

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**LUCAS DE SOUZA ACOSTA**

**INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TIPOS DE CARGAS E EQUIPAMENTOS NA  
ESTABILIDADE DE TENSÃO DE LONGO PRAZO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**CORNÉLIO PROCÓPIO**

**2021**

**LUCAS DE SOUZA ACOSTA**

**INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TIPOS DE CARGAS E EQUIPAMENTOS NA  
ESTABILIDADE DE TENSÃO DE LONGO PRAZO**

**Influence of different type of loads and equipment on long-term voltage  
stability**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador: Prof. Dr. Rafael Rorato Londero

**CORNÉLIO PROCÓPIO**

**2021**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

[https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.pt\\_BR](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.pt_BR)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
**Campus Cornélio Procópio**  
**Departamento Acadêmico de Elétrica**  
**Curso de Engenharia Elétrica**



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Lucas de Souza Acosta**

### **Influência de diferentes tipos de cargas e equipamentos na estabilidade de tensão de longo prazo**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 16:00hs do dia 16/07/2021 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof(a). Dr(a). Rafael Rorato Londero - Presidente (Orientador)

---

Prof(a). Dr(a). Edson Aparecido Rozas Theodoro - (Membro)

---

Prof(a). Dr(a). Gabriela Helena Bauab Shiguemoto - (Membro)

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo examinar o impacto de cargas e equipamentos na estabilidade de tensão de longo prazo em sistemas elétricos de potência por meio da análise de sistemas testes compostos por equipamentos como o limitador de sobre-excitação OXL (*Over Excitation Limiter* – OXL) dos geradores síncronos, o transformador com comutação sob carga OLTC (*On-Load Tap Changer* – OLTC), cargas estáticas e dinâmicas, como o motor de indução, que afetam significativamente a estabilidade de tensão de longo prazo e estão presentes nos sistemas de potência ao redor do mundo. Com o objetivo de retratar com maior fidelidade os sistemas reais, emprega-se métodos computacionais para análise dos componentes dinâmicos considerados e cinco casos distintos são comparados entre si, considerando dois cenários de carregamento. Os pontos de operação iniciais do sistema para cada caso são obtidos por meio de fluxos de carga e, em seguida, aplica-se um incremento de carga na área do sistema com o intuito de verificar o colapso de tensão e concluir sobre a influência dos elementos na estabilidade de tensão de longo prazo.

**Palavras-chave:** estabilidade de tensão de longo prazo; OXL; OLTC; motor de indução; colapso de tensão.

## **ABSTRACT**

This work aims to examine the impact of loads and equipment on long-term voltage stability in electrical power systems through the analysis of test systems composed of equipment such as the OXL (Over Excitation Limiter - OXL) of the synchronous generators, the on-load tap changer (OLTC) transformer, static and dynamic loads, such as the induction motor, which significantly affect the long-term voltage stability and are present in the power systems around the world. To portray real systems with greater accuracy, computational methods are used to analyze the considered dynamic components and five distinct cases are compared to each other, considering two loading scenarios. The initial operating points of the system for each case are obtained through load flows and then a load increment is applied in the system area to verify the voltage collapse and conclude on the influence of the elements in long-term tension stability.

