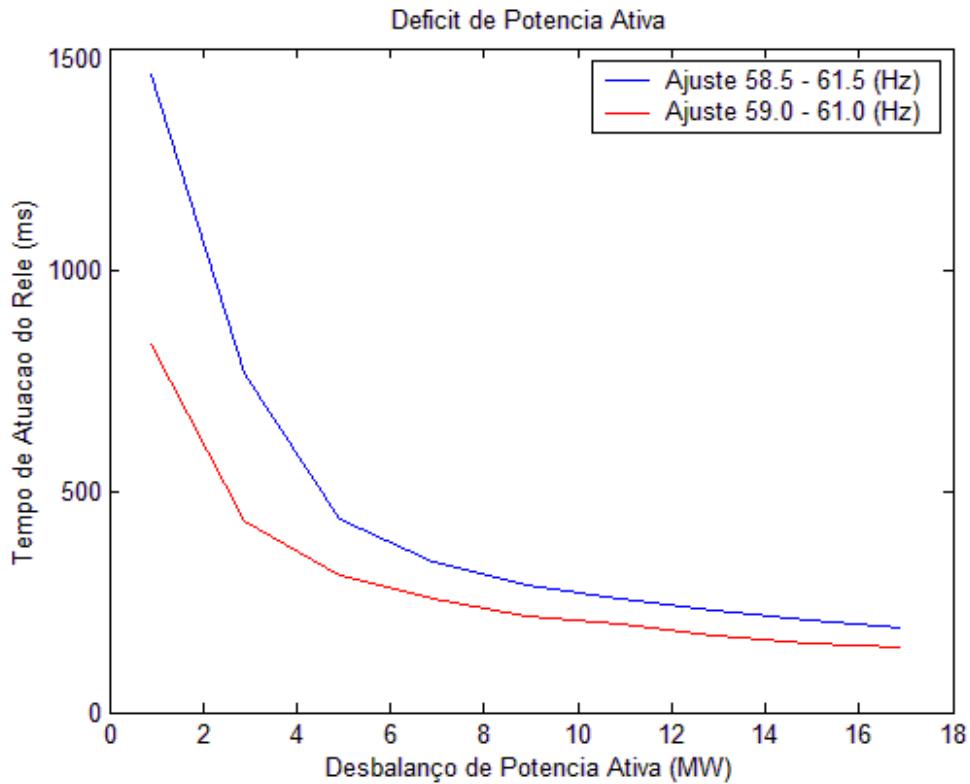


Figura 10: Tempo de Atuação dos Relés para os Casos de Déficit de Potência Ativa.

Nas figuras 11 e 12 são apresentadas, respectivamente, as curvas da potência ativa fornecida pelo gerador distribuído e da frequência elétrica do sistema ao longo do tempo, para os casos de maior desbalanço de potência ativa no sistema ilhado, ou seja, para o caso em que o gerador distribuído estava gerando apenas 14 MW, o que corresponde a 45,3% do consumo da carga. Pode ser notado um aumento da potência ativa fornecida pelo gerador e uma queda na frequência do sistema a partir dos 5 segundos de simulação, pois este é o instante que ocorre o ilhamento. Pode ser notada ainda, na figura 11, a atuação do relé após cerca de 200 ms da ocorrência de ilhamento, levando a potência ativa fornecida pelo gerador distribuído à zero. Na figura 12, nota-se ainda um súbito aumento da frequência após a atuação do relé (cerca de 5,2 segundos) que se deve ao fato de o gerador estar operando a vazio e, desta forma, sua velocidade e, consequentemente, sua frequência elétrica tendem a aumentar.

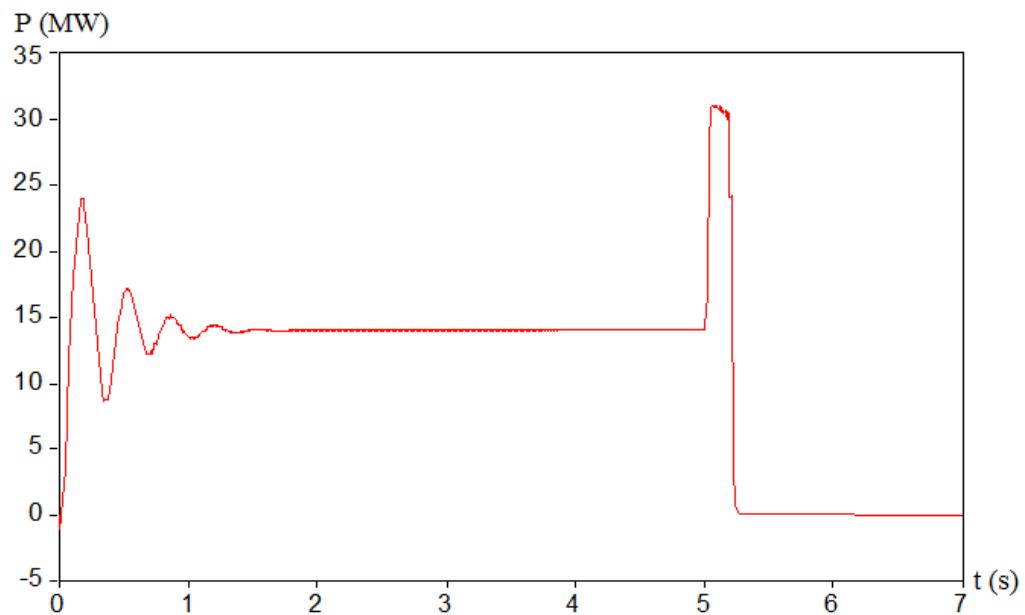


Figura 11: Potência Ativa Fornecida pelo Gerador para o Caso de Estudo com Déficit de Potência Ativa (MW).

