



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

BRUNA LÍVIA DE OLIVEIRA ALMEIDA

Avaliação Dinâmica de uma Rede Elétrica em Cenário de Estiagem

João Pessoa – Paraíba

Junho/2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

BRUNA LÍVIA DE OLIVEIRA ALMEIDA

Avaliação Dinâmica de uma Rede Elétrica em Cenário de Estiagem

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba como um dos pré-requisitos para a obtenção do Título em Bacharel de Engenheiro Eletricista sob orientação do Prof. Dr. Alexandre Castro.

João Pessoa – Paraíba

Junho/2018

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

Almeida, Bruna Livia de Oliveira.

Avaliação Dinâmica de uma Rede Elétrica em Cenário de
Estiagem / Bruna Livia de Oliveira Almeida. - João
Pessoa, 2018.

57 f.

Orientação: Alexandre Cezar de Castro.

Coorientação: Helon David de Macedo Braz.

Monografia (Graduação) - UFPB/CEAR.

1. Usinas Hidrelétrica, Térmica e Eólica, seca. I.
Castro, Alexandre Cezar de. II. Braz, Helon David de
Macedo. III. Título.

UFPB/BC

BRUNA LÍVIA DE OLIVEIRA ALMEIDA

Avaliação Dinâmica de uma Rede Elétrica em Cenário de Estiagem

Trabalho de Conclusão de Curso submetida ao corpo de docente do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau em Bacharel em Engenharia Elétrica.

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Alexandre Cezar de Castro – Orientador

Prof. Dr. Helon David de Macêdo Braz - Avaliador

Prof. Dr. Rogério Gaspar de Almeida - Avaliador

**João Pessoa – Paraíba
Junho/2018**

RESUMO

O presente trabalho apresenta os principais conceitos do Sistema Elétrico de Potência (SEP) e pretende analisar o comportamento transitório e dinâmico de uma rede elétrica, constituída por uma usina Térmica a vapor, uma usina Hidrelétrica e por um parque eólico. A avaliação desse desempenho baseia-se em simulação computacional em ambiente MATLAB/SIMULINK[®]. Para examinar o sistema em estudo, foi necessária a análise, desenvolvimento e a implementação adequada das representações matemáticas dos componentes da rede elétrica. Os estudos de caso contemplam perturbações no sistema como curto-circuito e corte de carga, e serão mostrados os comportamentos das principais grandezas elétricas e mecânicas do gerador de indução e síncrono equivalentes em função do tempo. A motivação para abordar o seguinte assunto é que a energia térmica e eólica tem se mostrado como uma alternativa viável para o fornecimento de energia elétrica em um cenário de seca.

Palavras chaves: Usina Hidrelétrica. Usina Térmica. Parque Eólico. Análise transitória e dinâmica de redes elétricas, seca.

ABSTRACT

The present work presents the main concepts of the Electric Power System (SEP) and intends to analyze the transient and dynamic behavior of an electric grid, consisting of a steam thermal plant, a hydroelectric plant and a wind farm. The evaluation of this performance is based on computer simulation in MATLAB/SIMULINK® ambiente environment. To examine the system under study, it was necessary to analyze, develop and properly implement the mathematical representations of the components of the power grid. The case studies contemplate perturbations in the system such as short circuit and load shedding, and the behavior of the main electrical and mechanical quantities of the induction and synchronous generator equivalent as a function of time will be shown. The motivation to address the following subject is that thermal and wind energy has been shown as a viable alternative to the supply of electricity in a drought scenario.

Keys Words: Hydroelectric Plant. Thermal Plant. Wind farm. Transient and dynamic analysis of electrical networks, Drought.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus, por ser meu maior incentivador, meu grande amigo e aquele que melhor cuida de mim. Durante todo meu curso, foi Ele que esteve comigo me ajudando, mostrando o seu amor e dizendo todo dia: “VOCÊ CONSEGUE”. Ao Senhor, toda honra, toda glória e todo louvor.

Aos meus pais, Braz e Elzenir, por serem tão maravilhosos, por nunca desistirem de mim, por se alegrarem com cada vitória, por orarem por mim, por investir na minha vida profissional e espiritual. Nunca esquecerei todo esforço que fizeram pra me formar e formar os meus irmãos. Essa vitória é nossa.

Aos meus irmãos, Débora e Jonas, meus companheirinhos de sempre, carinhosamente minha Pinha e meu Pinho, que gratidão a Deus sinto por terem vocês como meus melhores amigos, aqueles que sempre poderei contar e confiar. Obrigada por lutarem comigo durante essa jornada, por me abraçarem durante a tristeza, por me alegrar, por serem meu porto seguro.

Ao meu marido Ramon, por ser minha melhor escolha de vida. Obrigada por todo seu apoio incondicional, por sempre mostrar que eu posso ser melhor do que eu acredito, por crescer junto comigo e ser meu amigo e grande amor durante todo o curso.

A toda família Oliveira, em especial a família da minha querida Tia Elza, que me acolheu em João Pessoa, que me deu amor, que me tratou como filha e até hoje tem cuidado e se preocupado comigo. Ressalto também minhas primas Dinah e Elaine por serem companheiras, ajudadoras e amigas.

Na pessoa da minha sogra, Vera Lúcia, agradeço a toda família Vasconcelos por me receber tão bem na família, aos meus cunhados Igor e Lucas, minha gratidão pela nossa irmandade. A querida família de Tio Genival e de Tio Carlinhos, obrigada por serem meus amigos, por me apoiarem, por se tornarem minha família e estarem verdadeiramente me mostrando o cuidado de DEUS por mim em cada um dos seus gestos.

A minha tia Divina, por ser minha madrinha do coração, minha mãezinha, por sempre orar por cada uma das minhas provas e trabalhos, por estar comigo desde sempre e espero que para sempre.

As queridas Pollyana e Paloma, muito obrigada por estarem me mostrando o que é amizade. Polly, prima linda, você que sempre foi minha irmã mais velha, obrigada por todo apoio e amor dedicado a mim. Palominha, você que chegou por último, mas já mostrou o quanto

é especial, ajudadora, amorosa, amiga de verdade, obrigada pelo cuidado com todos nós, especialmente com Deby.

Aos queridos professores Rogério e Helon, obrigada por toda orientação e ajuda, vocês são exemplos de profissionais pra mim. A Rogério, pela sugestão do tema, incentivo e compreensão. Ao orientador Alexandre, grata por todo apoio.

A todos os amigos que ganhei durante essa jornada, pelos trabalhos compartilhados, pelas noites estudando para as provas, pelas saídas, pelo amor e apoio.

Aos demais colegas de universidade, com os quais convivi nesses períodos ao longo do curso, com os quais pude dividir e adquirir conhecimento.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1- Situação da seca no Nordeneste entre os anos de 2012 e 2016..... | 3 |
| Figura 2 – Modelo da Usina Hídrica..... | 12 |
| Figura 3- Máquina Síncrona Trifásica..... | 13 |
| Figura 4 – Modelo da Máquina Síncrona do MATLAB®..... | 14 |
| Figura 5 – Modelo Turbina Hídrica. | 15 |
| Figura 6 - Modelo Regulador de Velocidade. | 15 |
| Figura 7 – Modelo Regulador de Tensão. | 16 |
| Figura 8 – Modelo Turbina Térmica. | 17 |
| Figura 9 - Modelo do Aerogerador..... | 18 |
| Figura 10 - Modelo da Máquina Assíncrona do MATLAB®..... | 18 |
| Figura 11 – Rede Elétrica Simulada..... | 23 |
| Figura 12 – Rede Elétrica de 11 barras simulada no MATLAB ®..... | 23 |
| Figura 13 – Máscara Usina Térmica. | 24 |
| Figura 14 - Bloco da Usina Térmica contendo o regulador de velocidade e de tensão. | 25 |
| Figura 15 - Mascara da Usina Hídrica..... | 26 |
| Figura 16 – Máscara da Usina de Geração eólica. | 27 |
| Figura 17 - Representação da Usina Eólica com a turbina e o gerador de indução. | 27 |
| Figura 18 - Bloco da turbina eólica no simulink. | 28 |
| Figura 19 – Representação matemática da turbina eólica. | 28 |
| Figura 20 - Velocidade do rotor da Usina Térmica no corte de carga. | 32 |
| Figura 21 - Tensão terminal da máquina síncrona para a usina térmica no corte de carga..... | 32 |
| Figura 22 - Velocidade do rotor da Usina Hídrica no corte de carga..... | 33 |
| Figura 23 - Tensão terminal da máquina síncrona para a usina hídrica no corte de carga..... | 34 |
| Figura 24 - Velocidade do rotor da máquina de indução da usina eólica no corte de carga. | 35 |
| Figura 25 - Tensão Terminal da máquina de indução da usina eólica no corte de carga..... | 35 |
| Figura 26 - Velocidade do rotor da máquina síncrona da usina térmica no curto-circuito. | 36 |
| Figura 27 - Tensão Terminal da máquina síncrona da usina térmica no curto-circuito..... | 37 |
| Figura 28 - Velocidade do rotor da máquina síncrona da usina hídrica no curto-circuito. | 37 |
| Figura 29 - Tensão Terminal da máquina síncrona da usina hídrica no curto-circuito..... | 38 |
| Figura 30 Velocidade do rotor da máquina de indução da usina eólica no curto-circuito. | 39 |
| Figura 31 – Tensão de terminal da máquina de indução da usina eólica no curto-circuito. | 39 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Cargas nas barras da rede elétrica em estudo. | 22 |
| Tabela 2 - Dados do gerador síncrono da Usina Térmica. | 24 |
| Tabela 3 - Dados do gerador síncrono da Usina Hídrica. | 26 |
| Tabela 4 - Parâmetros da turbina eólica. | 28 |
| Tabela 5 - Parâmetros do gerador de indução. | 29 |
| Tabela 6 – Cenários de Simulação. | 31 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES | 1 |
| 1.2 MOTIVAÇÃO | 2 |
| 1.3 METODOLOGIA | 4 |
| 1.4 OBJETIVOS..... | 4 |
| 1.4.1 <i>Objetivos específicos</i> | 5 |
| 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO | 5 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 7 |
| 2.1 O SISTEMA DE GERAÇÃO | 7 |
| 2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 8 |
| 3 OS SISTEMAS DE GERAÇÃO CONVENCIONAIS (HÍDRICA E TÉRMICA) E NÃO CONVENCIONAIS..... | 11 |
| 3.1 SISTEMA DE GERAÇÃO HÍDRICA | 11 |
| 3.1.1 <i>Máquina Síncrona</i> | 12 |
| 3.1.2 <i>Turbina Hídrica com Regulador de Velocidade</i> | 14 |
| 3.1.3 <i>Regulador de Tensão (Automatic Voltage Regulator – AVR)</i> | 15 |
| 3.2 SISTEMA DE GERAÇÃO TÉRMICA | 16 |
| 3.2.1 <i>Turbina Térmica a Vapor</i> | 17 |
| 3.3 SISTEMA DE GERAÇÃO NÃO CONVENCIONAL – EÓLICA | 17 |
| 3.3.1 <i>Máquina de Indução</i> | 18 |
| 3.3.2 <i>Turbina Eólica</i> | 19 |
| 3.4 REPRESENTAÇÃO MULTIMÁQUINA | 20 |
| 4 REPRESENTAÇÃO DOS MODELOS DINÂMICOS..... | 22 |
| 4.1 A REDE ELÉTRICA EM SIMULINK/MATLAB® | 22 |
| 4.1.1 <i>Bloco em Simulink da Rede Elétrica</i> | 23 |
| 4.2 USINA TÉRMICA..... | 24 |
| 4.3 A USINA HÍDRICA..... | 25 |
| 4.4 USINA EÓLICA | 26 |

| | |
|--|-----------|
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 30 |
| 5.1 CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO..... | 30 |
| 5.2 CORTE DE CARGA..... | 31 |
| 5.2.1 Usina Térmica..... | 31 |
| 5.2.2 Usina Hídrica..... | 33 |
| 5.2.3 Usina Eólica..... | 34 |
| 5.3 CURTO-CIRCUITO..... | 36 |
| 5.3.1 Usina Térmica..... | 36 |
| 5.3.2 Usina Hídrica..... | 37 |
| 5.3.3 Usina Eólica..... | 38 |
| 6 CONCLUSÕES..... | 41 |
| 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 43 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

A energia elétrica se tornou a principal fonte de luz, calor e força utilizada no mundo moderno [1]. É um elemento essencial para qualquer nação, pois é à base de manutenção do desenvolvimento econômico e dos altos padrões de vida que atualmente se verificam. A eletricidade é transportada e chega aos consumidores por meio dos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia.

A geração é a etapa onde alguma forma de energia é transformada em energia elétrica a partir de máquinas como turbinas e geradores. A energia produzida é conduzida até os centros de distribuição pelas linhas de transmissão. Para minimizar as perdas no percurso, as linhas passam por estações elevadoras do nível de tensão. A distribuição então se responsabiliza por abaixar esse nível e em seguida distribuir a energia até o consumidor final.

O Brasil é um dos países com grande potencial energético na atualidade. O país tem um Sistema Interligado Nacional – SIN – com tamanho e características que o tornam destaque no cenário mundial. Os 4.901 empreendimentos em operação, totalizam-se mais de 157 GW de potência instalada. Para os próximos anos, está prevista uma adição de 19 GW nesse volume, originados de 212 projetos em construção e 408 novos [2].

A matriz energética brasileira é composta primordialmente por hidrelétricas. Cerca de 70% de toda energia produzida no país vem dessa fonte de energia. As cinco maiores hidrelétricas do país são Itaipu (14 mil MW), Belo Monte (11,233 GW), São Luis de Tapajós (8,38 GW) Tucuruí (8,37 GW) e Santo Antônio (3,3 GW) [3]. Além da geração hídrica, as usinas com derivados de petróleo, gás natural, carvão mineral, eólica e nuclear complementam a matriz.

Um grande problema da matriz primordialmente hídrica é o período de seca. Com a falta das chuvas e os reservatórios baixos, menos turbinas estarão funcionando, conseqüentemente haverá uma queda de geração hídrica. Com isso, é necessário o apoio de outras fontes de geração de energia, como a térmica e eólica.

A energia eólica tem se destacado dentro do conjunto específico das energias renováveis, por ser das que oferece maior maturidade tecnológica para a produção de eletricidade em grande escala. No entanto, a inserção cada vez mais crescente de outras fontes de energia no sistema elétrico nacional tem alterado a dinâmica da rede.

A tendência de outros sistemas de geração substituir as usinas hidrelétricas pode levar ao enfraquecimento da inércia elétrica do sistema (massa girante). A geração hídrica, devido as suas grandes máquinas, tem uma inércia maior, maior geração e impacto no sistema elétrico. Já uma geração térmica e/ou eólica tem máquinas mais leves e com menores impactos no sistema. Ou seja, no período de seca o sistema estará mais vulnerável aos prováveis defeitos e contingências da rede.

Quando defeitos, como curtos-circuitos ou cortes de cargas, ocorrem nas redes elétricas, o sistema tende a apresentar oscilações nas suas ondas eletromagnéticas de tensão e corrente que viajam pelas linhas elétricas, podendo, dependendo do grau da perturbação, desestabilizar o sistema e desencadear o colapso do mesmo (conhecido *blackout*).

A avaliação do comportamento dinâmico e transitório de um Sistema Elétrico de Potência – SEP – é fundamentada em simulação computacional envolvendo específicos modelos matemáticos dos diferentes componentes do sistema que contemplam as três principais áreas de um SEP – Geração, Transmissão e Distribuição. Para um bom funcionamento é necessário que todos esses setores estejam funcionando adequadamente.

Portanto, a necessidade de estudos do comportamento transitório e dinâmico de um sistema elétrico de potência, envolvendo a integração de diferentes sistemas de geração, é imprescindível.