**Keywords:** long-term voltage stability; OXL; OLTC; induction motor; voltage collapse.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação de estabilidade de tensão de potência .....	16
Figura 2 – Circuito equivalente de Thévenin de dois barramentos.....	18
Figura 3 – Curva PV e definição de margem de estabilidade de tensão (MET) .....	20
Figura 4 – Curva de capacidade de um gerador .....	25
Figura 5 – Equações elétricas do gerador de rotor liso .....	26
Figura 6 – Curvas do OXL e limite térmico da máquina .....	27
Figura 7 – Diagrama de blocos do OXL .....	28
Figura 8 – Diagrama de blocos do AVR .....	28
Figura 9 – Modelo $\pi$ equivalente com parâmetros concentrados .....	30
Figura 10 – Diagrama esquemático e circuito $\pi$ equivalente do OLTC.....	33
Figura 11 – Circuito equivalente do OLTC .....	34
Figura 12 – Diagrama esquemático de controle do OLTC .....	34
Figura 13 – Diagrama de blocos do OLTC.....	35
Figura 14 – Equivalente de Thévenin do modelo de torque constante.....	38
Figura 15 – Modelo de torque quadrático.....	39
Figura 16 – Características do torque composto.....	40
Figura 17 – Formato de dados do motor de indução.....	40
Figura 18 – Sistema teste estudado.....	43
Figura 19 – Diagrama unifilar do sistema no cenário 1 de carga .....	45
Figura 20 - Diagrama unifilar do sistema no cenário 2 de carga .....	46
Figura 21 – Semelhanças entre as curvas PV dos casos 1 e 2 .....	49
Figura 22 – Perfil de tensão das barras 7, 8 e 11 no cenário 1 .....	49
Figura 23 – Potência reativa e excitação de campo do G2 no cenário 2 .....	50
Figura 24 - Potência reativa e excitação de campo do G3 no cenário 2 .....	51
Figura 25 – Carregamento vs tempo do caso 1 .....	52
Figura 26 – Carregamento vs tempo do caso 2 .....	53
Figura 27 – Correntes de campo dos geradores G2 e G3 no cenário 1 .....	54
Figura 28 – Correntes de campos do gerador G3 em ambos os cenários .....	55
Figura 29 – Potência reativa dos geradores em ambos os cenários.....	55
Figura 30 – Tensão nas barras 7, 8 e 11 no cenário 2.....	56
Figura 31 – Curva PV das barras com carga .....	56
Figura 32 – Curva PV da barra 11 dos casos 1, 2 e 3 no cenário 1 .....	57

Figura 33 – Tensão na barra 11 no cenário 1 .....	58
Figura 34 – Tensão nas barras 7 e 8 no cenário 1 .....	58
Figura 35 – Potência reativa dos geradores no cenário 1 .....	59
Figura 36 – Comparação da atuação do OXL nos casos 3 e 4 no cenário 1 .....	59
Figura 37 – Curva PV da barra 8 no cenário 1 .....	60
Figura 38 – Curva PV da barra 11 no cenário 1 .....	61
Figura 39 – Tensão na barra 8 .....	62
Figura 40 – Tensão na barra 11 .....	63
Figura 41 – Velocidade do motor .....	63
Figura 42 – Potência reativa absorvida pelo motor .....	64
Figura 43 – Corrente de campo do gerador G3.....	64
Figura 44 – Comparativo da tensão na barra 11 para o cenário 2 .....	65
Figura 45 – Curvas PV da barra 8 no cenário 2 .....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Possíveis valores de saída do bloco do relé com temporização ( <b><i>b</i></b> ).....	35
Tabela 2 – Possíveis valores de saída do bloco do motor de acionamento ( $\Delta n$ ).....	36
Tabela 3 – Cenário base de geração do sistema.....	43
Tabela 4 – Cenário 1 de carregamento do sistema.....	44
Tabela 5 – Cenário 2 de carregamento do sistema.....	44
Tabela 6 – Resultados do fluxo de potência para o cenário 1.....	44
Tabela 7 – Resultados do fluxo de potência para o cenário 2.....	45
Tabela 8 – Incremento de carga para cada caso e cenário.....	48
Tabela 9 – Tempos de simulação do caso 1.....	51
Tabela 10 – Tempos de simulação do caso 2.....	52

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>1.1 Objetivos</b> .....	<b>12</b>
1.1.1 Objetivos Gerais .....	12
1.1.2 Objetivos Específicos .....	12
<b>2 ESTABILIDADE DE TENSÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1 Conceitos de Estabilidade de Tensão</b> .....	<b>14</b>
<b>2.2 Classificação de Estabilidade de Tensão</b> .....	<b>16</b>
<b>2.3 Curva PV</b> .....	<b>18</b>
<b>2.4 Análise Estática e Dinâmica</b> .....	<b>21</b>
<b>3 MODELAGEM DO SISTEMA</b> .....	<b>22</b>
<b>3.1 Gerador Síncrono</b> .....	<b>22</b>
<b>3.2 Limitador de sobre-excitação</b> .....	<b>26</b>
<b>3.3 Linha de Transmissão</b> .....	<b>28</b>
<b>3.4 Cargas Estáticas</b> .....	<b>31</b>
<b>3.5 Transformador com comutação sob carga</b> .....	<b>32</b>
<b>3.6 Motor de Indução</b> .....	<b>36</b>
<b>4 RESULTADOS</b> .....	<b>42</b>
<b>4.1 Sistema Teste</b> .....	<b>42</b>
<b>4.2 Resultados do Fluxo de Potência</b> .....	<b>44</b>
<b>4.3 Incrementos de Carga no Sistema</b> .....	<b>46</b>
4.3.1 Casos 1 e 2 .....	48
4.3.2 Caso 3 .....	53
4.3.3 Caso 4 .....	57