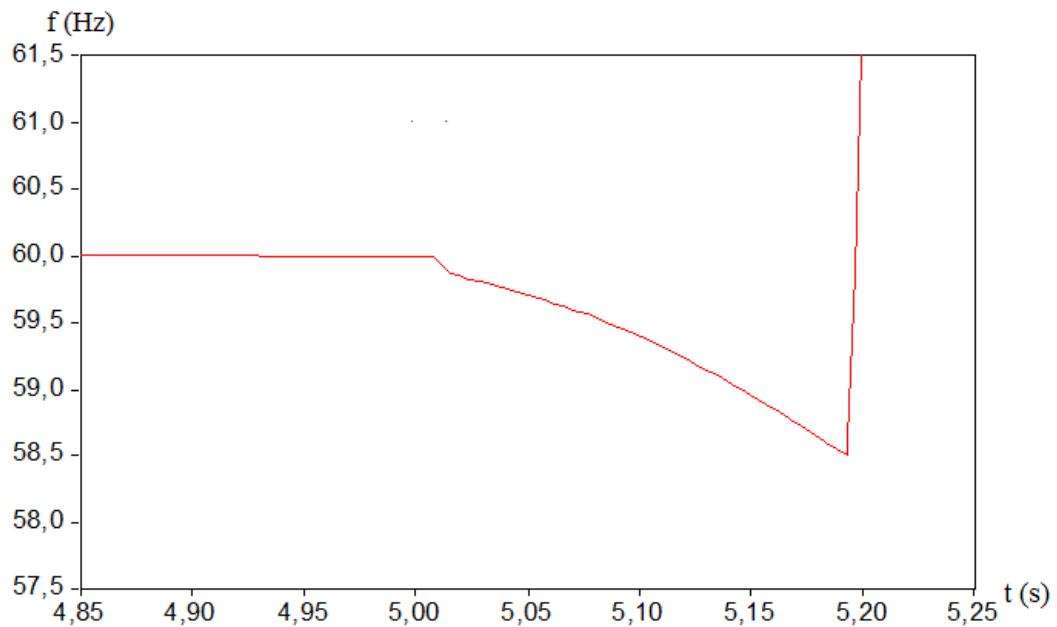


Figura 12: Frequência do Sistema para o Caso de Estudo com Déficit de Potência Ativa (Hz)

4.2) Excesso de Potência Ativa

Os resultados obtidos com as simulações de excesso de potência ativa para os 2 ajustes dos relés são apresentados na tabela 8 e no gráfico da figura 13:

Potência Ativa do GD (MW)	Potência Ativa das Cargas (MW)	Atuação (ms) Ajuste 59,0 – 61,0 (Hz)	Atuação (ms) Ajuste 58,5 – 61,5 (Hz)
30,0	12,91	157,1	209,2
30,0	14,92	175,5	233,4
30,0	16,82	196,2	261,0
30,0	18,82	227,6	303,5
30,0	20,76	270,3	361,9
30,0	22,70	335,8	450,0
30,0	24,73	466,7	616,4
30,0	26,70	744,8	946,6
30,0	28,90	1.944,8	2.181,0

Tabela 8:Tempo de Atuação dos Relés para os Casos de Excesso de Potência Ativa

Pode se notar pela tabela 8 e pela Figura 13 que o tempo de atuação do relé aumenta medida que o desbalanço de potência ativa do sistema ilhado diminui. Isto também pode ser explicado de acordo com a equação (1) apresentada na seção 4.1. No momento em que ocorreu o ilhamento, a potência elétrica requisitada da máquina diminuiu, uma vez que ela deixou de fornecer a energia que antes estava fornecendo à concessionária (figura 14). Em razão da potência mecânica fornecida à máquina ter sido mantida constante, a sua aceleração ficou positiva e, portanto, o gerador acelerou, aumentando a sua frequência (figura 15).