1.2 MOTIVAÇÃO

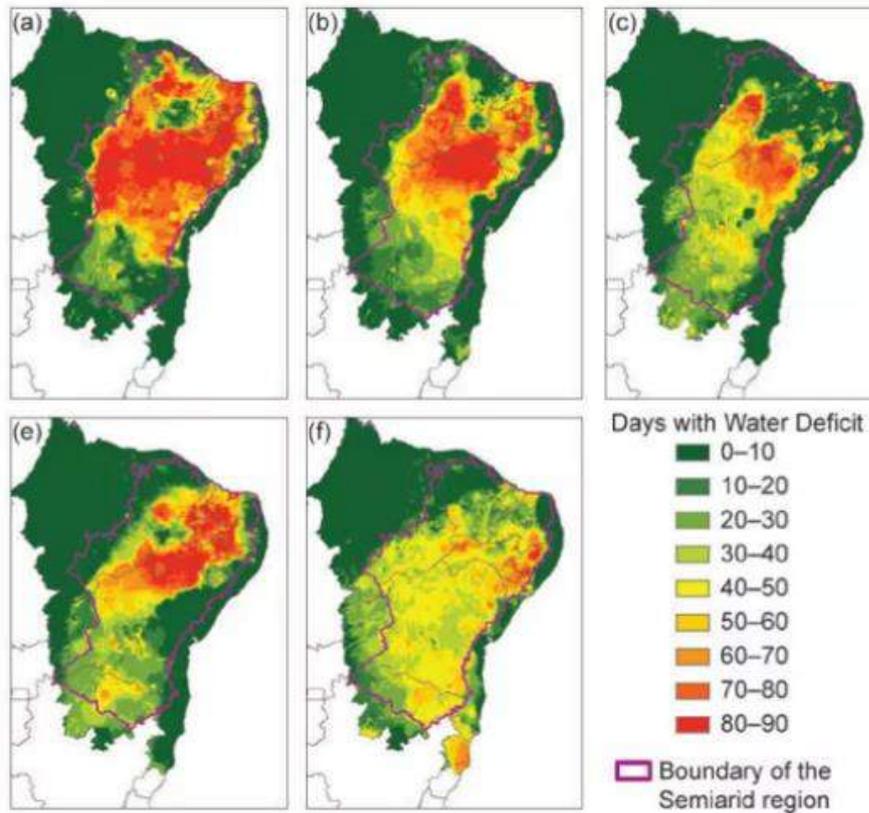
O Jornal O Globo, em maio de 2017, noticiava que desde 2012 o Nordeste vivia a maior seca dos últimos 100 anos. O período de estiagem afetou a vida de 23 milhões de pessoas que vivem no semiárido nordestino. Foram 600 mil animais perdidos só em Pernambuco e mais de 600 cidades em estado de emergência por causa da falta de água [4].

Em agosto de 2017, o jornal *Época* também noticiou a publicação da edição mais atualizada do *The State of the climate in 2016* realizada pela Sociedade Meteorológica Americana (AMS) e a Agência os Oceanos e Atmosfera dos Estados Unidos (NOAA). Foi realizada uma análise de como o clima se comportou no planeta no ano de 2016. O estudo analisa eventos extremos, e um deles chama a atenção: a seca no Nordeste do Brasileiro. “Em 2016, a seca nesta parte do país foi observada pelo quinto ano consecutivo, fazendo dela a mais longa já registrada na região”, diz o estudo [5].

Pode ser visualizada na Figura 1 a quantidade de dias em que houve déficit de água no Nordeste. Com a seca os reservatórios de água ficaram com níveis baixíssimos. Houve uma

queda na geração hídrica, logo inserção de outras fontes na matriz como térmica e eólica foram necessárias. Houve também um aumento significativo de intercâmbio de energia das outras regiões do Brasil para o Nordeste.

Figura 1- Situação da seca no Nordeste entre os anos de 2012 e 2016.



Fonte: Ref. [5]

O início de 2018 tem melhorado essa situação, pois está voltando a chover no Nordeste. Porém, analisar a influência da seca, com inserção de outras formas de geração na dinâmica da rede, auxiliará na compreensão do comportamento do sistema elétrico durante período de estiagem.

Um exemplo da resposta do sistema em um cenário de pouca geração foi o apagão ocorrido em março de 2018. O Nordeste estava importando energia do Norte, devido a sua geração não estar suprindo totalmente a demanda, quando houve o desligamento do bipolo 1 do Elo CC Xingu – Estreito, interrompendo 4000 MW.

Houve redistribuição de potência para as interligações Norte – Nordeste e Norte – Sudeste, provocando o ilhamento da região Norte e da região Nordeste do restante do SIN. Na região Nordeste houve déficit de geração e atuação do ERAC, interrompendo cerca de 1.000 MW de carga. Entretanto, cerca de 40 segundos após o ilhamento da região, houve o *blackout*. Ressalta-

se ainda que parte das cargas permaneceram atendidas a partir da SE Bom Jesus da Lapa II, conectada às regiões Sul/Sudeste/Centro-Oeste [6].

Uma das hipóteses que pode ter contribuído para o *blackout* de parte do sistema elétrico brasileiro aponta para um cenário em que o sistema elétrico brasileiro como um todo está fracamente estabilizado. A geração térmica e outras gerações não convencionais que em um momento de pouca geração híbrida são mais preponderantes na matriz estariam enfraquecendo sua inércia e tornando a rede mais vulnerável a esse tipo de transtorno?

Os transientes causados pelas perturbações são oscilatórios, e se o sistema for estável, essas oscilações serão amortecidas até que o sistema alcance um novo estado de equilíbrio. O ajuste do sistema a uma nova condição, bem como o seu desempenho durante esse intervalo é chamado de desempenho dinâmico do sistema.

A partir do que foi exposto acima, se pode introduzir o conceito de estabilidade: “Se a resposta oscilatória de um sistema de potência durante o período transitório após uma perturbação é amortecida e o sistema alcança, em um tempo finito, uma nova condição de operação, diz-se que o sistema é estável, caso contrário, o sistema é instável” [7].

Os sistemas de geração que exploram outras fontes de energia podem afetar o desempenho transitório das máquinas síncronas e, portanto, podem conduzir o sistema a um novo estado de equilíbrio, bem como a um estado de instabilidade. Cada tipo de geração responde diferente a algum distúrbio na rede. E estudar essa resposta é a motivação maior desse trabalho.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia desse trabalho foi baseada nos modelos matemáticos das máquinas síncronas e de indução, reguladores de velocidade e de tensão, turbinas hídricas, térmicas e eólicas que são bastante consolidados na literatura. Stavrakakis, Manchisvic, Kundur e Anderson foram os autores que contribuíram para o conhecimento científico/matemático desse trabalho.

1.4 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo apresentar um estudo sobre como se comporta dinâmica e transitoriamente uma rede elétrica com diferentes tipos de geração em um período de estiagem.

1.4.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A rede elétrica adotada para estudo é constituída de uma usina convencional hidrelétrica, usina térmica a vapor e um parque eólico. Sua avaliação foi realizada em ambiente MATLAB/SIMULINK[®], onde foram utilizados modelos pré-definidos das máquinas elétricas e linhas de transmissão do próprio MATLAB[®] através de seu *Toolbox SimPowerSystem*. Logo, este trabalho foi conduzido com os seguintes objetivos:

- Levantar de material a cerca da literatura especializada;
- Modelizar a usina Térmica a vapor sem reaquecimento de um único estágio que abrange o gerador síncrono e seus reguladores de tensão e velocidade;
- Modelizar a usina Hídrica que abrange o gerador síncrono e seus reguladores de tensão e velocidade;
- Modelizar o aerogerador envolvendo o gerador de indução convencional e a turbina eólica, sendo esta representada pela sua curva característica de desempenho aerodinâmico;
- Implementar os reguladores e modelos pré-definidos em ambiente MATLAB/SIMULINK[®];
- Avaliar o sistema de estudo em diferentes cenários de perturbação (como corte de carga e curto-circuito)

Face aos objetivos descritos anteriormente, este trabalho encontra-se estruturado conforme se descreve no tópico a seguir.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Quanto à organização, o trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos, que são descritos a seguir:

1. O capítulo 1 com a introdução, objetivos, metodologia e estrutura do trabalho.
2. O capítulo 2 abordará as referências bibliográficas já existentes dentro desse tema.
3. O capítulo 3 descreverá as principais características das três gerações estudadas: hídrica, térmica e eólica.
4. O capítulo 4 apresentará a modelização dos componentes que constituem o sistema elétrico adotado para o estudo de análise transitória e dinâmica de sistemas de potência.

5. No capítulo 5, será apresentada a implementação dos modelos matemáticos descritos no capítulo 3 no ambiente computacional MATLAB/SIMULINK[®] e os resultados de simulação para cada cenário proposto.
6. Por fim, no capítulo 6 abordam-se as principais conclusões que resultaram deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentadas algumas das principais literaturas que abordaram o tema a ser discutido nesse trabalho. Bem como os principais conceitos e definições associados a temática proposta.

2.1 O SISTEMA DE GERAÇÃO

A geração é a parte do sistema elétrico que se obtém a energia elétrica proveniente da conversão de alguma outra forma de energia a partir de um conjunto de máquinas caracterizadas como turbinas e geradores elétricos. Na geração, a energia elétrica apresenta tensão alternada, a qual é expressa por uma onda senoidal, com frequência fixa e amplitude que varia conforme o tipo de gerador.

A geração predominante no Brasil é a geração hídrica. Nesse tipo de geração a pressão da água gira a turbina, transformando energia potencial em energia cinética. A turbina, por sua vez, está conectada ao gerador que transformará a energia cinética em energia elétrica. A energia hidroelétrica é uma energia mais barata que as demais, com mais vantagens e menos impactos ambientais. Ela é considerada uma energia limpa, ou seja, não gera resíduos para o meio ambiente.

O Brasil possui o maior potencial hídrico da Terra. Porém, o aumento da demanda, da seca e principalmente do efeito estufa, tem trazido a necessidade de diversificar a matriz energética brasileira. Dentro dessa diversificação, a energia renovável que vem se destacando entre as demais fontes é a energia eólica.

No dia 16 de julho de 2017, a energia eólica respondeu por 12,6% de toda a energia demandada ao Sistema Interligado Nacional (SIN). No Nordeste, um novo recorde: 64,2% da energia consumida na região, no último dia 30 de julho, foram provenientes dos ventos. Para Luiz Eduardo, diretor geral da ONS (Operador Nacional do Sistema) é exatamente em decorrência da forte estiagem na Bacia do São Francisco que hoje a energia eólica tem “importância capital” para a Região Nordeste [8]. Em suma, na turbina eólica, o vento movimenta as pás e faz girar o rotor, que transmite a rotação ao gerador, que, por sua vez, converte essa energia mecânica em energia elétrica.

Em comparativo com a energia hídrica, outra energia bastante utilizada no Brasil é a energia térmica. O princípio de funcionamento é a transformação da energia térmica em energia mecânica, utilizando a expansão do vapor d'água. O vapor move a turbina conectada ao gerador que transforma a energia mecânica em energia elétrica.

O maior problema dessa diversificação, ou seja, integração de fontes de geração diferentes no sistema elétrico brasileiro é que o sistema não está preparado para controlar essas gerações. No caso dos sistemas de geração renováveis, por exemplo, sobretudo dos sistemas eólicos, a sua fonte primária, o vento, depende de fatores atmosféricos pelos quais o homem não tem qualquer controle.

Além disso, é importante ressaltar como já falado no tópico anterior na seção 1.2 a tendência dos sistemas de geração eólica e térmica em substituir as usinas de geração hídrica pode levar ao enfraquecimento da inércia elétrica do sistema (massa girante). Tornando-o mais propício a possíveis distúrbios. A partir dessa problemática, pesquisadores de todo mundo buscam soluções para controle e estabilidade do sistema elétrico com a integração de fontes de geração diversas.

2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Seguindo a linha de pesquisa da estabilidade em sistemas de geração híbrida, [9] idealizou um projeto para integrar geradores hidrelétricos e direcionar maiores desvios de frequência em sistemas de potência com alta penetração de energia eólica. Nesse trabalho foi realizada a modelagem da geração hídrica, térmica e eólica. Em seguida, combinando as equações desses geradores foi modelado o espaço de estados de todo o sistema de potência e derivado para o projeto de controle de geradores hidrelétricos.

Um controlador robusto foi sintetizado reduzindo a ordem do modelo do sistema usando o método de desigualdade matricial linear. Estudos de simulação no sistema de teste IEEE 39-bus demonstraram que o robusto controlador proposto possui condições satisfatórias de desempenho de controle e todo o sistema alcançou desvio de frequência. Além disso, com os geradores hidrelétricos mais responsáveis pela regulação de frequência, outros geradores são menos afetados pela influência da flutuação da energia eólica.

Outro projeto que avaliou a estabilidade dinâmica dos sistemas de potência foi a simulação, em 2017, do Apagão da Tunísia de 2014. Foi realizado a modelagem no período transitório da máquina síncrona e verificado as consequências das perturbações na rede (Variações contínuas de carga são um exemplo como curto-circuito e perda de sincronização de

um gerador de alta potência). O trabalho também aborda a importância da regulação na estabilidade transitória e a importância da proteção instalada no sistema de potência. Simulações durante o estudo destinam-se a analisar o comportamento das máquinas de produção durante a falha.

A velocidade da máquina foi observada antes, durante e após a falha. Como resultado, esse trabalho observou que no caso de a falha ser eliminada em 150 ms (milissegundos) os geradores podem recuperar a condição estável após as oscilações, a menos que os geradores não tenham excedido seus limites operacionais o que não foi o caso durante a simulação do incidente de 31 de agosto de 2014. Os resultados da simulação obtidos têm formas muito semelhantes aos valores registrados durante as falhas [10].

Em 2013, [11] integrou gerações diferentes com o controle automático de geração (CAG) de três usinas interconectadas, térmicas, eólicas e hidrelétricas com o controlador PI. Duas técnicas foram utilizadas para melhorar o desempenho do CAG: a técnica inteligente computacional *Particle Swarm Optimization* e a técnica convencional *Gradient Descent*. Além disso, foram usados a técnica de otimização de enxame de partículas (PSO) e os métodos de gradiente descendente para otimizar os parâmetros de ganho proporcional, integral, regulação de velocidade e polarização de frequência de diferentes áreas.

A maior parte do CAG usou a abordagem clássica baseada na técnica do erro integral do quadrado (ISE) para a seleção ideal dos parâmetros do controlador. Este é um método de tentativa e erro; extremamente demorado quando vários parâmetros precisam ser otimizados simultaneamente. A mudança da frequência ocorre em todas as três áreas devido à flutuação de carga em uma área de cada vez. A modelagem da função de transferência para o vento foi desenvolvida assumindo um vento constante.

A interconexão de usina eólica com térmica e usina hidrelétrica foi feita, e então o controle da frequência é realizado com o controlador PI. Os estudos de simulação usando o MATLAB[®] mostraram que esse controlador é eficaz para controlar a mudança de frequência e os demais parâmetros necessários para o controle. O MATLAB/SIMULINK[®] foi usado como uma ferramenta de simulação.

Outro projeto que teve como exemplo prático a matriz energética brasileira citando a penetração cada vez maior da energia eólica numa matriz essencialmente hídrica e térmica. O trabalho aborda o fato da velocidade do vento e o influxo da água em reservatórios não poder ser facilmente prevista de forma que uma representação estocástica do vento foi realizada para solucionar problemas de planejamento de médio / longo prazo associados à operação de sistemas hidrotérmicos.

A técnica de programação dinâmica dual estocástica (SDDP) foi usada nesse estudo. O vento sintético e os cenários hidrológicos são gerados usando um modelo autorregressivo periódico (PAR (p)). As não-linearidades da função de produção hidráulica também foram levadas em conta. A técnica desenvolvida pode ser aplicada devido à expansão global da geração de energia nas últimas duas décadas, com a crescente integração de fontes alternativas [12].