4.3.4 Caso 5.....	61
4.3.5 Conclusões dos Estudos Realizados .....	65
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>67</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>68</b>
<b>ANEXO 1 – Dados do Sistema Teste .....</b>	<b>70</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica tem sido de fundamental importância para o desenvolvimento e progresso da humanidade. Diante de tal fato, torna-se cada vez mais importante a garantia de sua qualidade, continuidade e segurança em seu fornecimento. No caso do Brasil, tais características devem ser monitoradas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Mediante isso, o sistema elétrico de potência (SEP) tem papel fundamental na garantia da qualidade do produto entregue ao consumidor. A principal função do SEP é a conversão de formas de energias presentes na natureza em energia elétrica e, após isso, transportá-la para os centros de consumo.

A crescente demanda por energia elétrica e o aumento das dimensões dos sistemas empregados aumentaram a complexidade da operação e do planejamento do mesmo. Juntamente com o aumento da complexidade do SEP, novos problemas têm surgido.

Para a garantia de um funcionamento satisfatório, o SEP possui três importantes características que devem ser verificadas. São elas: confiabilidade, segurança e estabilidade.

A confiabilidade refere-se à capacidade do sistema de operar de maneira satisfatória por um longo período. Esta denota a habilidade de suprir o serviço elétrico adequado de maneira contínua, com pequenos intervalos de interrupção (IEEE/CIGRE, 2004).

A segurança de um sistema elétrico de potência diz respeito à habilidade de continuar seu funcionamento mediante situações de risco, sem que sua operação seja interrompida. Assim, depende das condições iniciais de operação do sistema, bem como das probabilidades de ocorrência de distúrbios (IEEE/CIGRE, 2004).

Por fim, tem-se que a estabilidade de um sistema de potência refere à continuidade de operação após o mesmo ser submetido a algum distúrbio. A segurança do sistema pode ser distinguida da estabilidade através das consequências resultantes do distúrbio (IEEE/CIGRE, 2004).

Tanto a segurança quanto a estabilidade são atributos que variam com as condições do sistema. Assim, é necessário realizar análises de desempenho para condições particulares. Neste trabalho, o foco da análise é sobre a estabilidade de sistemas de potência.

Dentre as ramificações da estabilidade de tensão, tem-se a estabilidade de tensão de longo prazo, objeto de estudo deste trabalho. A estabilidade de tensão de longo prazo está associada com o intervalo de duração do evento. Usualmente, a estabilidade do sistema acontece por causa da interrupção dos equipamentos, uma vez que a instabilidade surge por perda de um equilíbrio a longo prazo, como ocorre, por exemplo, quando uma carga tenta restaurar sua potência além do limite da linha de transmissão e da planta geradora, levando o sistema à perda de estabilidade.

Para a avaliação da estabilidade de tensão de longo prazo pode-se empregar métodos estáticos e dinâmicos. Métodos estáticos apresentam seus resultados de maneira mais veloz, no entanto não contemplam as características dinâmicas do sistema. Os métodos dinâmicos demandam um maior tempo computacional no domínio do tempo (KUNDUR, 1994). Neste trabalho serão empregados ambos os métodos para análise, com enfoque na análise dinâmica do problema.

Assim, definindo-se os conceitos de cargas e analisando seus comportamentos e fazendo-se o mesmo para os sistemas de controles que atuam nos sistemas de potência, procura-se avaliar a influência que estes têm na estabilidade de tensão de longo prazo do sistema.

## **1.1 Objetivos**

Os objetivos deste trabalho são divididos em Objetivos Gerais e Objetivos Específicos e estão apresentados nas subseções a seguir.

### **1.1.1 Objetivos Gerais**

Verificar através de análises dinâmicas a influência de diferentes cargas e equipamentos do sistema de potência no fenômeno de estabilidade de tensão de longo prazo.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Compreender os conceitos de estabilidade de tensão e os elementos que a influenciam;
- Verificar a modelagem correta dos componentes, de forma a reproduzir resultados fiéis e adequados com a realidade; e
- Concluir sobre a influência dos elementos estudados na estabilidade de tensão de longo-prazo.