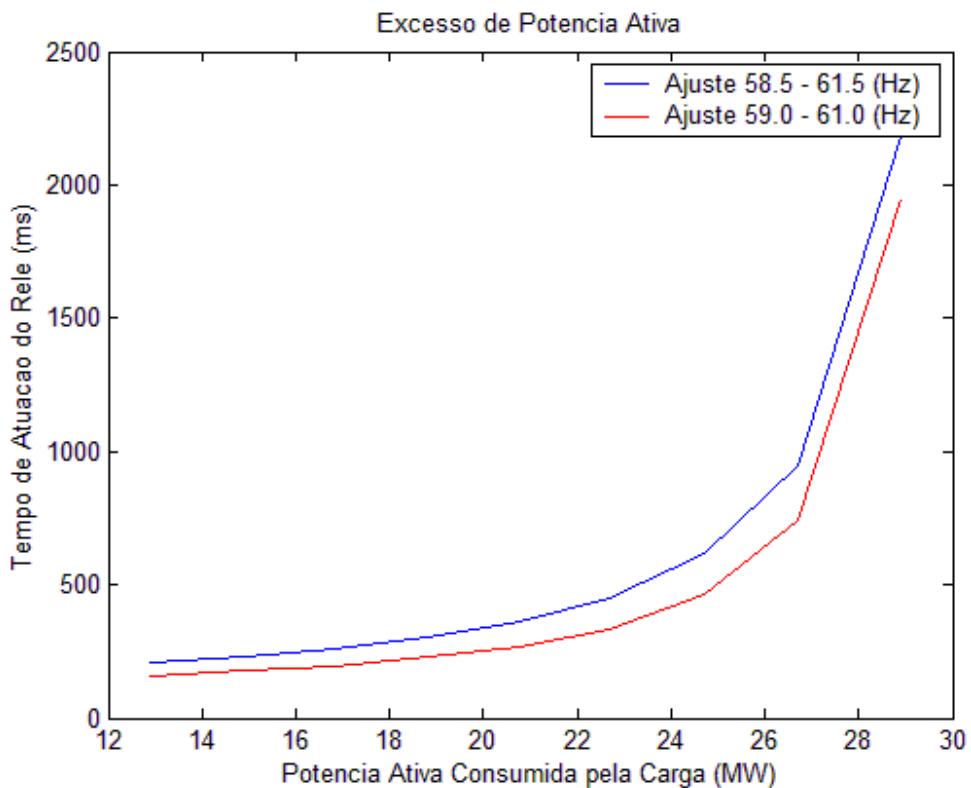


Figura 13: Tempo de Atuação dos Relés para os Casos de Excesso de Potência Ativa.

Nas figuras 14 e 15 são apresentadas, respectivamente, as curvas da potência ativa fornecida pelo gerador distribuído e da frequência elétrica do sistema ao longo do tempo, para os casos de maior desbalanço de potência ativa no sistema ilhado, ou seja, para o caso em que a carga está consumindo apenas 12,91 MW, o que corresponde a 43% da geração do gerador distribuído. Pode ser notada uma queda da potência ativa fornecida pelo gerador e um aumento na frequência do sistema a partir dos 5 segundos de simulação, pois este é o instante onde ocorre o ilhamento. Pode ser notada ainda a atuação do relé após cerca de 200 ms da ocorrência de ilhamento, levando a potência ativa fornecida pelo gerador distribuído a zero e disparando a sua frequência elétrica(devido ao mesmo fenômeno citado no caso de déficit de potência ativa).

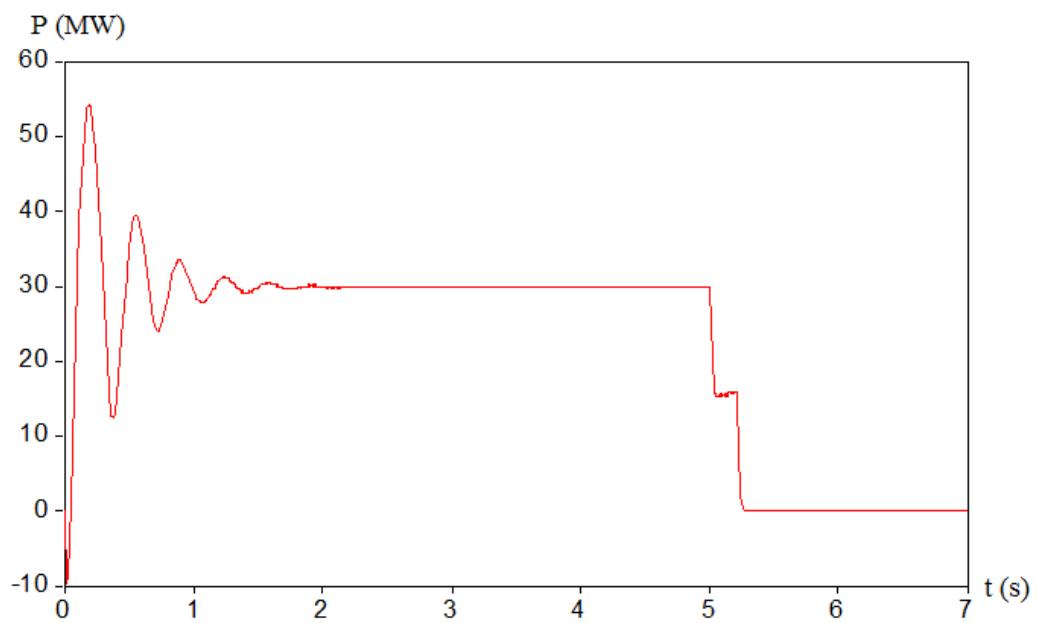


Figura 14: Potência Ativa Fornecida pelo Gerador para o Caso de Estudo com Excesso de Potência Ativa (MW).

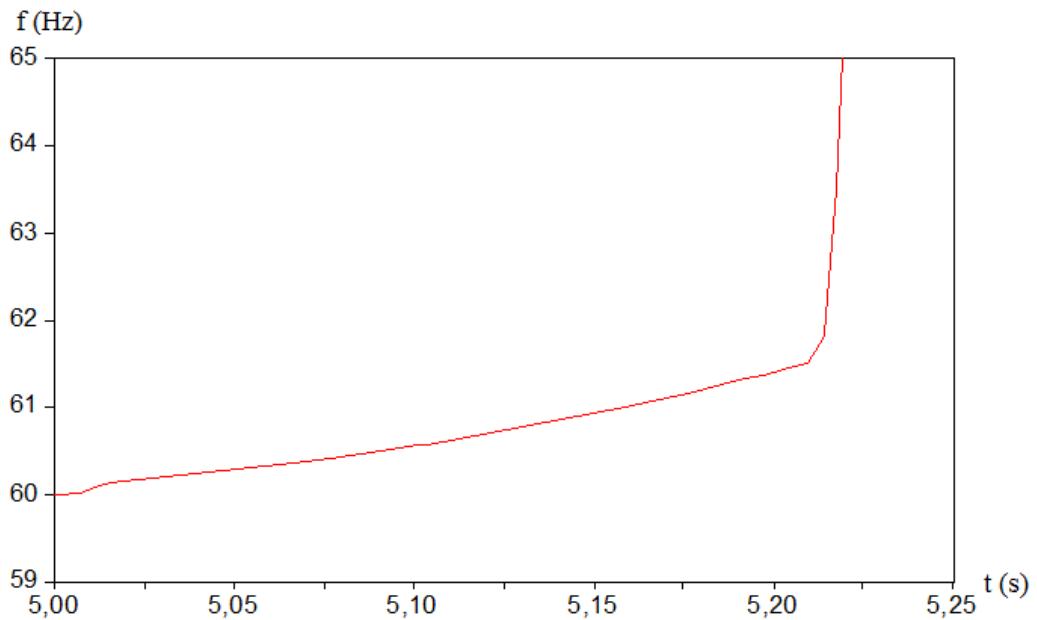


Figura 15: Frequência do Sistema para o Caso de Estudo com Excesso de Potência Ativa (Hz).