Por ultimo, [13] apresentou um algoritmo aprimorado para o escalonamento de geração de sistemas de energia hidrotérmica. Aplicando a pesquisa tabu, um método de decomposição e levando em conta a não-linearidade de custos iniciais variáveis no tempo, um algoritmo efetivo é proposto para aumentar a precisão computacional do processo de escalonamento dinâmico.

A abordagem proposta pode começar a partir de qualquer método de programação tradicional proposto anteriormente e melhorar a solução sub-ótima por um método de busca de vizinhança. A este respeito, podem ser adicionadas restrições adicionais à formulação do problema, o que proporciona uma solução rápida de escalonamento ou reescalonamento para sistemas de energia hidro-térmicos em larga escala. Os resultados mostram que o algoritmo proposto é eficiente e confiável.

Os trabalhos apresentados mostraram a importância da busca de mais conhecimento acerca da diversificação de uma matriz energética. O controle da frequência do sistema elétrico na interconexão de diferentes tipos de geração foi o que mais foi visto na literatura levantada. Porém, analisando o impacto de cada geração, seria possível melhorar esse controle e buscar soluções para os problemas gerados. Esse trabalho mostrará o que ocorre na frequência/velocidade da rede elétrica após uma perturbação dependendo de que tipo de geração está predominando na rede: Térmica ou Hídrica.

3 OS SISTEMAS DE GERAÇÃO CONVENCIONAIS (HÍDRICA E TÉRMICA) E NÃO CONVENCIONAIS

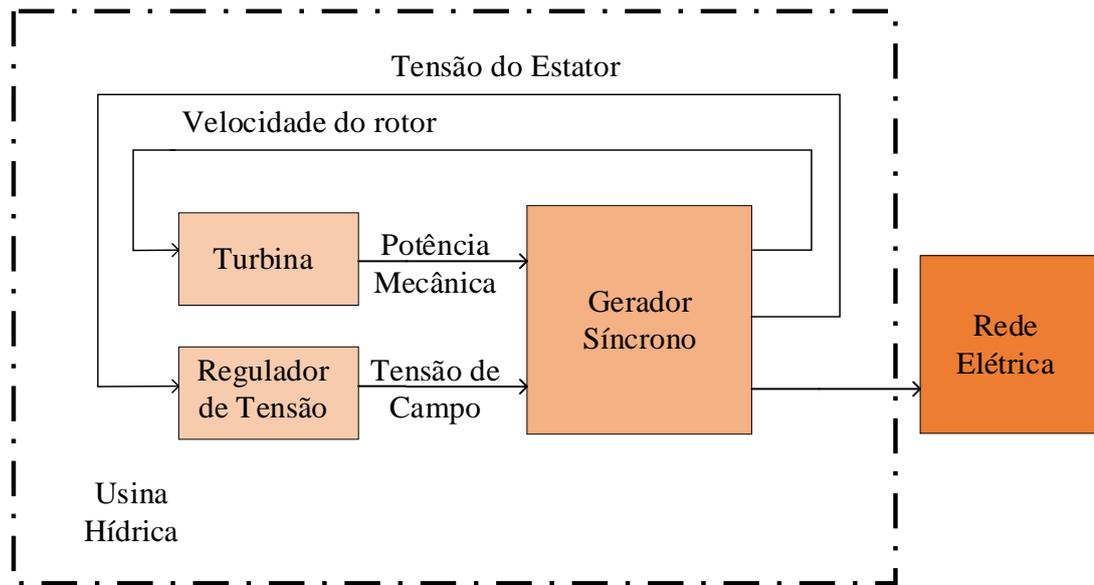
Nesse capítulo são apresentadas as representações matemáticas para as partes do sistema elétrico utilizados na rede elétrica desse trabalho. A princípio será mostrada a geração hídrica, suas principais características, a máquina síncrona com seus reguladores de velocidade e de tensão e a turbina hídrica. Em seguida, a geração térmica e a representação da sua turbina. Foi realizada também a representação do aerogerador e dos principais componentes desse sistema: a máquina de indução e a turbina eólica. Por último foi apresentada a representação multimáquinas utilizada para simular várias máquinas utilizando apenas uma máquina. Vale ressaltar que os reguladores e a turbina foram modelados e os demais componentes são modelos definidos pelo próprio MATLAB® (as máquinas e linhas).

3.1 SISTEMA DE GERAÇÃO HÍDRICA

A geração hídrica produz energia elétrica utilizando como fonte a água. A água é utilizada através do leito natural de um rio que é represado para formar um grande espelho de água. Essa água represada gera energia hidráulica quando passa pelas comportas e é convertida em mecânica ao passar pela turbina. Por sua vez, a turbina está conectada ao gerador que armazena a eletricidade e a direciona para a rede elétrica.

A usina hídrica modelada nesse trabalho consiste de um gerador síncrono e uma turbina com regulador de velocidade e o regulador de tensão. O regulador de velocidade faz o controle de velocidade a partir do controle de torque, de forma que, os limites de frequência da máquina sejam obedecidos. Já o regulador de tensão tem como objetivo controlar a tensão de campo do gerador síncrono, corrigindo as variações de demanda ou defeitos na rede elétrica. Na Figura 2 é ilustrada resumidamente a usina hídrica.

Figura 2 – Modelo da Usina Hídrica.



Fonte: Autora

3.1.1 MÁQUINA SÍNCRONA

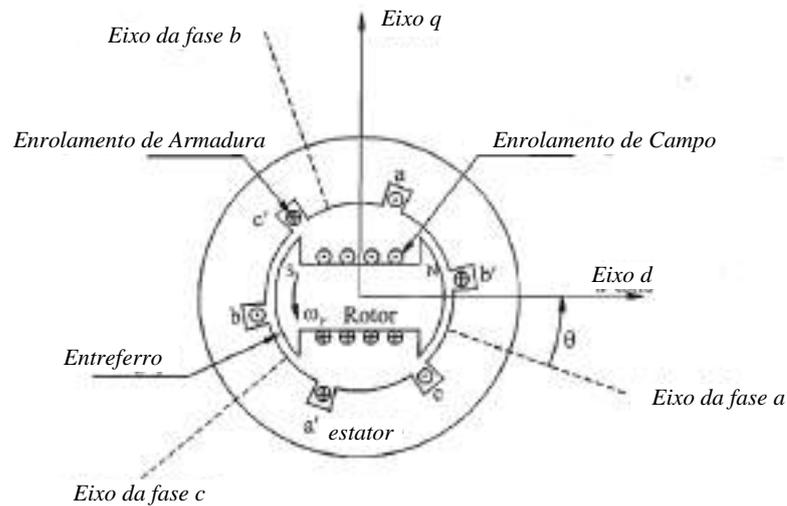
Os geradores síncronos são a principal fonte de energia elétrica nos sistemas de potência. O princípio de funcionamento de um gerador é muito semelhante ao de uma máquina de corrente contínua sempre que houver um movimento relativo entre um condutor e um campo magnético constante no entreferro haverá uma tensão induzida no condutor. No caso da máquina síncrona os condutores são fixos na armadura e o campo magnético é forçado pela máquina primária a se mover. Por sua vez, a máquina primária é acoplada mecanicamente ao rotor onde estão alojados os pólos e exerce sobre eles uma força fazendo-os girar (Lei de Faraday). O movimento relativo entre o campo e o condutor faz com que surja uma tensão nos terminais do gerador. Ao ser ligado a uma carga a tensão induzida faz com que circule corrente pelo gerador e pela carga [14]. Na Figura 3 é ilustrado o diagrama esquemático de uma máquina síncrona trifásica com um par de polos.

Bancos de capacitores são usados como meio de compensar potência reativa e controlar a tensão. A máquina síncrona opera como gerador ou motor. O modo de operação é ditado pelo sinal da potência mecânica (positivo para o modo gerador, negativo para o modo motor). Quando a máquina transforma energia elétrica em energia mecânica ela está funcionando como motor, quando converte energia mecânica em energia elétrica funciona como gerador.

A máquina síncrona possui duas partes importantes: o rotor onde estão os enrolamentos de campo e o estator com os enrolamentos de armadura. O rotor é a parte móvel e o estator a fixa. O

rotor pode ser de dois tipos: de polo saliente e de polo liso ou cilíndrico. O rotor de polo saliente é indicado para baixa velocidade, como na turbina usada na usina de geração hídrica desse trabalho. O número de polos é igual ou superior a 4 e eles são projetados para fora da superfície do rotor. O rotor cilíndrico com 2 ou 4 polos são indicados para altas velocidades e os polos magnéticos são construídos no mesmo nível da superfície do rotor.

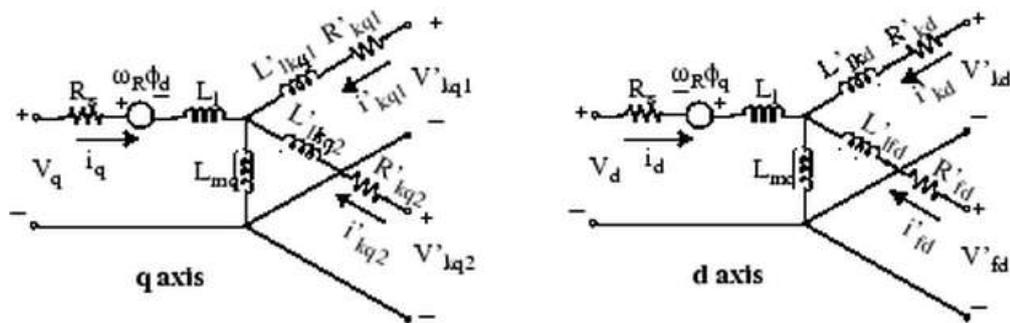
Figura 3- Máquina Síncrona Trifásica.



Fonte: [15]

O estator possui chapas laminadas com alta permeabilidade que cria um caminho magnético de baixa relutância para o fluxo. Seus enrolamentos devem ser alimentados por um sistema equilibrado de tensões alternadas, ou seja distribuídas em 120° . Todos os parâmetros do rotor e grandezas elétricas são vistos a partir do estator. Eles são identificados por variáveis preparadas. Na Figura 4 é mostrado o modelo de máquina síncrona definido no MATLAB, em seguida, as equações que definem o modelo foram descritas.

Figura 4 – Modelo da Máquina Síncrona do MATLAB®.



Fonte: MATLAB®

$$\left\{ \begin{array}{l} V_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} \varphi_d - \omega_R \varphi_q \quad \varphi_d = L_d i_d + L_{md} (i'_{fd} + i'_{kd}) \\ V_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} \varphi_q - \omega_R \varphi_d \quad \varphi_q = L_q i_q + L_{mq} i'_{kd} \\ V'_{fd} = R'_{fd} i'_{fd} + \frac{d}{dt} \varphi'_{fd} \quad \varphi'_{fd} = L'_{fd} i'_{fd} + L_{md} (i'_d + i'_{kd}) \\ V'_{kd} = R'_{kd} i'_{kd} + \frac{d}{dt} \varphi'_{kd} \quad \varphi'_{kd} = L'_{kd} i'_{kd} + L_{md} (i'_d + i'_{fd}) \\ V'_{kd1} = R'_{kq1} i'_{kq1} + \frac{d}{dt} \varphi'_{kq1} \quad \varphi'_{kq1} = L'_{kq1} i'_{kq1} + L_{mq} i_q \\ V'_{kd2} = R'_{kq2} i'_{kq2} + \frac{d}{dt} \varphi'_{kq2} \quad \varphi'_{kq2} = L'_{kq2} i'_{kq2} + L_{mq} i_q \end{array} \right. \quad (1)$$

Em que se definem os subscritos das equações e da Figura 4 como:

d, q: quantidade do eixo d e q

R, s: Parâmetro do rotor(r) e estator(s)

l, m: indutância de dispersão (l) e indutância magnetizante(m)

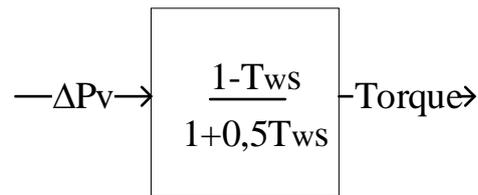
f, k: Quantidade de enrolamento de campo(f) e amortecedor(k)

Como exemplo para melhor compreensão da legenda pode ser citado R_s como a resistência do estator, R_f como a resistência do rotor, L_{md} a indutância de magnetização do eixo direto vista do estator, L_{mq} a indutância de magnetização do eixo de quadratura vista do estator e φ'_{fd} o fluxo concatenado nos enrolamentos de campo do eixo direto. Além dessas variáveis, vale ressaltar o parâmetro da inércia da máquina que é a quantificação da sua massa girante [15].

3.1.2 TURBINA HÍDRICA COM REGULADOR DE VELOCIDADE

As turbinas são como ventiladores, porém com asas na vertical, essas asas, em contato com a água sob muita pressão, giram em torno do seu próprio eixo [14]. A Figura 5 apresenta o bloco da turbina hídrica utilizado.

Figura 5 – Modelo Turbina Hídrica.

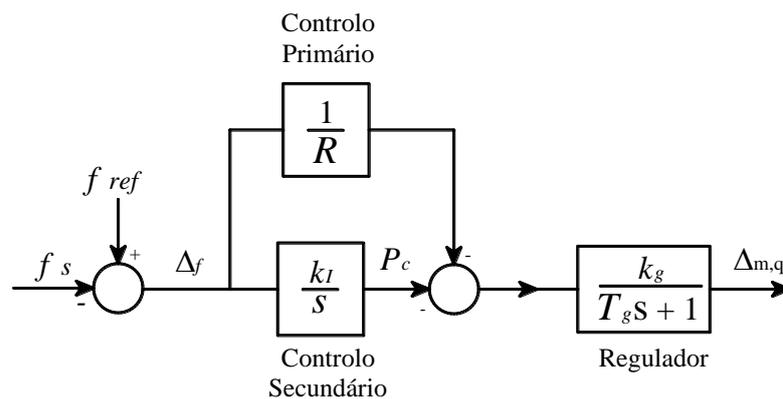


Fonte: Autora

O sinal ΔP_v corresponde à variação da abertura ou fechamento das comportas, aumento ou diminuindo a potência mecânica produzida pela turbina hidráulica. Já o T_w é a constante de tempo de resposta da turbina hídrica.

O sistema regulador de velocidade é o responsável pelo controle de potência gerada pelo rotor da turbina. Ele controla a velocidade de rotação do mesmo, mantendo a frequência do sistema dentro de uma faixa de valores aceitáveis. Para realizar este controle, o regulador de velocidade controla atuadores hidráulicos que atuam sobre o anel do distribuidor controlando a vazão em turbinas [16]. O controle do regulador de velocidade em máquinas síncronas é realizado com o controle primário e o controle secundário. A Figura 6 mostra seu modelo.

Figura 6 - Modelo Regulador de Velocidade.



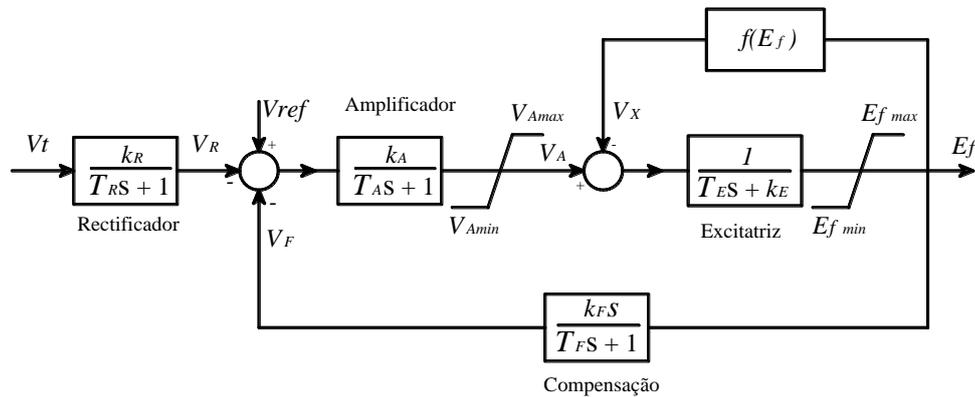
Fonte: [7]

3.1.3 REGULADOR DE TENSÃO (AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR – AVR)

O objetivo do AVR – regulador automático de tensão – é fornecer a máquina síncrona uma adequada tensão de campo, de modo a sustentar a tensão terminal e a potência reativa em determinados valores desejados. É importante ressaltar que uma das características do sistema AVR é que ele responde rapidamente a desvios de tensão durante a operação normal e de emergência do sistema. Dentre os tipos de modelos de AVR utilizados para regular a tensão de

campo, utilizou-se o modelo do AVR IEEE tipo I [17], conforme se descreve na Figura 7 a seguir:

Figura 7 – Modelo Regulador de Tensão.