## 2 ESTABILIDADE DE TENSÃO

Historicamente, instabilidade transitória tem sido a modalidade de instabilidade mais dominante na maioria dos sistemas, por isso tem sido o foco de grande parte das indústrias em relação à estabilidade dos sistemas. Conforme os Sistemas de Potência foram se desenvolvendo, através do contínuo crescimento das interconexões, surgimento de novas tecnologias e novos meios de controle, além do aumento de sua operação em condições de alto carregamento, novas modalidades de instabilidade surgiram nos sistemas. Problemas de instabilidade de tensão, instabilidade de frequência e oscilações se tornaram mais evidentes do que eram antes. Assim, fez-se necessário classificá-las para um melhor desenvolvimento do modelamento e operação de Sistemas de Potência.

### 2.1 Conceitos de Estabilidade de Tensão

O conceito de Estabilidade de Tensão está intrinsicamente relacionado à Estabilidade do Sistema de Potência. Sendo assim, faz-se necessário o entendimento deste para a realização dos estudos de estabilidade. A definição proposta para Estabilidade de Sistemas de Potência, segundo o IEEE/CIGRE (2004, p. 1388), é a seguinte:

Estabilidade de Sistemas de Potência é a habilidade de um sistema elétrico de potência, para uma dada condição inicial de operação, de reobter um estado de operação equilibrado após ser submetido a um distúrbio físico, com suas variáveis limitadas de tal maneira que todo o sistema permaneça intacto.

Tal definição se aplica a sistemas de potência interconectados como um todo. No entanto, frequentemente, a estabilidade de componentes separados também é analisada. Assim o sistema deve ser capaz de se ajustar às mudanças nas condições de operação como um todo. Caso, após ser submetido a um distúrbio, o sistema permanece estável, o mesmo atingirá uma nova condição de equilíbrio com a integridade do sistema sendo preservada.

Logo, o conceito de Estabilidade de Tensão é definido adotando-se como variável de interesse a tensão do sistema. Define-se Estabilidade de Tensão, segundo o IEEE/CIGRE (2004, p. 1390), da seguinte maneira:

Estabilidade de Tensão é a habilidade de um Sistema de Potência de manter estacionária a tensão em todos os barramentos do sistema após ser submetido a um distúrbio para uma dada condição de operação inicial.

O sistema adentra um estado de instabilidade de tensão quando há um aumento na carga do sistema ou mudanças nas condições do sistema causando uma queda progressiva e incontrolável no nível de tensão. O principal fator causante de instabilidade é a incapacidade do sistema de suprir a demanda de potência reativa do sistema (KUNDUR, 1994). Assim, instabilidade de tensão nada mais é do que a falta de estabilidade de tensão, o que pode resultar em quedas progressivas de tensão (TAYLOR, 1994).

A sucessão de eventos de instabilidade de tensão pode levar o sistema a um blecaute ou a níveis de tensões inaceitáveis em partes significantes do sistema. A esse fenômeno dá-se o nome de colapso de tensão (IEEE/CIGRE, 2004). Este colapso pode ser parcial, envolvendo um conjunto de barras ou área de controle, ou pode ser global, abrangendo todas as barras do sistema.

O fenômeno de instabilidade de tensão está geralmente relacionado às cargas do sistema. Em resposta a algum distúrbio, a potência demandada pelas cargas tendem a serem restauradas por ações de reguladores de tensão, transformadores com comutação sob carga e ações de termostatos. Cargas restauradas aumentam o consumo de potência reativa na rede, podendo causar queda no nível de tensão do sistema (IEEE/CIGRE, 2004).

Queda de tensão decorrente do fluxo de potência ativa e reativa pela reatância indutiva da linha de transmissão também contribui para instabilidade de tensão. Quando algum gerador atinge seu limite de campo ou de armadura, tal limitação torna-se mais evidente. Quando a demanda de potência reativa aumenta de maneira que ultrapasse a capacidade de fornecimento do sistema, a estabilidade de tensão pode ser afetada (IEEE/CIGRE, 2004).