4.3) Rejeição de Carga

Os resultados obtidos com as simulações de rejeição de carga para os 2 ajustes dos relés são apresentados abaixo. Na tabela 9 é apresentado o caso de rejeição da carga 1, e na tabela 10 é apresentado o caso de rejeição da carga 2.

Potência Ativa do GD (MW)	Potência Ativa Total das Cargas (MW)	Potência Ativa Rejeitada (MW)	Atuação (ms) Ajuste 59,0 – 61,0 (Hz)	Atuação (ms) Ajuste 58,5 – 61,5 (Hz)
30,0	30,9	20,20	Não Atuou	Não Atuou
28,0	30,9	20,20	Não Atuou	Não Atuou
26,0	30,9	20,20	Não Atuou	Não Atuou
24,0	30,9	20,20	Não Atuou	Não Atuou
22,0	30,9	20,20	Não Atuou	Não Atuou
20,0	30,9	20,20	Não Atuou	Não Atuou
18,0	30,9	20,20	Não Atuou	Não Atuou
16,0	30,9	20,20	Não Atuou	Não Atuou
14,0	30,9	20,20	Não Atuou	Não Atuou

Tabela 9: Rejeição da Carga 1.

Potência Ativa do GD (MW)	Potência Ativa Total das Cargas (MW)	Potência Ativa Rejeitada (MW)	Atuação (ms) Ajuste 59,0 – 61,0 (Hz)	Atuação (ms) Ajuste 58,5 – 61,5 (Hz)
30,0	30,9	10,70	Não Atuou	Não Atuou
28,0	30,9	10,70	Não Atuou	Não Atuou
26,0	30,9	10,70	Não Atuou	Não Atuou
24,0	30,9	10,70	Não Atuou	Não Atuou
22,0	30,9	10,70	Não Atuou	Não Atuou
20,0	30,9	10,70	Não Atuou	Não Atuou
18,0	30,9	10,70	Não Atuou	Não Atuou
16,0	30,9	10,70	Não Atuou	Não Atuou
14,0	30,9	10,70	Não Atuou	Não Atuou

Tabela 10: Rejeição da Carga 2.

Pode ser notado nas tabelas 9 e 10 que o relé não atuou para nenhum caso de rejeição de cargas simulado. Para enfatizar este fato, são apresentados, nas figuras 16 e 17, os gráficos da frequência do sistema ao longo do tempo quando das rejeições das cargas 1 e 2, nos casos onde houve a maior variação. Pode ser notado nos referidos gráficos que a frequência do sistema sofre uma pequena perturbação próxima aos 5 segundos (instante onde ocorre a rejeição das cargas), mas, no entanto, manteve-se estável e alcançou o regime permanente cerca de 1 segundo depois.

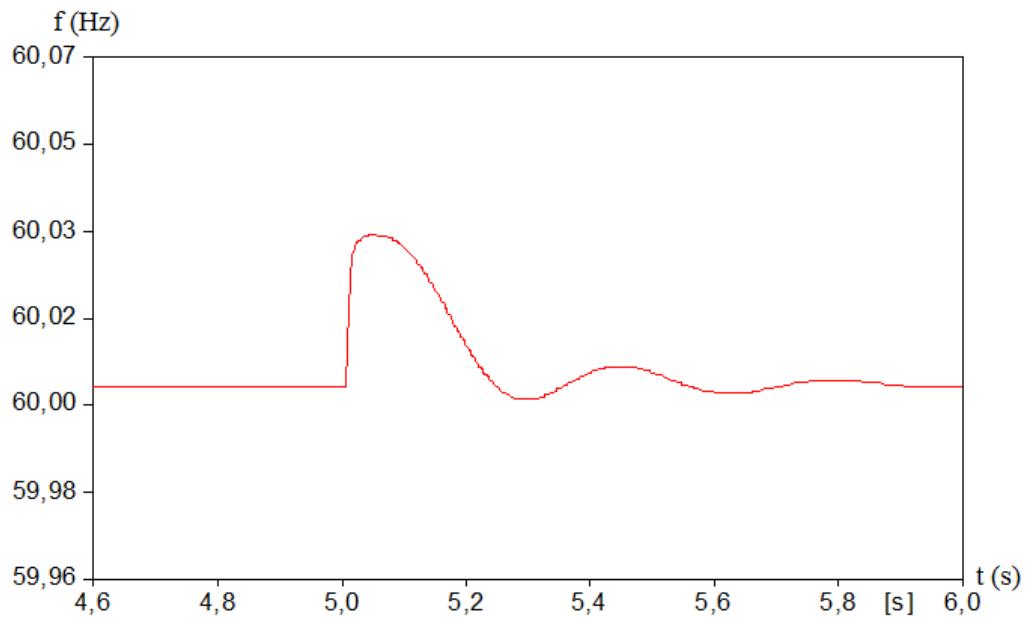


Figura 16: Frequência do Sistema para o Caso de Rejeição da Carga 1 (Hz).