Fonte: [7]

3.2 SISTEMA DE GERAÇÃO TÉRMICA

A usina termoelétrica produz energia a partir do calor gerado pela queima de combustíveis fósseis (carvão mineral, óleo, gás, entre outros) ou outras fontes de calor como as nucleares. Seu funcionamento obedece ao ciclo de Rankine que se inicia com o aquecimento da água que está na caldeira. Essa água é transformada em vapor, cuja força irá movimentar as pás de uma turbina que está conectada ao gerador.

A água é aquecida através queima de combustíveis fósseis ou utilizando energia nuclear. Após passar pelas turbinas o vapor passa pelo condensador onde é resfriado e transformado em líquido. A água líquida então é reenviada para a caldeira e um novo ciclo reinicia. A grande desvantagem da usina térmica é a contribuição para o aquecimento global através do efeito estufa. No caso de usinas nucleares tem também o lixo atômico.

Em contrapartida, a vantagem é que podem ser construídas próximas a centros urbanos, diminuindo as linhas de transmissões, desperdiçando menor energia. Além disso, produzem uma quantidade constante de energia durante todo o ano diferente das hidrelétricas que dependem do nível dos rios e utilizam bem menos água do que a hidrelétrica necessita. É por essas vantagens que a geração térmica complementa a matriz energética brasileira sendo ligada quando há necessidade, como em períodos de estiagem [18].

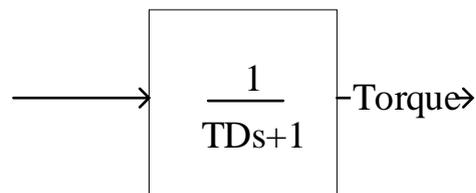
A modelização da usina Térmica a vapor de um único estágio segue o mesmo princípio da representação da usina Hídrica com gerador síncrono e uma turbina com regulador de velocidade

e de tensão. Na Figura 2 é ilustrada resumidamente a usina hídrica e também pode representar a usina Térmica. O que diferencia os dois modelos é a turbina que será mostrada a seguir.

3.2.1 TURBINA TÉRMICA A VAPOR

A turbina a vapor é amplamente utilizada em termelétricas. Ela utiliza o vapor a alta pressão e alta temperatura, tendo alta eficiência e velocidade de rotação. Além disso, é uma turbina com pouca vibração. Esse tipo de turbina obedece ao ciclo de Rankine. O vapor entra os bocais, que são as passagens formadas pelas pás estacionárias. Elas redirecionam o vapor para as pás móveis e essa mudança de direção entre as pás estacionárias gera a força sobre as pás móveis e essa força rotacional a turbina produzindo potência no eixo. O modelo de turbina utilizado pode ser visto na Figura 8, em que o TD é a constante de tempo de resposta da turbina térmica a vapor.

Figura 8 – Modelo Turbina Térmica.



Fonte: Autora.

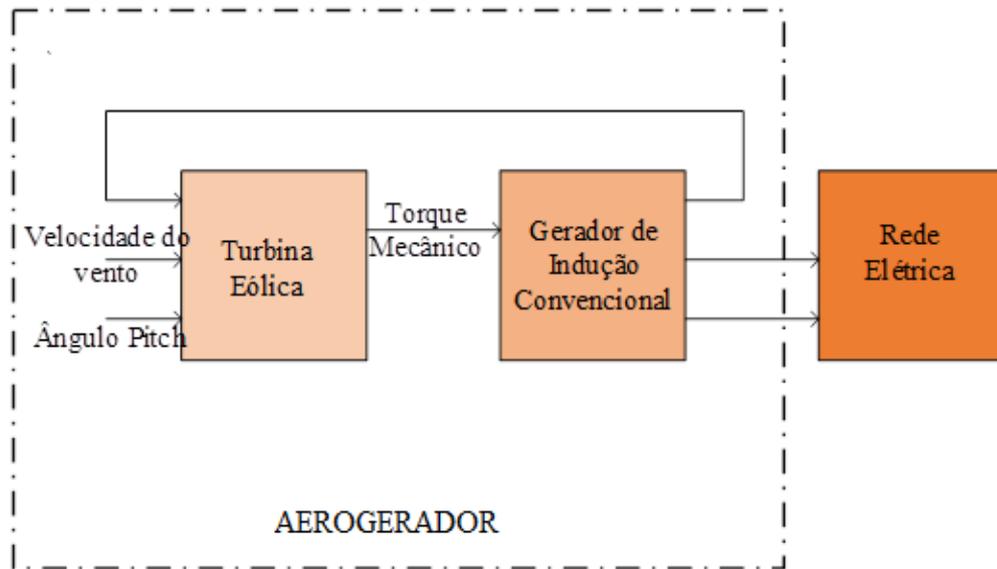
Vale ressaltar que os reguladores de velocidade e de tensão apresentados anteriormente correspondem aos mesmos modelos de reguladores adotados para as turbinas a vapor.

3.3 SISTEMA DE GERAÇÃO NÃO CONVENCIONAL – EÓLICA

O termo “energia eólica” é usado para descrever a energia que provem dos ventos. As turbinas eólicas convertem a energia cinética dos ventos em energia mecânica. Elas extraem energia do vento usando as lâminas aerodinâmicas que produzem a força de sustentação ao longo da lâmina ou pá. Essa força produz o torque no eixo da turbina. Os ventos giram as três pás que giram um eixo conectado ao rotor.

Essa rotação é aproveitada pelo gerador que se encontra acoplado no mesmo eixo do rotor e converte a energia mecânica da turbina em energia elétrica. Em regra, dentro da turbina eólica há um multiplicador de velocidade ou caixa de velocidade que faz o rotor girar bem mais rápido (20 a 1500 rpm), permitindo, assim, a produção de energia elétrica. Na Figura 9 é resumida a estrutura de um aerogerador.

Figura 9 - Modelo do Aerogerador.



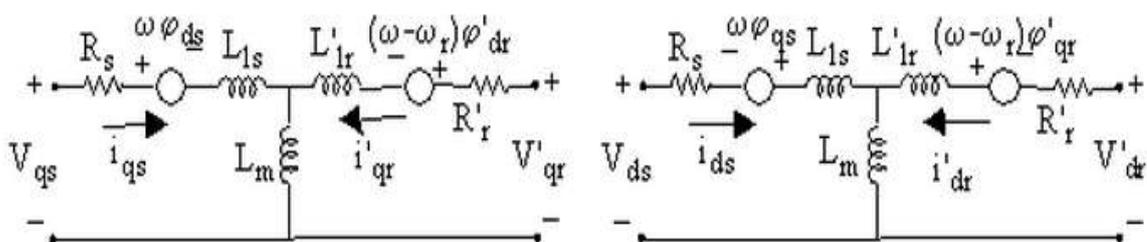
Fonte: Autora

Nesse trabalho será adotado um aerogerador constituído por um gerador eólico de indução convencional do tipo gaiola de esquilo. O modelamento da turbina depende da velocidade do vento, da velocidade angular do gerador e do ângulo de inclinação das pás ($\hat{\text{Ângulo Pitch}}$). As representações dos principais componentes da turbina serão descritos a seguir.

3.3.1 MÁQUINA DE INDUÇÃO

A máquina assíncrona trifásica ou máquina de indução definido pelo MATLAB[®] opera no modo gerador ou motor dependendo do sinal do torque mecânico. Para o torque positivo a máquina será um motor, no contrário será um gerador.

No modo de operação como gerador, assume-se que as correntes estão saindo dos enrolamentos do estator (negativas), enquanto que as correntes do rotor estão entrando em seus enrolamentos (positivas). O modelo da máquina de indução do tipo gaiola de esquilo esta apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Modelo da Máquina Assíncrona do MATLAB[®].

O conjunto de equações resultantes para o estator e para o rotor da máquina de indução do tipo gaiola de esquilo são as seguintes:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + w \varphi_{ds} \quad \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr} \\ V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - w \varphi_{qs} \quad \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr} \\ V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{qr} + (w - w_r) \varphi'_{dr} \quad \varphi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs} \\ V'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{dr} - (w - w_r) \varphi'_{qr} \quad \varphi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds} \\ T_e = 1.5p(\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \\ L_s = L_{ls} + L_m \quad L'_r = L'_{lr} + L_m \end{array} \right. \quad (2)$$

Em que:

L_s = indutância de dispersão do estator (H)

L_r = indutância de dispersão do rotor (H)

L_m = indutância mútua de magnetização entre os enrolamentos do estator e do rotor (H)

R_s = resistência do estator (Ω)

R_r = resistência do rotor (Ω)

ω_r = frequência angular eléctrica do rotor¹ em rad-elec/s

ω_s = frequência angular eléctrica do estator em rad-elec/s

v = tensão (V)

i = corrente (A)

φ = fluxo de dispersão (Wb.voltas)

Nas equações acima os índices “ d ” e “ q ” denotam o eixo direto e o eixo de quadratura, respectivamente, representando as componentes segundo os eixos de referência d - q a girar à velocidade síncrona, estando o eixo “ q ” adiantado 90° em relação ao eixo “ d ”. Os índices “ s ” e “ r ” denotam grandezas do estator e do rotor, respectivamente [15].

3.3.2 TURBINA EÓLICA

A potência mecânica de uma turbina varia com o cubo da velocidade do vento (v_W^3), a densidade do ar (ρ), a área varrida pela turbina (A) e o coeficiente de desempenho da turbina (C_p). É dada por:

$$P = \frac{1}{2} \rho A C_p v_W^3 \quad W \quad (3)$$

Como o fluxo do ar não é contínuo, a energia máxima teórica que pode ser extraída é de 59,9% e é denominada de limite de Betz [19]. Por sua vez, o coeficiente de desempenho de potência $C_p(\lambda, \beta)$ representa a fração dessa energia cinética proveniente do vento que incide no rotor e que é convertida em energia mecânica girante. Este coeficiente está relacionado com a relação de velocidade de extremidade da pá (tip speed ratio) λ , e o ângulo de inclinação das pás (pitch), β . Essa grandeza juntamente com a velocidade de extremidade da pá define a curva característica aerodinâmica de uma turbina eólica. Será adotada a curva características de potência $C_p(\lambda, \beta) \times \lambda$ fornecida em [20] de uma turbina eólica real. De forma que, $C_p(\lambda, \beta)$ é dado por:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0,22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0,4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12,5}{\lambda_i}} \quad (4)$$

A equação que descreve λ_i é tal que:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (5)$$

Por último, a velocidade de extremidade da pá será dada por:

$$\lambda = \frac{Rw_m}{v_W^3} \quad (6)$$

Em que, R é o raio das pás e w_m a velocidade mecânica do rotor. O torque do motor é tal que:

$$T = \frac{P}{w_m} \quad (7)$$

3.4 REPRESENTAÇÃO MULTIMÁQUINA

O modelo multimáquina proposto por [21] e [22] representa o modelo matemático de um sistema elétrico completo. Esses modelos foram determinados por um conjunto de equações algébricas e diferenciais conectadas adequadamente de modo a simular o comportamento dinâmico e transitório de um determinado sistema elétrico, tendo em conta todos os componentes que o constitui.

No caso de uma hidrelétrica, termoelétrica ou parque eólico composto por muitas unidades, o número de equações diferenciais torna-se muito alto. Então, para reduzir o número total de equações, pode-se assumir que vários geradores eólicos operam sob as mesmas condições de vento, vários hídricos com as mesmas condições de nível da água, como também vários térmicos. A usina, então, pode ser particionada em grupos de n máquinas que operam de forma

idêntica e cada grupo pode ser substituído por uma máquina equivalente. Os parâmetros da máquina equivalente substituindo n máquinas operando de forma idêntica são as dadas pelas seguintes relações:

$$H_{An} = nH_A \quad (8)$$

$$T'_{on} = T'_o \quad (9)$$

$$r_{sn} = \frac{r_s}{n} \quad (10)$$

$$X_n = \frac{X}{n} \quad (11)$$

$$X'_n = \frac{X'}{n} \quad (12)$$

Em que:

H_A = Inércia de uma máquina (massa girante)

T'_o = Tempo do período transitório

r_s = Resistência do estator em ohm

X = Reatância do estator em ohm

X' = Reatância transitória do estator em ohm

N = Número de máquinas da usina

Nesse trabalho apenas a equação (8) foi utilizada, pois as resistências e reatâncias utilizadas foram representadas em pu (Sistema por unidade), não havendo, então, necessidade de dividir pelo número total de máquinas.

4 REPRESENTAÇÃO DOS MODELOS DINÂMICOS

Nesse capítulo será mostrado as representações dos modelos matemáticos discutidos no capítulo anterior no ambiente de simulação MATLAB/SIMULINK[®]. O SIMULINK é uma ferramenta do MATLAB que tem como objetivo simular e analisar sistemas dinâmicos a partir de diagramas de blocos.

Com o SIMULINK[®] é possível criar um modelo de qualquer sistema, dispositivo ou aparelho e analisar seu comportamento e funcionamento antes que venham a ser realmente construídos fisicamente. A seguir será mostrado a implementação da rede elétrica e das três usinas de geração: térmica, hídrica e eólica.

4.1 A REDE ELÉTRICA EM SIMULINK/MATLAB[®]

O desenho da rede elétrica que foi estudada está representado na Figura 9. Ela é formada por onze barras, três usinas de geração e as cargas. A tensão base no lado de alta tensão é 230 kV. A usina térmica é formada por vinte (20) máquinas síncronas com tensão de 13,8 kV e potência de 25 MVA cada. A hídrica é formada por 12 máquinas síncronas em paralelo com potência de 50 MVA cada e 13.8 kV, já a eólica é formado por 50 aerogeradores com 1 MVA e 460 V cada um.

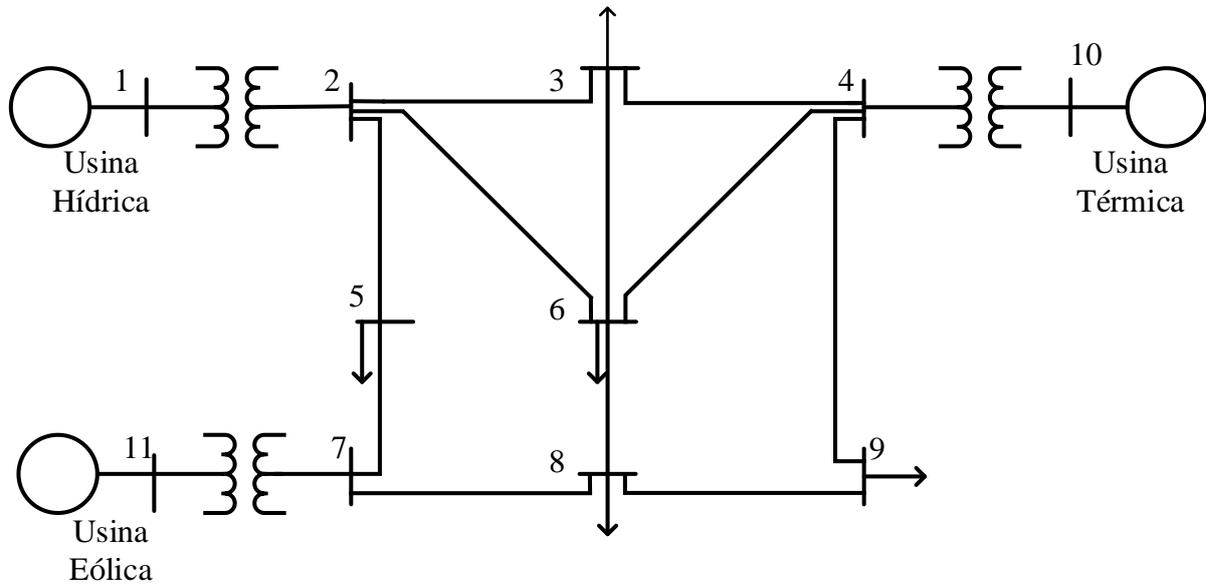
O total de geração é de 1150 MVA e o total de cargas 918,3681 MVA. As cargas em cada barramento estão mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Cargas nas barras da rede elétrica em estudo.

| CARGAS | | | | | |
|--------|-----|------|-------|-----|------|
| Barra | MW | MVar | Barra | MW | MVar |
| 1 | 0 | 0 | 7 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 8 | 110 | 90 |
| 3 | 300 | 240 | 9 | 80 | 50 |
| 4 | 0 | 0 | 10 | 0 | 0 |
| 5 | 120 | 60 | 11 | 0 | 0 |
| 6 | 140 | 90 | | | |

Na Figura 11 é apresentado o esquema simplificado unifilar da rede elétrica trifásica utilizada nesse trabalho [23].