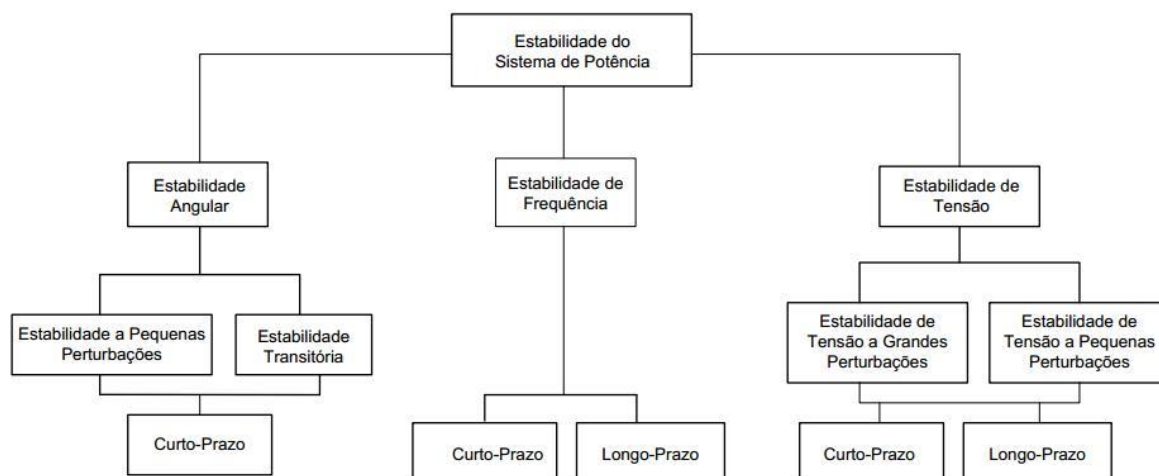
A queda progressiva de tensão em barramentos do sistema é a modalidade mais comum de instabilidade de tensão. No entanto riscos de instabilidade por sobretensão também podem ser verificados. Comumente esta ocorre por conta do comportamento capacitivo da rede, bem como por sistemas de controle de sub-excitação impedindo geradores de absorver o excesso de potência reativa presente na rede.

Nesse caso, a instabilidade está associada a incapacidade tanto do sistema de geração quanto do sistema de transmissão de funcionar abaixo de determinado nível de carregamento (IEEE/CIGRE, 2004). Contudo, a modalidade de estabilidade de tensão a ser estudada neste trabalho é a estabilidade de tensão por subtensão.

## 2.2 Classificação de Estabilidade de Tensão

Para melhor entendimento do fenômeno de estabilidade de tensão, é necessário que se classifique suas diferentes modalidades. A Figura 1 apresenta uma classificação geral da estabilidade de sistemas de potência, apresentando suas classes e ramificações de cada ocorrência. Dentre as classificações, a estabilidade de sistemas de potência pode ser dividida da seguinte maneira: natureza física, de acordo com o parâmetro principal do sistema, dimensão da perturbação, e intervalo de tempo de ocorrência.

Figura 1 – Classificação de estabilidade de tensão de potência



Fonte: Adaptado de IEEE/CIGRE (2004, p.1390).

Neste trabalho o parâmetro a ser analisado é a estabilidade de tensão, que, por sua vez, está relacionada à capacidade do sistema em manter as tensões em níveis adequados e, ao balanço de potência reativa do sistema. Esta modalidade de estabilidade pode ser subdividida quanto à dimensão da perturbação em: estabilidade de tensão a grandes perturbações e estabilidade de tensão a pequenas perturbações. A estabilidade de tensão a grandes perturbações (*Large-Disturbance Voltage Stability*)

diz respeito à habilidade do sistema de manter tensões estacionárias após ser submetido a grandes perturbações como faltas no sistema, perdas de unidades geradoras ou contingências de circuito (IEEE/CIGRE, 2004). Essa habilidade é determinada pelas características da carga e do sistema. O período de análise pode variar de alguns segundos até dezenas de minutos. A estabilidade de tensão a pequenas perturbações (*Small-Disturbance Voltage Stability*) diz respeito à habilidade do sistema de manter tensões estacionárias quando submetido à pequenas perturbações, como o aumento da carga do sistema. Esse tipo de estabilidade é influenciado pelas características da carga e dispositivos de controle em um dado instante de tempo (IEEE/CIGRE, 2004).