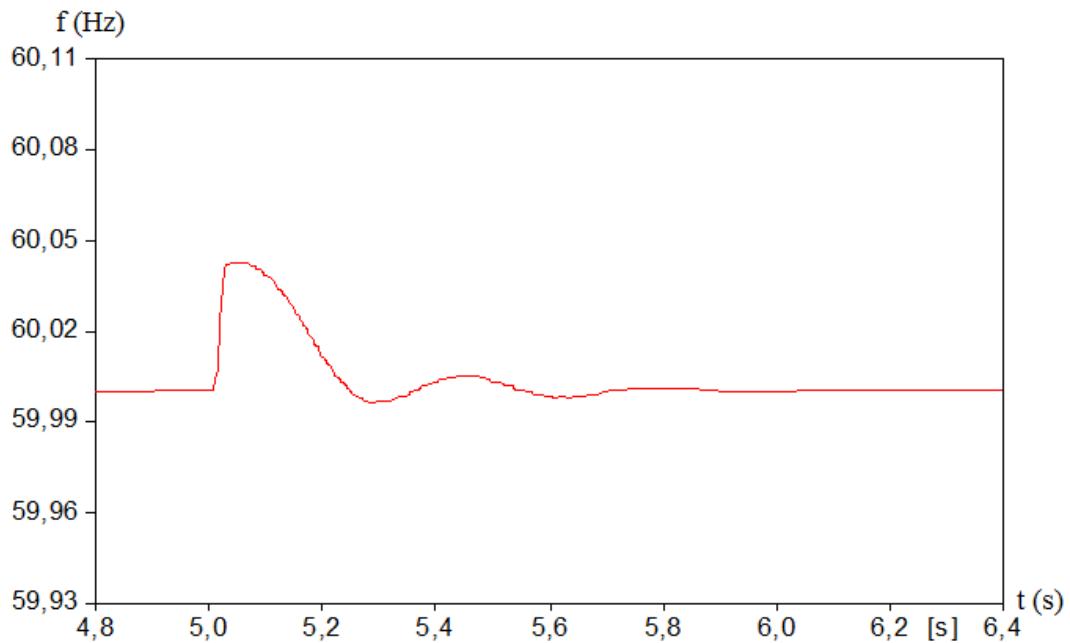


Figura 17: Frequência do Sistema para o Caso de Rejeição da Carga 2 (Hz).

4.4)Retomada de Carga

Os resultados obtidos com as simulações da retomada de carga para os 2 ajustes dos relés são apresentados abaixo. Na tabela 11 é apresentado o caso da retomada da carga 1, e, na tabela 12, é apresentado o caso da retomada da carga 2:

Potência Ativa do GD (MW)	Potência Ativa Inicial das Cargas (MW)	Potência Ativa Retomada (MW)	Atuação (ms) Ajuste 58,5 – 61,5 (Hz)	Atuação (ms) Ajuste 58,5 – 61,5 (Hz)
30,0	10,9	20,20	Não Atuou	Não Atuou
28,0	10,9	20,20	Não Atuou	Não Atuou
26,0	10,9	20,20	Não Atuou	Não Atuou
24,0	10,9	20,20	Não Atuou	Não Atuou
22,0	10,9	20,20	Não Atuou	Não Atuou
20,0	10,9	20,20	Não Atuou	Não Atuou
18,0	10,9	20,20	Não Atuou	Não Atuou
16,0	10,9	20,20	Não Atuou	Não Atuou
14,0	10,9	20,20	Não Atuou	Não Atuou

Tabela 11: Retomada da Carga 1.

Potência Ativa do GD (MW)	Potência Ativa das Cargas Antes da Retomada (MW)	Potência Ativa Retomada (MW)	Atuação (ms) Ajuste 59,0 – 61,0 (Hz)	Atuação (ms) Ajuste 58,5 – 61,5 (Hz)
30,0	20,7	10,20	Não atuou	Não Atuou
28,0	20,7	10,20	Não atuou	Não Atuou
26,0	20,7	10,20	Não atuou	Não Atuou
24,0	20,7	10,20	Não atuou	Não Atuou
22,0	20,7	10,20	Não atuou	Não Atuou
20,0	20,7	10,20	Não atuou	Não Atuou
18,0	20,7	10,20	Não atuou	Não Atuou
16,0	20,7	10,20	Não atuou	Não Atuou
14,0	20,7	10,20	Não atuou	Não Atuou

Tabela 12: Retomada da Carga 2.

Assim como nos casos de rejeição de carga pode-se notar pelas tabelas 11 e 12 que o relé de frequência não atuou para nenhum dos casos de retomada das cargas, tanto da carga 1 como da carga 2.

4.5) Justificativa do Uso do Filtro Passa Baixa no Relé de Frequência

Esta seção tem como objetivo apresentar a importância do uso do filtro passa baixa na modelagem de um relé de frequência. Este componente tem como função filtrar os transitórios de alta frequência que ocorrem no sistema, possibilitando, desta forma, que o relé atue apenas para variações na frequência fundamental, ou seja, enxergue apenas variações da forma de onda de 60 Hz.

Para cumprir este objetivo foram simulados, novamente, os casos de detecção das situações de ilhamento com déficit e excesso de potência ativa descritos nas seções 4.1 e 4.2, contudo, sem a utilização do filtro passa baixa descrito na modelagem do relé da seção 3.3. Os gráficos das figuras 18 e 19 ilustram resposta obtidas dos relés sem o uso do filtro passa baixa. É possível notar através desses gráficos que a não utilização do filtro passa baixa prejudicou a detecção de ilhamento, distorcendo a curva do tempo de detecção e fazendo com que ocorressem situações irreais, onde o tempo de detecção seria próximo de zero.