Figura 11 – Rede Elétrica Simulada.

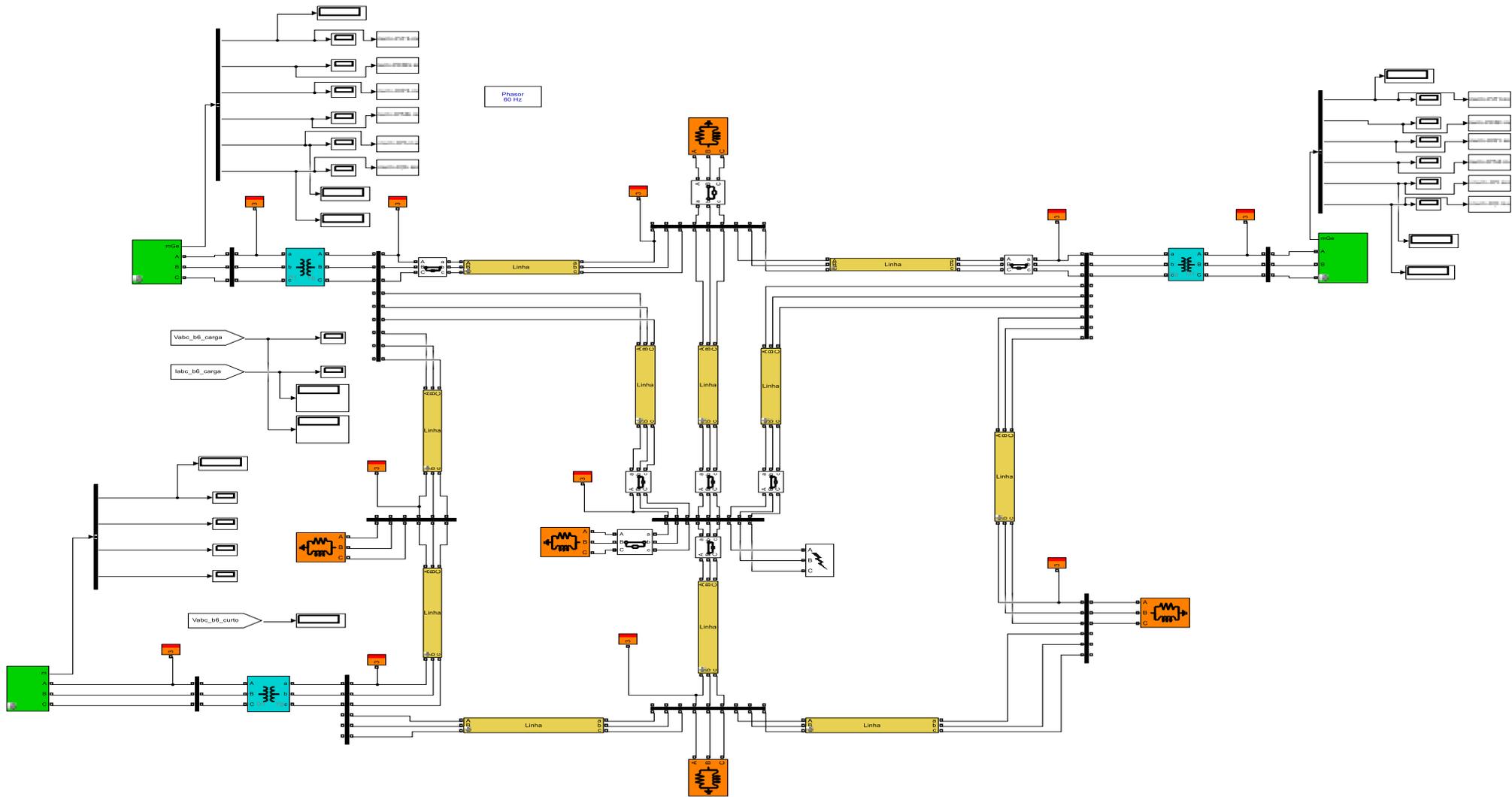


Fonte: Autora.

4.1.1 BLOCO EM SIMULINK DA REDE ELÉTRICA

A partir da rede elétrica estudada por [23], foi possível implementar no MATLAB/Simulink® todos os blocos necessários para esse estudo. Na Figura 12 é apresentada essa rede, os blocos verdes são as três usinas térmica, hídrica e eólica, os azuis são os transformadores, em laranja as cargas e em amarelo as linhas de transmissão. As barras pretas são as 11 barras mostradas na rede original.

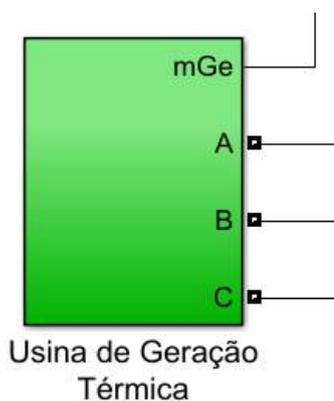
Figura 12 – Rede Elétrica de 11 barras simulada no MATLAB ®.



4.2 USINA TÉRMICA

A usina térmica foi representada como mostrado na Figura 13. A máscara apresenta a usina térmica implementada no MATLAB®. Dentro dela tem todos os parâmetros e equações algébricas necessárias para a simulação da usina. A saída dessa máscara são os parâmetros a serem analisados (mGe) e as fases A, B, C da rede elétrica.

Figura 13 – Máscara Usina Térmica.



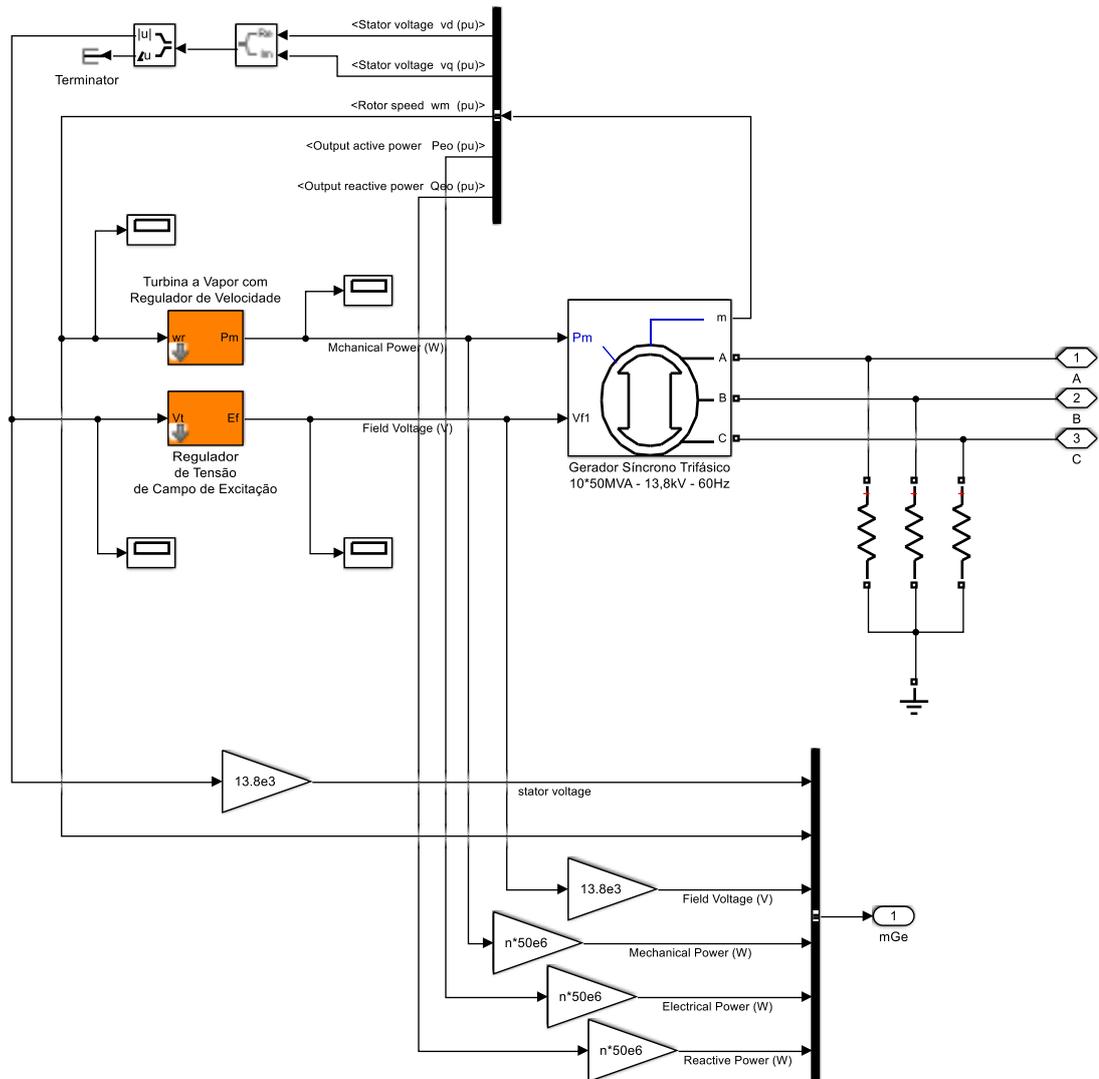
Dentro da máscara temos o modelamento da usina, com um gerador síncrono, a turbina com regulador de velocidade e o regulador de tensão, mostrados na Figura 14. Os parâmetros do gerador síncrono da Usina Térmica estão mostrados na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 - Dados do gerador síncrono da Usina Térmica.

| Parâmetros | Valor |
|---------------------------------------|---------------------------|
| Tensão Nominal | 13,8 KVA |
| Potência Aparente Nominal | 25 MVA |
| Frequência nominal | 60 Hz |
| Reatância subtransitórias d-q | $X''d = 0,12 \text{ pu}$ |
| | $X''q = 0,12 \text{ pu}$ |
| Reatância transitória d-q | $X'd = 0,232 \text{ pu}$ |
| Reatância d-q | $Xd = 1,25 \text{ pu}$ |
| | $Xq = 1,22 \text{ pu}$ |
| Resistência do estator | $R = 0,0082 \text{ pu}$ |
| Constante de tempo subtransitória d-q | $T''d0 = 0,035 \text{ s}$ |
| | $T''q0 = 0,035 \text{ s}$ |
| Constante de tempo transitória | $T'd0 = 0,882 \text{ s}$ |
| Constante de inércia | $Hs = 3,6$ |
| Coeficiente de amortecimento | $Ds = 0$ |

[Fonte: 7]

Figura 14 - Bloco da Usina Térmica contendo o regulador de velocidade e de tensão.



4.3 A USINA HÍDRICA

Na Figura 15 é apresentada a máscara da usina Hídrica implementada no MATLAB. Como dito, a representação da usina hídrica é igual a da térmica alterando apenas o modelo da turbina. Ou seja, a Figura 14 também representa o interior da máscara da usina hídrica. A saída dessa máscara são os parâmetros a serem analisados (mGe) e as fases A, B, C da rede elétrica.

Figura 15 - Mascara da Usina Hídrica.



Os dados do gerador síncrono da Usina Hídrica estão mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados do gerador síncrono da Usina Hídrica.

| Parâmetros | Valor |
|---------------------------------------|----------------------------|
| Tensão Nominal | 13,8 KVA |
| Potência Aparente Nominal | 50 MVA |
| Frequência nominal | 60 Hz |
| Reatância subtransitórias d-q | $X''d = 0,23 \text{ pu}$ |
| | $X''q = 0,2847 \text{ pu}$ |
| Reatância transitória d-q | $X'd = 0,2295 \text{ pu}$ |
| Reatância d-q | $Xd = 0,8979 \text{ pu}$ |
| | $Xq = 0,646 \text{ pu}$ |
| Resistência do estator | $R = 0,00001 \text{ pu}$ |
| Constante de tempo subtransitória d-q | $T''d0 = 0,0681 \text{ s}$ |
| | $T''q0 = 0,1 \text{ s}$ |
| Constante de tempo transitória | $T'd0 = 7,4 \text{ s}$ |
| Constante de inércia | $Hs = 5,15$ |
| Coeficiente de amortecimento | $Ds = 0$ |

[Fonte: 7]

4.4 USINA EÓLICA

A máscara da usina eólica foi mostrada na Figura 16. Dentro dela, na Figura 17, pode ser observado o gerador de indução e a turbina eólica utilizados na simulação.

Figura 16 – Máscara da Usina de Geração eólica.



A turbina eólica modelada tem como entrada a velocidade angular mecânica, a velocidade do vento e o ângulo de pitch. Na Figura 18 pode ser melhor observado o bloco da turbina.

Figura 17 - Representação da Usina Eólica com a turbina e o gerador de indução.