Como citado anteriormente, o intervalo de tempo de interesse para problemas relacionados à estabilidade de tensão pode variar de alguns segundos até dezenas de minutos. Assim, faz-se necessário a classificação em relação à sua duração. De acordo com IEEE/CIGRE, a estabilidade de tensão, quanto ao intervalo de tempo, pode ser classificada como sendo de curto prazo (*Shor-Term Voltage Stability*) e longo prazo (*Long-Term Voltage Stability*). A estabilidade de tensão de curto prazo abrange a dinâmica de cargas de ação rápida como motores de indução, cargas eletronicamente controladas e conversores HVDC (*High Voltage Direct Current*). O intervalo de tempo a ser estudado é da ordem de alguns segundos, e sua análise requer a resolução de equações diferenciais apropriadas. Para um melhor resultado, a modelagem dinâmica das cargas é essencial (IEEE/CIGRE, 2004).

A estabilidade de tensão de longo prazo envolve componentes de ação lenta como transformadores com comutação, cargas termostaticamente controladas, e limitadores de corrente de geradores. O intervalo de tempo estudado pode se estender a até dezenas de minutos, e simulações são necessárias para a análise do desempenho dinâmico do sistema. Geralmente, a estabilidade é determinada pelo resultado da interrupção da atuação do equipamento (IEEE/CIGRE, 2004).

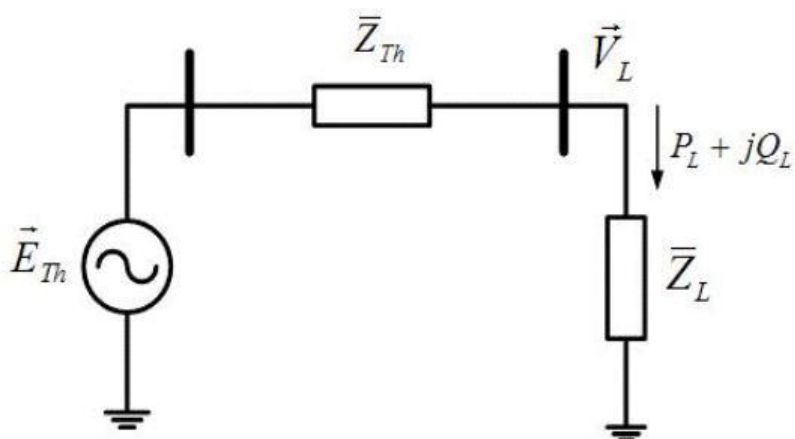
Definidas as classificações da estabilidade de tensão, análises estáticas podem ser empregadas para estimar margens de estabilidade visando identificar fatores que influenciam a estabilidade a fim de se obter um quadro mais amplo sobre as condições do sistema, abordando uma maior quantidade de situações. Um dos métodos mais utilizados para estudos sobre estabilidade de tensão é a curva PV.

### 2.3 Curva PV

A análise da curva PV (*Power - Voltage*) de um sistema é uma das ferramentas mais empregadas para análise estática de estabilidade de tensão. O processo da análise PV envolve monitorar as tensões do sistema, como resultado da solução de sucessivos fluxos de cargas, variando-se a demanda do sistema. Assim, para cada aumento na demanda, um problema do fluxo de carga é resolvido, e os pontos de equilíbrio obtidos definem a curva PV.

Considere o circuito equivalente mostrado na Figura 2, retirada de Corsi (2007, p. 2). Esse circuito é formado por dois barramentos e apresenta os circuitos de geração e de transmissão reduzidos a um circuito equivalente de Thévenin.

Figura 2 – Circuito equivalente de Thévenin de dois barramentos



Fonte: Corsi (2007, p.2).

Para maior simplicidade, considera-se que a impedância de Thévenin da Figura 2 é uma reatância pura,  $X_{Th}$ . Assim, as potências ativas e reativas entregues ao barramento da carga são:

$$P_L = \frac{E_{th}V_L}{X_{Th}} \text{sen}(\delta) \quad (1)$$

$$Q_L = \frac{E_{th}V_L}{X_{Th}} \text{cos}(\delta) - \frac{V_L^2}{X_{Th}} \quad (2)$$

Onde o ângulo  $\delta$  é chamado de ângulo de carga e é definido pela diferença de fase das tensões  $E_{Th}$  e  $V_L$ .