Além dos dois gráficos citados acima, é apresentado na figura 20 um gráfico de comparação entre a frequência medida no sistema com e sem o uso do filtro passa baixa do relé de frequência. É possível notar por esse gráfico que a frequência medida através do filtro possui um comportamento mais suave do que a medida sem a utilização do mesmo, justificando, desta forma, o uso do filtro passa baixa para a medição da frequência.

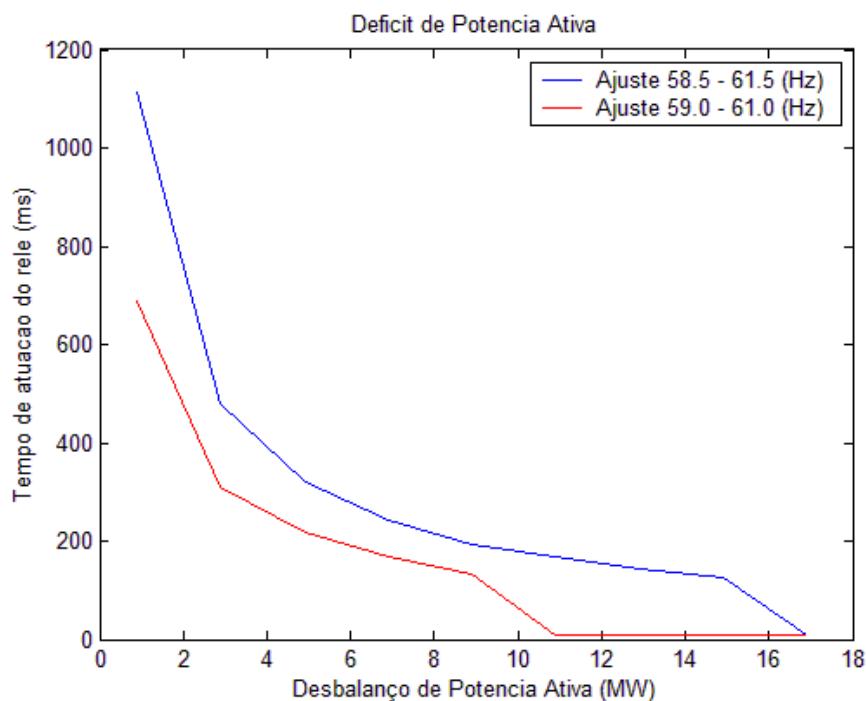


Figura 18: Tempo de Atuação dos Relés para os Casos de Déficit de Potência Ativa sem o Uso do Filtro Passa-Baixa do Relé de Frequência.

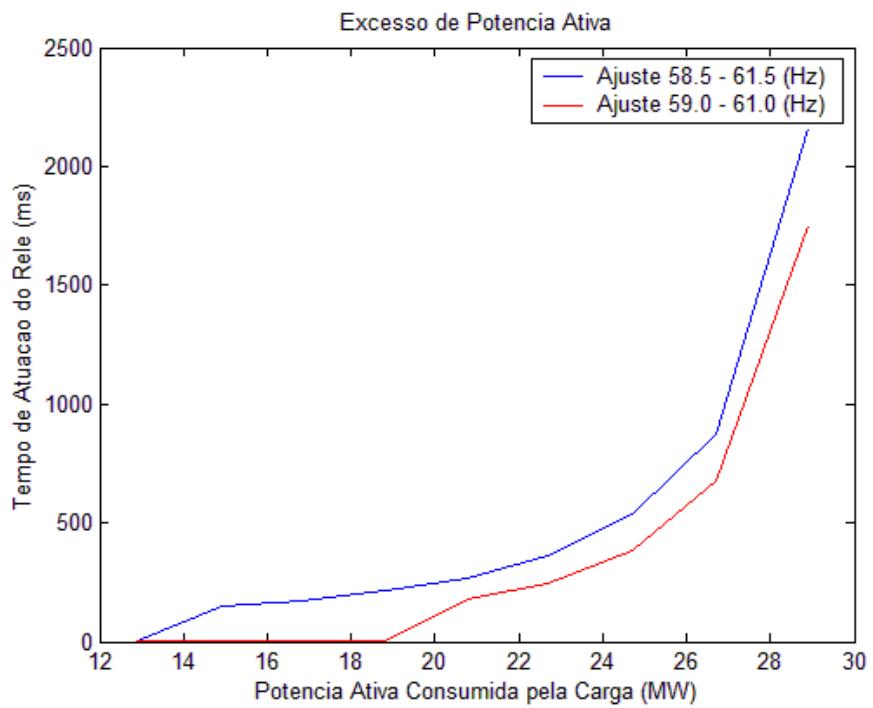


Figura 19: Tempo de Atuação dos Relés para os Casos de Excesso de Potência Ativa sem o Uso do Filtro Passa-Baixa do Relé de Frequênci a.