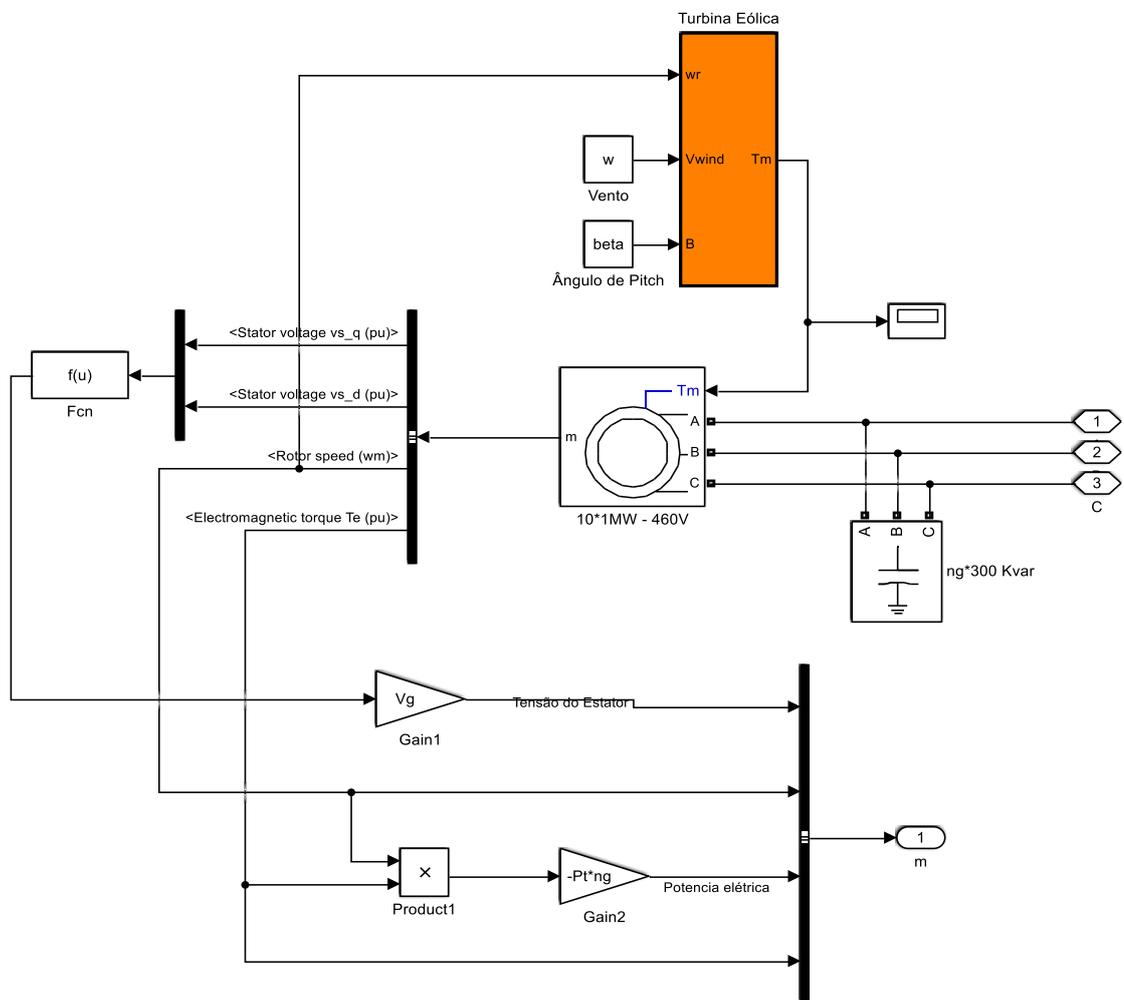
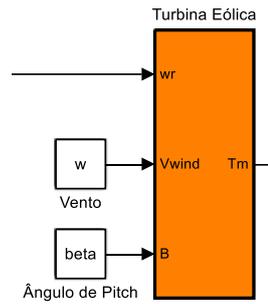
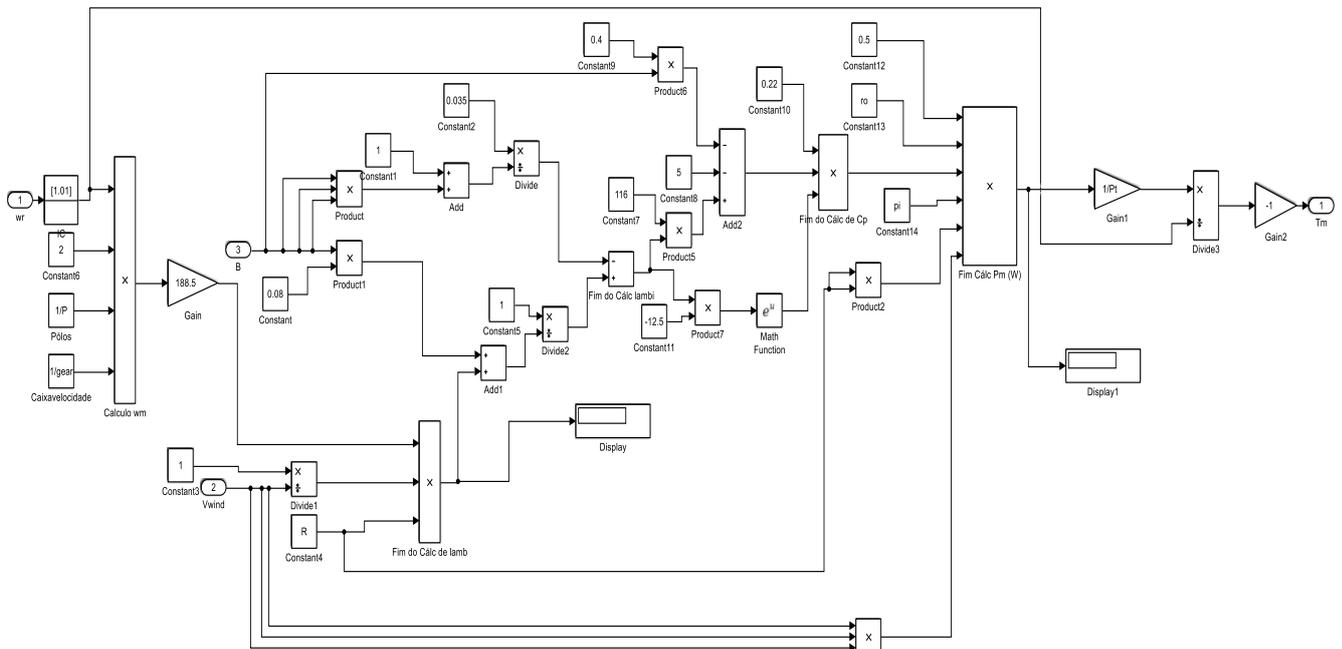


Figura 18 - Bloco da turbina eólica no simulink.



Na Figura 19 é apresentada a formulação matemática das equações necessárias para modelar a turbina eólica. Equações 3 a 7 vistas no capítulo 3.

Figura 19 – Representação matemática da turbina eólica.



Os parâmetros da turbina estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros da turbina eólica.

| Parâmetros | Valor |
|-------------------------|-------------------------|
| Número de polos | 4 |
| Caixa de velocidade | 50 |
| Raio das Pás da Turbina | 30 m |
| Velocidade do vento | 11 m/s |
| Ângulo de pitch | 0° |
| Densidade do ar | 1,225 kg/m ³ |

E os parâmetros do gerador de indução, na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros do gerador de indução.

| Parâmetros | Valor |
|--|-----------------------------|
| Tensão Nominal | 460 V |
| Potência Aparente Nominal | 1 MVA |
| Frequência nominal | 60 Hz |
| Resistência (Rs) e indutância (Ls) do estator | $R_s = 0,01965 \text{ pu}$ |
| | $L_s = 0,0397 \text{ pu}$ |
| Resistência (Rs) e indutância (Ls) transitórias do estator | $R_s' = 0,01909 \text{ pu}$ |
| | $L_s' = 0,0397 \text{ pu}$ |
| Indutância Mútua (Lm) | $L_m = 1,354$ |
| Inércia (h) | $H = 4$ |

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o conhecimento da rede elétrica e de como ela foi construída é possível analisar seu comportamento em operação. Esse capítulo aborda os cenários de simulação e as perturbações causadas no sistema estudado. Os quatro cenários de simulação mostram como a dinâmica da rede se comporta a depender de qual geração está mais forte, a térmica ou a hídrica. A partir do entendimento desses cenários, serão causados dois tipos de perturbações na rede: corte de carga e curto circuito. O corte de carga ocorrerá nas barras 3 e 6 e o curto trifásico franco ocorre na barra 3. Nos tópicos a seguir, será possível mostrar o detalhamento de todo esse processo.

5.1 CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

Para cada perturbação foram analisados todos os cenários de simulação. Cada cenário mostra a presença mais forte ou mais fraca da usina hídrica e térmica. Logo, foram simulados quatro cenários de simulação:

a) Cenário 1 – Normal (HT)

É o cenário de operação normal da rede. Operam a usina hídrica com 12 máquinas de 50 MVA (600 MVA de geração), a térmica com 20 máquinas de 25 MVA (500 MVA de geração) e a eólica com os 50 MVA correspondentes aos aerogeradores. Como visto no capítulo 4, um total de 1150 MVA de geração para uma carga de 918,36 MVA.

b) Cenário 2 – Redução hídrica (hT)

Simulação da perda de geração hídrica. Imaginando um cenário de seca em que o nível da água diminui e é necessário desligar algumas máquinas. Nesse caso, serão desligadas 2 máquinas hídricas, tirando um total de 100 MVA de potência. Não ocorre alteração na usina térmica nem na eólica. Vale ressaltar, que apesar de tirar essa quantidade de potência, não há déficit de geração, pois ainda terá 1050 MVA de geração para 918,36 MVA de carga.

c) Cenário 3 – Redução térmica (Ht)

Simulação com redução na geração térmica. A intenção é colocar a hídrica mais forte na rede elétrica com as 12 máquinas iniciais (600 MVA) e a térmica com 2 máquinas a menos ficando com 18 máquinas (450 MVA de geração). Não será feita alteração na usina eólica. Para esse caso, também não há déficit de geração, pois foram tirados apenas 50 MVA ficando com 1100 MVA para suprir os 918,36 MVA de carga.

d) Cenário 4 Redução hídrica com aumento de térmica (hT)

O último cenário de simulação é o que ocorre em um longo período de seca. Há uma perda maior de geração hídrica e um aumento de geração térmica para suprir a demanda de carga. Nesse caso, 4 máquinas hídricas deixam de gerar, tirando um total de 200 MVA de geração hídrica e aumentando a térmica em 4 máquinas. Ou seja, 8 máquinas hídricas estarão em funcionamento, injetando 400 MVA de potência e 24 máquinas térmicas injetando 600 MVA de geração. Não haverá alteração na usina eólica.

Na Tabela 6, um resumo dos cenários de simulação é apresentado.

Tabela 6 – Cenários de Simulação.

| CENÁRIOS | GERAÇÃO – Número de máquinas | | |
|--------------------------------------|------------------------------|---------|--------|
| | Hídrica | Térmica | Eólica |
| 1 Normal (HT) | 12 | 20 | 50 |
| 2 Redução de H (hT) | 10 | 20 | 50 |
| 3 Redução de T (Ht) | 12 | 18 | 50 |
| 4 Redução de H com aumento de T (hT) | 8 | 24 | 50 |

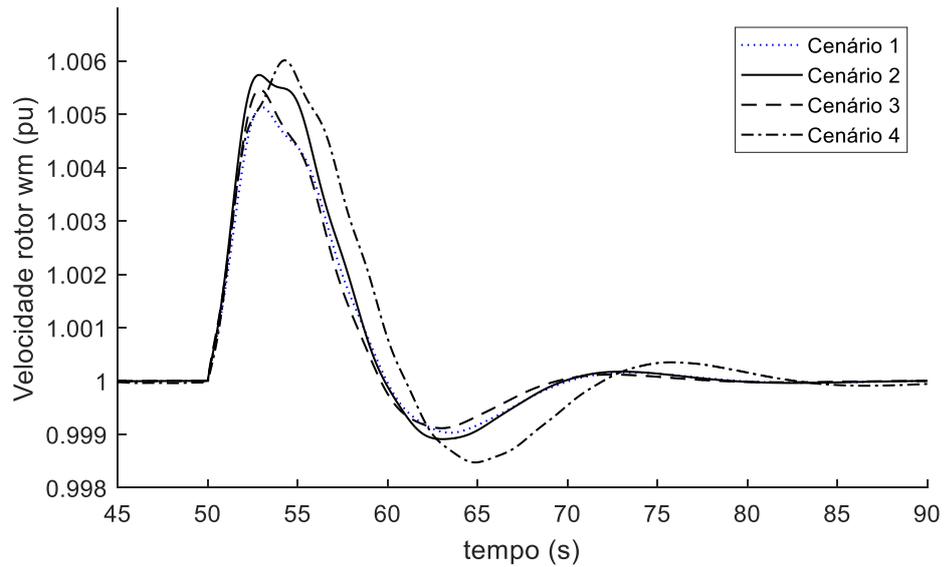
5.2 CORTE DE CARGA

A primeira perturbação simulada foi o corte de carga. O tempo total de simulação é de 100 segundos(s) e o corte de carga está ocorrendo aos 50 s de simulação. Foi colocada uma chave nas cargas das barras 3 e 6 que abre no tempo determinado retirando um total de 440 MW de carga ativa e 330 MVar de carga reativa, ou seja, retirando 550 MVA de carga. Foi verificado para cada cenário como se comportaram a usina térmica, hídrica e eólica no momento desse corte.

5.2.1 USINA TÉRMICA

O gráfico da velocidade do rotor das máquinas térmicas para os quatro cenários de simulação é mostrado na Figura 20.

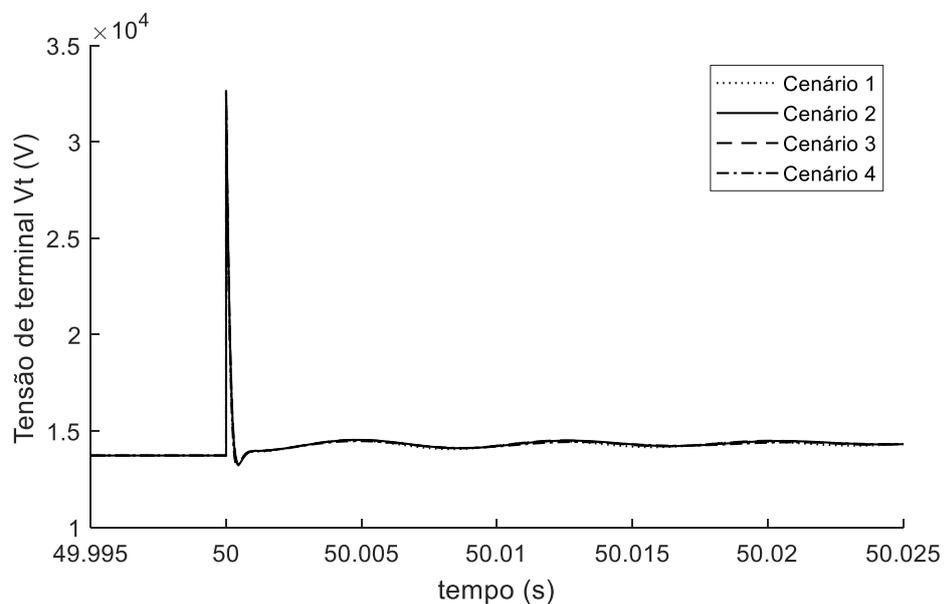
Figura 20 - Velocidade do rotor da Usina Térmica no corte de carga.



A primeira análise é observar que quando o sistema passa pela perturbação ele tende a retornar para o ponto de operação anterior à perturbação, confirmando sua estabilidade. Também pode ser verificado, entre esses quatro cenários, que o mais oscilatório é o 4 (hT). Esse é o cenário que a hídrica está mais fraca. A hídrica tem maior inércia que a térmica, logo tem maior massa girante. Quando o sistema perde geração hídrica fica mais vulnerável à perturbação e oscila mais.

A tensão de terminal da máquina térmica para os quatro cenários também foi observado. A Figura 21 apresenta o gráfico para os quatro cenários.

Figura 21 - Tensão terminal da máquina síncrona para a usina térmica no corte de carga.

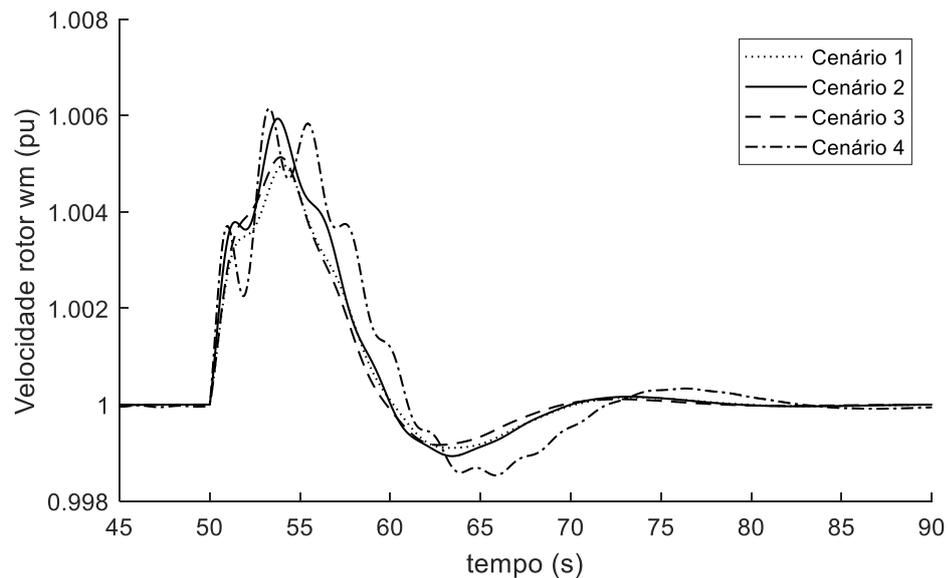


O pico é observado devido a abertura da chave para retirada das cargas. Nesse caso, a máquina também tendeu a retornar ao estado inicial de estabilidade.