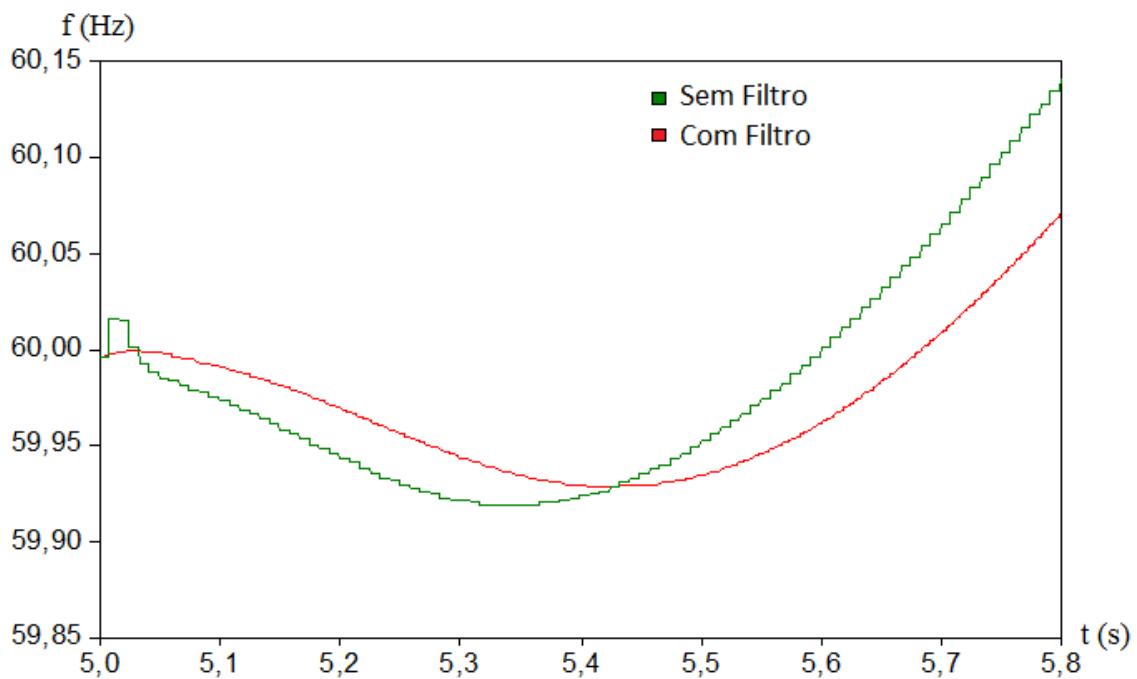


Figura 20: Comparação da Frequência Medida pelo Relé de Frequênci a com e sem o Uso do Filtro Passa-Baixa (Hz).

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

Conclui-se que o modelo do relé de frequência proposto no ATP comportou-se de acordo com o reportado na literatura [5] – [8]. O trabalho deduz ainda que o uso do filtro passa baixa é importante na modelagem dos relés de frequência, uma vez que o seu não uso causou diversos distúrbios na detecção de ilhamentos, levando a situações irreais, onde o ilhamento era detectado com um tempo praticamente nulo. Além disso, pode ser ressaltado ainda o fato de que, por ter se comportado da maneira como o esperado, o relé proposto pode ser utilizado também com outras finalidades que não a de detecção de ilhamento.

Vale a pena ressaltar que o ATP é um programa amplamente utilizado tanto nas empresas ligadas ao setor elétrico como nas universidades e que as simulações realizadas para a modelagem dos relés de frequência mostraram-se bastante eficazes e compatíveis com os resultados esperados, enfatizando, mais uma vez, a confiabilidade da ferramenta utilizada.

Conclui-se também que o relé de frequência modelado mostrou-se mais eficaz utilizando ajuste de frequência 59 – 61 Hz do que o ajuste 58,5 – 61,5 Hz, uma vez que em todas as condições de ilhamento simuladas o relé com ajuste 59 – 61 Hz teve a sua atuação mais rápida e, além disso, não atuou para nenhum dos casos de rejeição e retomada de cargas.

Os seguintes itens são citados como sugestões para trabalhos futuros:

1. Modelagem de outros relés para a detecção de ilhamento em geração distribuída:
 - Relé de Taxa de Variação de Frequência;
 - Relé de Deslocamento de Fase; e
 - Relés de sub e sobretensão.
2. Validação do modelo no ATP proposto neste trabalho através da comparação com relés reais.

CAPÍTULO 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Tolmasquim M. T., Guerreiro A., Gorini R. - Matriz energética brasileira: uma prospectiva, Novos Estudos – CEBRAP, n 79, São Paulo, 2007.

[2] ONS (Operador Nacional do Sistema) – <http://www.ons.org.br/> - Acesso em: 21 de julho de 2013

[3] ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) - <http://www.aneel.gov.br/> - Acesso em: 30 de julho de 2013.

[4] Lino M.A.B., Proteção da Interconexão de um Gerador Distribuído com o Sistema de Distribuição de Energia Elétrica - Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, 2007.

[5] Vieira J. C. M., Freitas W., França A. L. M. - Análise Comparativa sobre a Eficácia de Relés Baseados em Medidas de Frequência para Detecção de Ilhamento de Geradores Distribuídos - Revista Controle & Automação/ Vol.16 no.2/Abril, Maio e Junho 2005.

[6] Delvecchi E. D. C. - Análise de Novos Sinais para a Detecção de Ilhamento - Trabalho apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica – 2011.

[7] Pereira M. P., Fonseca C. S., Carvalho D. S., Dubé L. - Análise Transitória de Sistemas de Controle e Modelagem de Sistemas não Convencionais no Programa ATP - Informe técnico apresentado no XIII SNPTEE, Camboriú, Brasil, 1995.

[8] Rufato E.J., Nocolotti R. D., Coutinho da Silva R. M., Jorge T. M. – Avaliação do Desempenho dos Relés Anti-Ilhamento, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2010

[9] Campos R. B. S., Oliveira S. G., Kopcak I., Gonçalves da Silva W., Ribeiro C. J. - Um Estudo da Aplicação do Relé de Taxa de Variação de Frequência para Detecção de Ilhamento de Geração Distribuída - Universidade Federal de Goiás, 2010.

[10] Hernandes Leonardo, Aplicação da Metodologia das Curvas de Desempenho na Avaliação dos relés de frequência comerciais – Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

[11] Pablo Mourente Miguel, Introdução à Simulação de Relés de Proteção Usando a Linguagem “MODELS” do ATP, Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna LTDA., 2011.

[12] Rufato E.J., Nocolotti R. D., Coutinho da Silva R. M., Jorge T. M. – Avaliação do Desempenho dos Relés Anti-Ilhamento, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2010

[13] Campos R. B. S., Oliveira S. G., KopcakI.,Gonçalves da Silva W., Ribeiro C. J. - Um Estudo da Aplicação do Relé de Taxa de Variação de Frequência para Detecção de Ilhamento de Geração Distribuída - Universidade Federal de Goiás, 2010.

APÊNDICE A – DADOS DO SISTEMA ELÉTRICO

Neste apêndice serão apresentados os dados do sistema elétrico utilizado nas simulações deste trabalho.

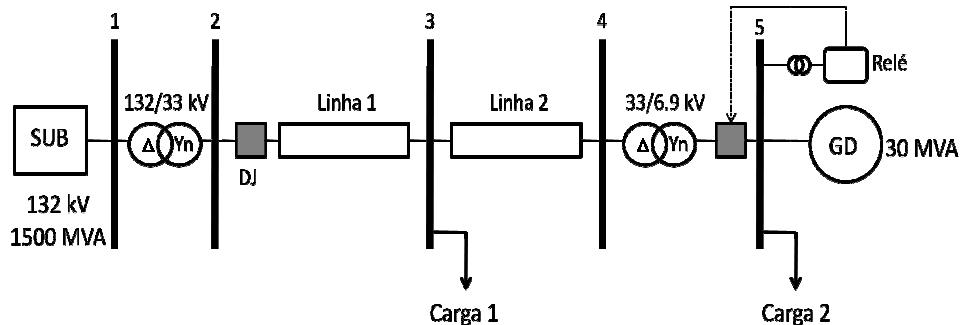


Figura 21: - Sistema Elétrico Analisado.

Tensão Nominal (kV)	132
Potência de Curto Circuito (MVA)	1500
Resistência (Ω)	0
Indutância (mH)	30,80

Tabela 13: Dados do Sistema Equivalente da Concessionária.

	Trafo 132 / 33 kV	Trafo 33 / 6,9 kV
Potência Nominal (MVA)	100	50
Conexão do primário	Triângulo	Triângulo
Tensão Nominal do Primário (kV)	132	33
Resistência do Primário (pu)	0	0
Indutância do Primário (pu)	0,02	0,02
Conexão do Secundário	Estrela com Neutro Aterrado	Estrela com Neutro Aterrado
Tensão Nominal do Secundário (kV)	33	6,9
Resistência do Secundário (pu)	0	0
Indutância do Secundário (pu)	0,02	0,02

Tabela 14: Dados dos Transformadores.

	Linha 1	Linha 2
Resistência (Ω/km)	0,3645	0,9720
Reatância Indutiva (Ω/km)	1,5664	4,1772
Comprimento (km)	1,00	0,50

Tabela 15: Dados das Linhas de Transmissão.

Tipo do Gerador	Pólos Lisos
Número de pares de polos	2
Potência Nominal (MVA)	30
Tensão Nominal (V)	6.900
Constante de Inércia (s)	1,5
X_d (pu)	1,400
X'_d (pu)	0,231
X''_d (pu)	0,118
X_q (pu)	1,372
X'_q (pu)	0,800
X''_q (pu)	0,118
T'_d (s)	5,500
T''_d (s)	0,050
T'_q (s)	1,250
T''_q (s)	0,190
Resistência do Estator (pu)	0,0014
Reatância de Dispersão (pu)	0,0500

Tabela 16: Dados do Gerador Distribuído.

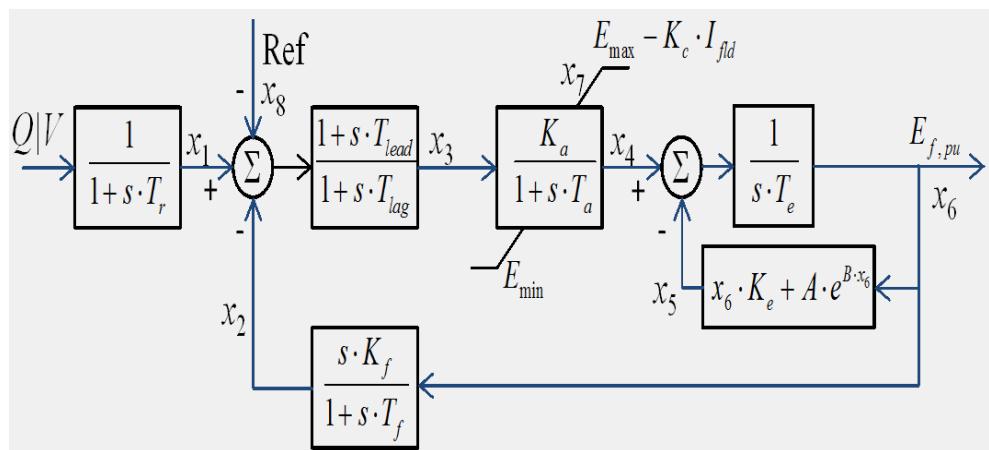


Figura 22: Sistema de Controle de Excitação do Gerador Distribuído.

T_r	0,1
Ref	1
T_{lead}	0,001
T_{lag}	0,001
K_a	270
T_a	0,1
E_{max}	7,5
K_c	0
E_{min}	-4
T_e	0,65
K_e	1
A	0
B	1
K_f	0,048
T_f	0,95

Tabela 17: Dados do Sistema de Excitação do Gerador Distribuído