5.2.2 USINA HÍDRICA

Também foi verificado o comportamento da velocidade do rotor da máquina síncrona na usina hídrica. Na Figura 22 é apresentado o gráfico dessa velocidade para os quatro cenários.

Figura 22 - Velocidade do rotor da Usina Hídrica no corte de carga.

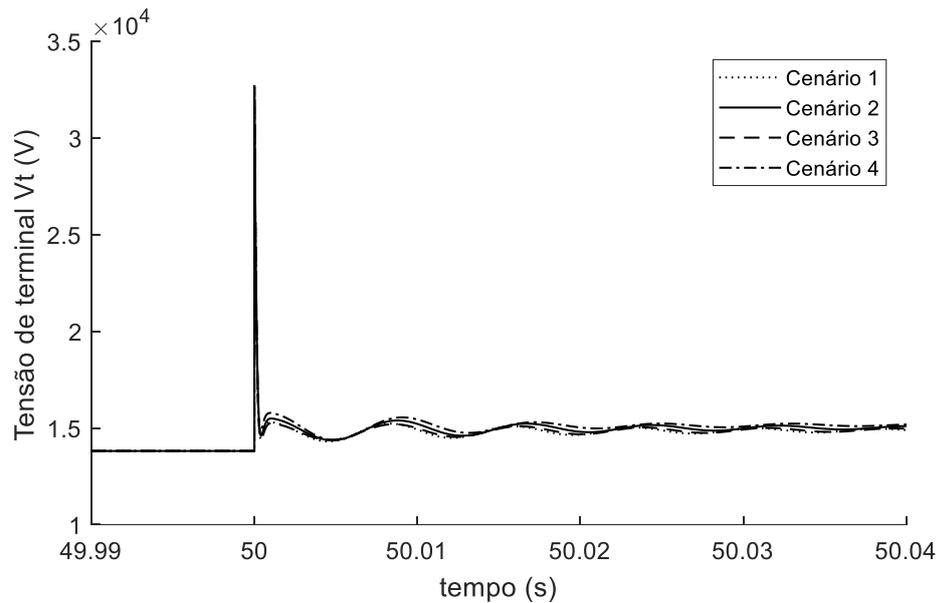


Mais uma vez pode ser verificado que o sistema volta ao seu estado de estabilidade. O cenário que mais oscilou foi o cenário 4 (hT). Como dito no tópico anterior, é o cenário com menor participação da geração hídrica, deixando o sistema mais vulnerável.

Entre a Figura 22 e a Figura 20 é possível analisar que a usina hídrica oscila mais que a usina térmica. Isso ocorre porque a usina hídrica tende a oscilar mais por ter perdido massa girante.

A tensão terminal também pode ser verificada nos quatro cenários de simulação. Na Figura 23 é apresentado esse gráfico para os quatro cenários.

Figura 23 - Tensão terminal da máquina síncrona para a usina hídrica no corte de carga.

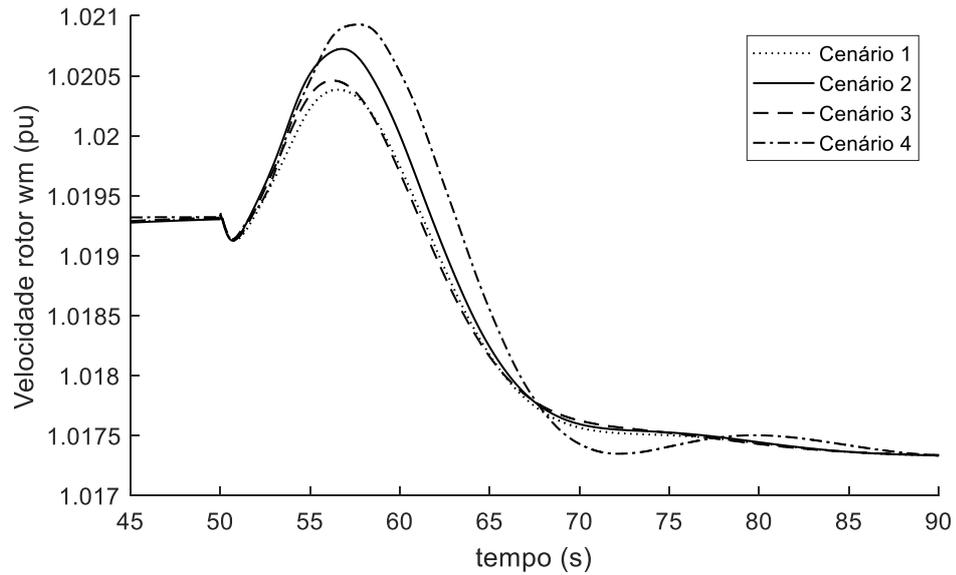


A Figura 23 apresenta o pico da tensão e uma maior oscilação que a Figura 21, além de demorar um pouco mais para atingir o estado inicial antes da perturbação. A maior oscilação entre os cenários é observada no cenário 4 (hT). Como dito, devido a perda de massa girante da usina hídrica.

5.2.3 USINA EÓLICA

Para a usina eólica foi verificado o comportamento para cada um dos cenários. Tanto a velocidade quanto o tensão terminal da máquina de indução. A usina eólica não foi alterada nos quatro cenários, porém como faz parte do sistema elétrico também é atingida pelas perturbações e mudanças de cenário. Na Figura 24 está apresentado o gráfico com os quatro cenários para a velocidade da máquina.

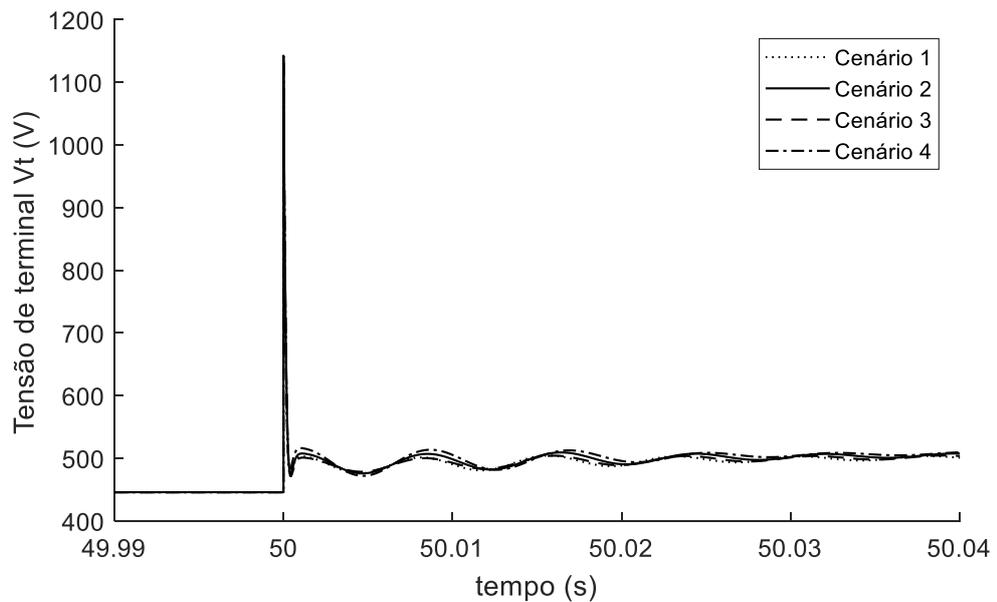
Figura 24 - Velocidade do rotor da máquina de indução da usina eólica no corte de carga.



A usina eólica também sofreu com a queda da geração hídrica tanto no cenário 2 (hT) e especialmente no 4 (hT) é possível verificar um aumento da oscilação.

Foi analisado também o comportamento da tensão de terminal da usina eólica para os quatro cenários de simulação. Na Figura 25 é mostrado o comportamento para os quatro cenários.

Figura 25 - Tensão Terminal da máquina de indução da usina eólica no corte de carga.



Com a queda de carga, a tensão tem um pico e volta à estabilidade.

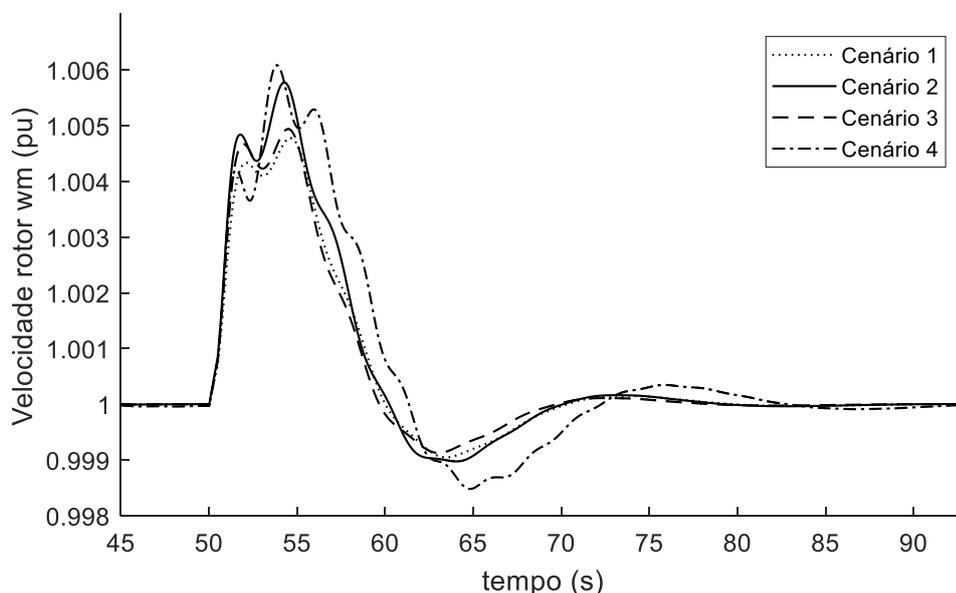
5.3 CURTO-CIRCUITO

A segunda perturbação imposta ao sistema em estudo sofreu foi o curto-circuito trifásico franco na barra 6 com posterior abertura de chaves desligando as linhas conectadas a essa barra simulando a operação da proteção. Essas chaves abrem 0.5s após a ocorrência do curto que ocorre aos 50 s de simulação. Tal como foi feito no tópico 5.2, será analisado o comportamento da velocidade e a tensão de terminal da máquina para cada usina nos quatro cenários de simulação.

5.3.1 USINA TÉRMICA

A velocidade da máquina síncrona da usina térmica para cada um dos cenários de simulação está mostrada nas Figuras 26.

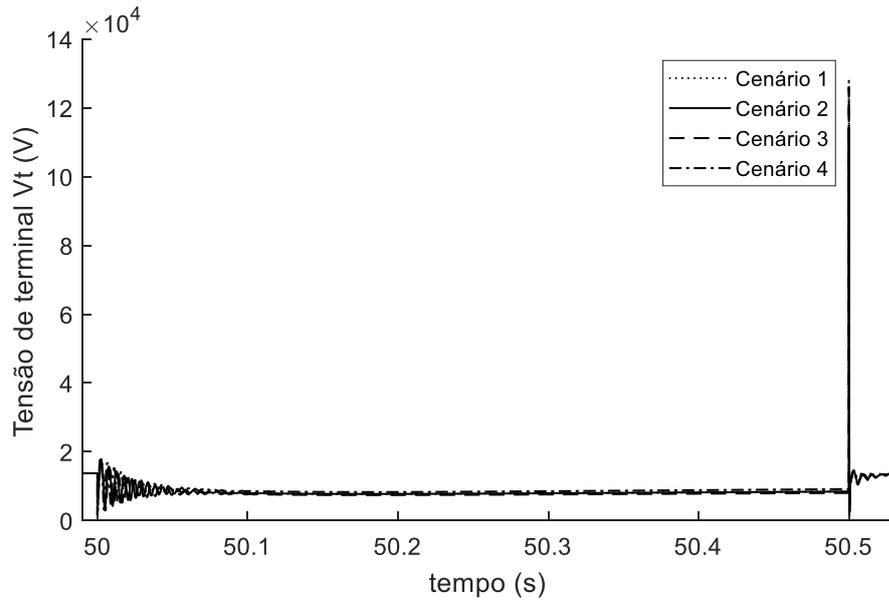
Figura 26 - Velocidade do rotor da máquina síncrona da usina térmica no curto-circuito.



Mais uma vez o cenário 4 (hT) segue como o mais oscilatório. Pode ser observado também que durante o curto a máquina acelera e em seguida tende a voltar ao estado de regime. Como ela tende a voltar ao estado anterior ao curto, o sistema é estável. Vale ressaltar que mesmo aumentando a geração térmica para 24 máquinas, durante a queda da geração hídrica, o sistema ainda tem oscilação.

Também foi analisado o comportamento da tensão de terminal da máquina síncrona. Na Figura 27 pode ser verificada a forma que a máquina respondeu a essa perturbação.

Figura 27 - Tensão Terminal da máquina síncrona da usina térmica no curto-circuito.

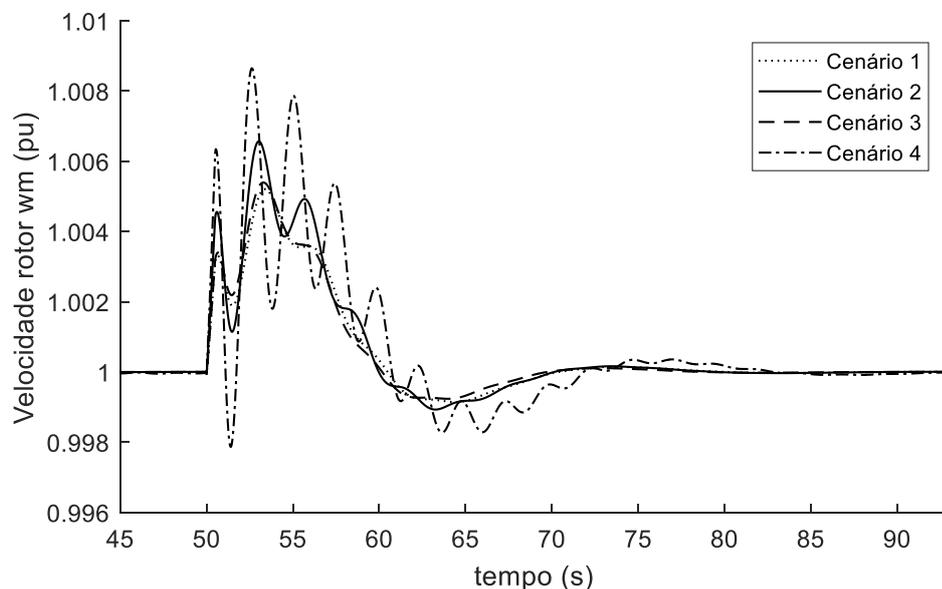


A primeira alteração do gráfico ocorre no momento do curto em 50 s de simulação. O sistema então tende a voltar ao seu período anterior ao curto, porém em 50.5 a proteção atua e retira uma parte do sistema. Dessa vez há um pico maior de tensão e em seguida o sistema retorna ao regime permanente.

5.3.2 USINA HÍDRICA

Também foi verificado o comportamento da velocidade do rotor da máquina síncrona na usina hídrica. Na Figura 28 é apresentado o gráfico dessa velocidade para os quatro cenários.

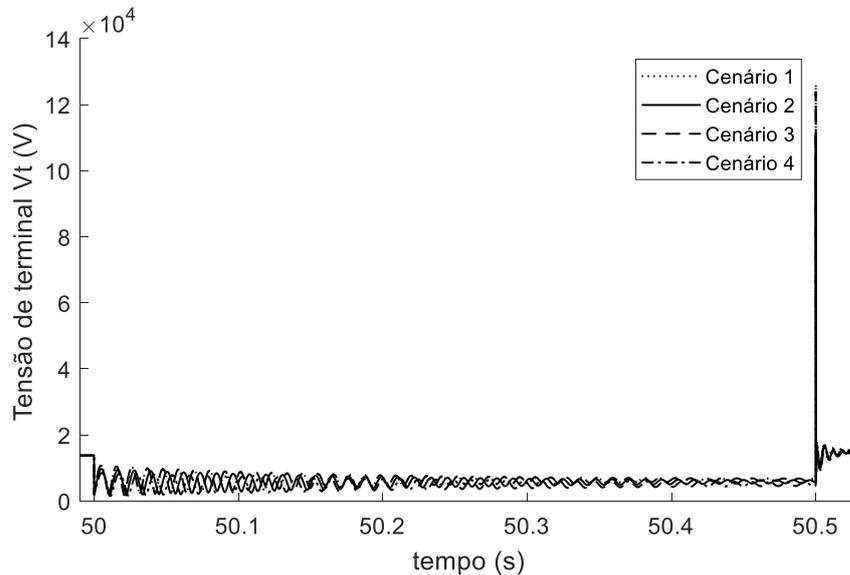
Figura 28 - Velocidade do rotor da máquina síncrona da usina hídrica no curto-circuito.



O comportamento é semelhante ao visto para o corte de carga. O cenário 4 (hT) é o mais oscilatório e comparando as Figuras 28 e 26 pode-se notar que a usina hídrica oscila mais por ter perdido massa girante (inércia).

O comportamento da tensão de terminal para todos os cenários pode ser verificado na Figura 29.

Figura 29 - Tensão Terminal da máquina síncrona da usina hídrica no curto-circuito.

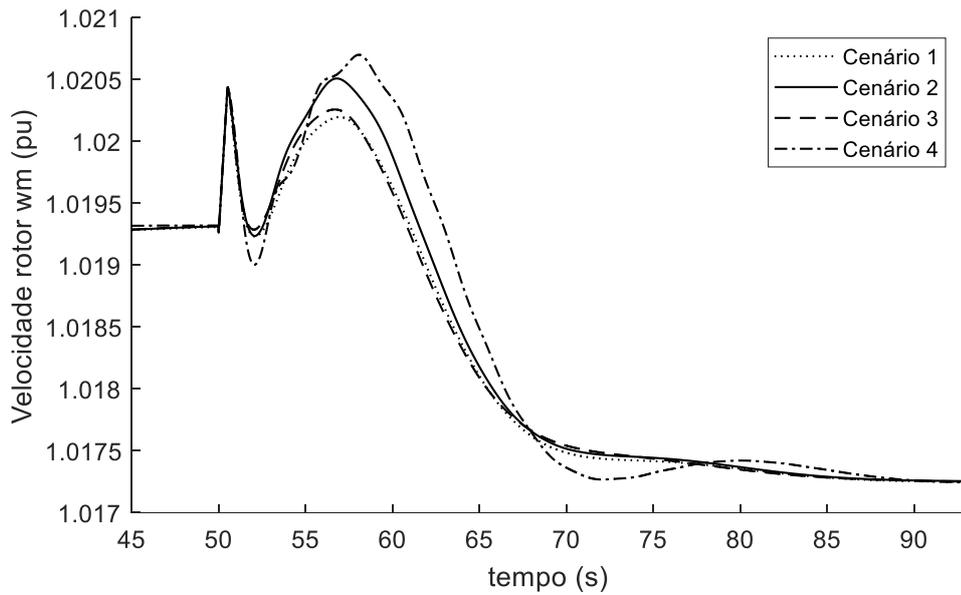


Assim como na usina térmica, a tensão cai em 50 s, devido ao curto e tem um pico em 50.5 s na atuação da proteção retirando o curto do sistema. Em seguida, o sistema tende a voltar ao seu regime estacionário. Observa-se que, nesse caso, o sistema demora mais pra voltar ao regime estacionário e é mais oscilatório que na Figura 27 para a usina térmica.

5.3.3 USINA EÓLICA

Por último foi analisado o comportamento da usina eólica em cada um dos cenários de simulação. Tal como no corte de carga, não houve alteração no número de máquinas dessa usina. Na Figura 30 são apresentadas as curvas da velocidade da máquina para os quatro cenários.

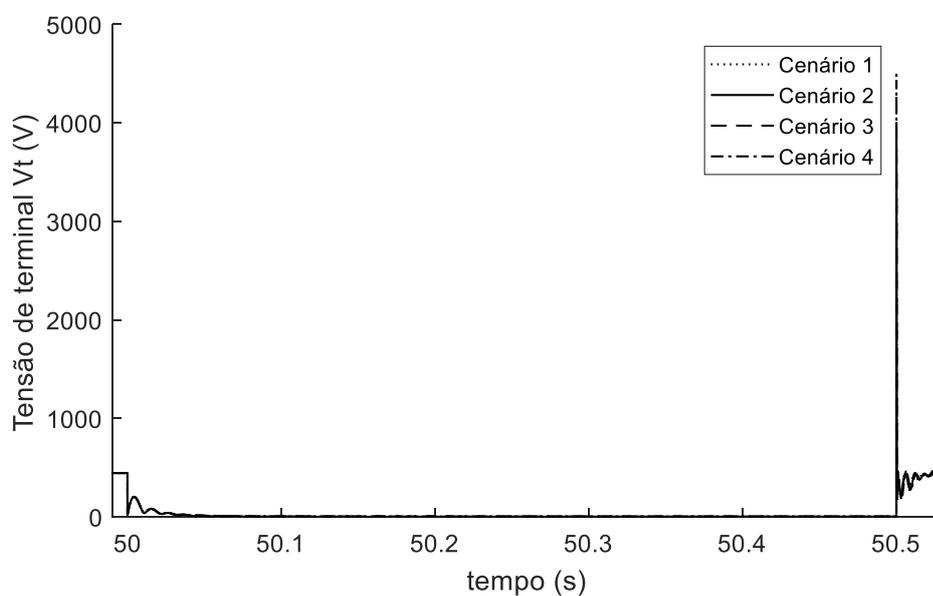
Figura 30 Velocidade do rotor da máquina de indução da usina eólica no curto-circuito.



No momento do curto a máquina acelera e tende ao voltar ao seu estado inicial, porém em 50.5 a proteção atua e a máquina volta a girar mais rapidamente. Em seguida, a máquina tende a procurar a estabilidade e, assim, voltar ao seu estado inicial. Mais uma vez o cenário 4 (hT) foi o de maior oscilação para os parâmetros observados.

Após analisar as formas de onda para a velocidade da máquina, será analisada a tensão de terminal da máquina de indução. Na Figura 31 pode ser observada a tensão de terminal da máquina para os quatro cenários.

Figura 31 – Tensão de terminal da máquina de indução da usina eólica no curto-circuito.



Para todos os cenários observados e analisando a geração que mais predominava na rede, foi verificado que com menor geração hídrica, menor massa girante, logo menor inércia, a rede ficará bem mais oscilatória e menos estável, logo mais vulnerável as possíveis perturbações.

O cenário 4 (hT) foi o mais oscilatório para todas as simulações verificadas. Isso ocorreu, pois esse cenário estava com maior perda de inércia e massa girante. Entre os três primeiros cenários o que mais oscilou foi o segundo (hT), pelo mesmo motivo do cenário 4, menor geração hídrica. É interessante ressaltar que em nenhum momento houve déficit de geração para as cargas. Em todas as opções de simulação a quantidade de geração foi superior a demanda de carga.

Entre as usinas térmica e hídrica a que mais oscilou foi a hídrica, devido a perda maior de geração.

6 CONCLUSÕES

A diversificação da matriz energética se apresenta como uma das grandes propostas para suprir a demanda de energia atual e, melhor, futura. Fontes renováveis como usinas hídricas, solares, eólicas tem crescido cada vez mais e se tornaram uma nova opção de energia limpa e com menores impactos ambientais.

Esse trabalho apresentou uma análise do comportamento dinâmico de uma rede elétrica em um período de estiagem. A rede é constituída por 11 barras, cargas, uma usina térmica, uma hídrica e um parque eólico.

Com auxílio da ferramenta de simulação MATLAB/SIMULINK[®], foi verificado o comportamento do sistema em alguns cenários de simulação quando ocorrem perturbações como curto-circuito e corte de carga, onde se obteve as seguintes conclusões:

Primeiramente é possível notar que como o sistema possui apenas 11 barras a escala da maioria dos gráficos vistos é bem pequena.

- i. Com relação ao corte de carga, ocorre uma modificação da questão de geração e demanda em que as máquinas após a perturbação passam a operar em um novo ponto de operação. Verifica-se que ocorre um alívio de carga nos terminais das máquinas, dessa forma a tensão terminal atinge o novo ponto de equilíbrio com valores maiores, e em decorrência desse alívio a usina diminui a sua produção, por alimentar basicamente a carga que foi retirada. A velocidade angular do gerador síncrono manteve-se constante após a perturbação, embora tenha havido variação líquida da carga, pois essa máquina possui um controlador de velocidade.
- ii. No estudo envolvendo curto-circuito trifásico simétrico na barra 6, verificou-se que todas as máquinas apresentaram queda da tensão, com posterior aceleração no momento da falta. Mesmo tendo simulado a proteção, como se considerou neste estudo, ela não modifica a estrutura da rede, ou seja, o curto-circuito foi eliminado sem a atuação do sistema de proteção, o sistema restabelece, após o defeito, o seu ponto de equilíbrio inicial.
- iii. Em relação aos cenários de simulação, foi observado que o primeiro cenário mostrou o sistema atuando em dias normais, o cenário dois mostrou um sistema com perda de geração hídrica e a geração térmica constante, no cenário 3 uma perda de geração térmica, mantendo a hídrica constante. Foi notado que entre

esses três primeiros cenários, o 2 foi o mais oscilatório devido a perda de massa girante (inércia) da geração hídrica. No último cenário de simulação, com perda maior de hídrica, teve a necessidade de aumentar a térmica para suprir a demanda de carga. O sistema ficou ainda mais oscilatório. Com uma grande oscilação, esse cenário faria a proteção atuar e poderia representar um possível *blackout*.

Este trabalho contribui com o estudo do comportamento dinâmico de um pequeno sistema elétrico com integração de sistemas de geração diferentes tendo como plataforma de simulação o MATLAB/SIMULINK®.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] IMPORTÂNCIA DA ENERGIA ELÉTRICA. ELETROBRÁS. Disponível em: <<http://www.eletronbras.com/elb/natrilhadaenergia/energia-eletrica/main.asp?View=%7BB1E5C97A-39C6-49BE-9B34-9BC51ECC124F%7D>>. Acesso em: 25 de abril de 2018

[2] ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL EM 2018: PANORAMA ASMLATIN. Disponível em: <<http://www.asmlatin.com/2018/02/energia-eletrica-no-brasil-em-2018-panorama/>>. Acesso em: 25 de abril de 2018

[3] AS 10 MAIORES USINAS HIDRELÉTRICAS DO BRASIL. CHP. Disponível em: <<http://chp.com.br/site/index.php/conheca-as-10-maiores-usinas-hidreletricas-do-brasil/#.WuoqsIjwbIU>>. Acesso em: 25 de abril de 2018

[4] NORDESTE BRASILEIRO VIVE A PIOR SECA DOS ÚLTIMOS CEM ANOS. G1 GLOBO. Disponível em: <<http://g1.globo.com/profissao-reporter/noticia/2017/05/nordeste-brasileiro-vive-pior-seca-dos-ultimos-cem-anos.html>>. Acesso em: 26 de abril de 2018.

[5] NORDESTE ENFRENTA A MAIOR SEQUÊNCIA DE ANOS COM SECA EXTREMA JÁ REGISTRADA. GLOBO ÉPOCA. Disponível em: <<https://epoca.globo.com/ciencia-e-meio-ambiente/blog-do-planeta/noticia/2017/08/nordeste-enfrenta-maior-sequencia-de-anos-com-seca-extrema-ja-registrada.html>> Acesso em: 26 de abril de 2018.

[6] ONS ATUALIZA RESULTADOS DA ANÁLISE DA OCORRÊNCIA QUE AFETOU O NORTE E O NORDESTE. ONS. Disponível em: <<http://ons.org.br/Paginas/Noticias/20180506-analiseocorrencianorteenordeste.aspx>>. Acesso em: 26 de abril 2018.

[7] P. M. Anderson, and A. A. Fouad, “Power System Control and Stability”, Editora: IEEE Press – Series on Power Engineering, Second Edition, 2003.

[8] EÓLICAS RESPONDEM POR MAIS DE 60% DO ABASTECIMENTO DE ENERGIA DO NORDESTE. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2017-08/eolicas-respodem-por-60-do-abastecimento-de-energia-do-nordeste-diz-ons>>. Acesso em: 19 de junho de 2018.

[9] ZOU, Jim; PIPATTANASOMPORN, Manisa; RAHMAN, Saifur; LAI, Xu. A Frequency Regulation Framework for Hydro Plants to Mitigate Wind Penetration Challenges. IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY, VOL. 7, NO. 4, OCTOBER 2016.

[10] HASNI, Amal; KHADRAOUI, Hamdi; BACHA, Faouzi. Dynamic Stability Assessment of a Medium Size Power System Towards Large Disturbances Case Study of the Blackout of August 2014 of the Tunisian Power System. 2017 International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies (IC_ASET).

[11] JHA, Naresh Kumari A. N. Particle Swarm Optimization and Gradient Descent Methods for Optimization of PI Controller for AGC of Multiarea Thermal-Wind-Hydro Power Plants. 2013 UKSim 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation.

[12] MARCATO, André L.M. et al. Using Stochastic Dual Dynamic Programming and a Periodic Autoregressive Model for Wind Hydrothermal Long Term Planning. 2015 IEEE Conference.

[13] BAI, Xaiomin, SHAHIDEHPOUR, S.M. Hydro-Thermal Scheduling By Tabu Search And Decomposition Method. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 2, May 1996.

[14] PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UM GERADOR SÍNCRONO. Disponível em: < http://sinop.unemat.br/site_antigo/prof/foto_p_downloads/fot_13701pyincipio_pdf_PRINCIPIO.pdf>. Acesso em: 19 de junho de 2018.

[15] P. Kundur, “Power System Stability and Control”. Editora: McGraw-Hill, 1994.

[16] SOUZA, Zulzy de; FUCHS, Rubens Dario; SANTOS, Afonso Henriques Moreira. Centrais, hidro e termelétricas. São Paulo: E. Blücher/Centraís, 1983. 241p.

[17] G. S. Stavrakakis, and G. N. Kariniotakis, “A General Simulation Algorithm for the Accurate Assessment of Isolated Diesel-Wind Turbines Systems Interaction. Part I: A general Multimachine Power System Model”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 3, Sept. 1995.

[18] USINA TERMOELÉTRICA. INFOESCOLA. Disponível em: <<https://www.infoescola.com/fisica/usina-termoeletrica/>>. Acesso em: 16 de maio de 2018.

[19] Jan Machowski, Janusz Bialek, and James R. Bumby, “Power System Dynamics and Stability”, Editora: John Wiley & Sons, 1st Edition, 1997.

[20] R. G. de Almeida, and J. A. Peças Lopes, “Primary Frequency Control Participation Provided by Doubly Fed Induction Wind Generators”, Proc. PSCC’05, 15th Power System Computation Conference, August 2005, Liège, Belgium.

[21] G. S. Stavrakakis, and G. N. Kariniotakis, “A General Simulation Algorithm for the Accurate Assessment of Isolated Diesel-Wind Turbines Systems Interaction. Part I: A general Multimachine Power System Model”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 3, Sept. 1995.

[22] G. S. Stavrakakis, and G. N. Kariniotakis, “A General Simulation Algorithm for the Accurate Assessment of Isolated Diesel-Wind Turbines Systems Interaction. Part II: Implementation of the Algorithm and Case-Studies with Induction Generators”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 3, Sept. 1995.

[23] SAADAT, Hadi Saadat. Power system analysis. ed.1. New York: McGraw – Hill, 1999.