A equação (2) pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$Q_L + \frac{V_L^2}{X_{Th}} = \frac{E_{th}V_L}{X_{Th}} \cos(\delta) \quad (3)$$

Elevando-se ao quadrado as equações (1) e (3) e somando-as, eliminando assim o termo  $\delta$  pela identidade trigonométrica  $\cos(\delta)^2 + \sin(\delta)^2 = 1$ , resultando em:

$$P_L^2 + \left(Q_L + \frac{V_L^2}{X_{Th}}\right)^2 = \frac{E_{th}V_L^2}{X_{Th}} \quad (4)$$

Resolvendo a equação (4) para  $V_L$ , obtém-se:

$$V_L = \sqrt{\frac{E_{Th}^2}{2} - Q_L X_{Th} \pm \sqrt{\frac{E_{Th}^4}{4} - X_{Th}^2 P_L - X_{Th} E_{Th} Q_L}} \quad (5)$$

Por meio da equação (5) é possível notar que a tensão entregue à carga depende das potências ativa  $P_L$  e reativa  $Q_L$  transferidas pelo sistema, definindo a característica da rede (CORSI, 2007).

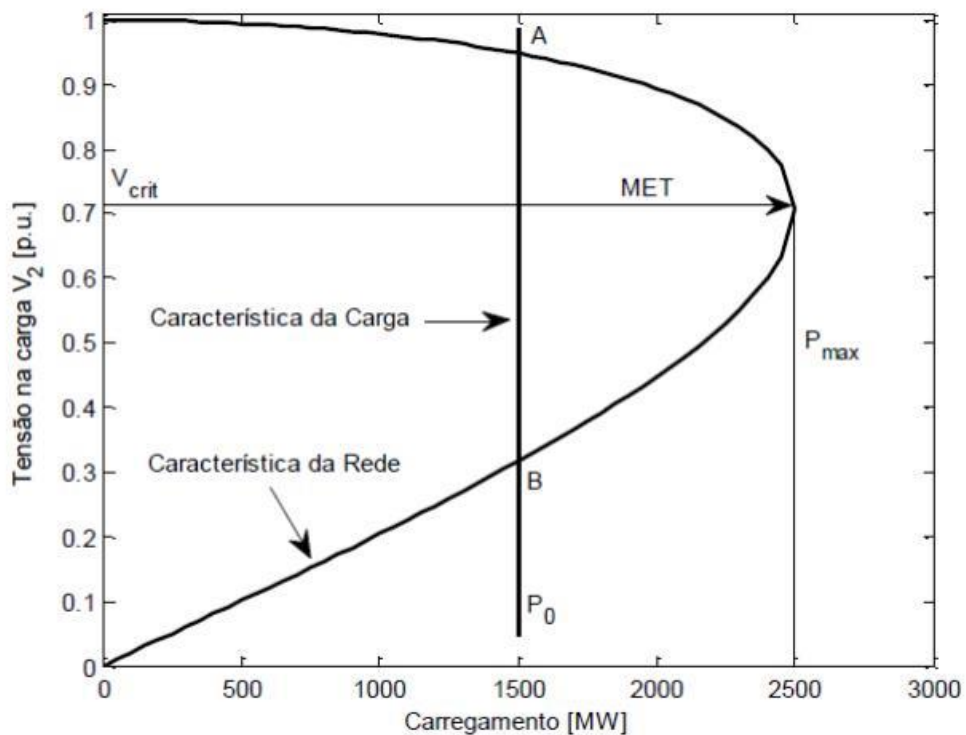
Contudo as características da carga nem sempre são as mesmas, podendo as componentes ativas e reativas variar de maneira diferente. Entretanto, assumindo que a carga possui fator de potência constante, pode-se garantir que as sensibilidades são iguais e que a variação das parcelas ativas e reativas é proporcional (CUTSEM, 1998). Assim, para uma carga com fator de potência  $\cos(\theta)$  constante e variando-se as potências ativas e reativa, pode-se obter a curva PV deste dado sistema. Considerando uma carga com sensibilidade nula à tensão, ou seja, como sendo uma carga de característica potência constante, pode-se relacionar a sua curva de carga com a curva PV do sistema, obtendo o gráfico representado na Figura 3.

A curva PV representa a variação da tensão conforme se varia a demanda. O limite de transferência de potência é alcançado em  $P_{max}$ . A partir deste instante o sistema alcança sua máxima capacidade, e nenhum acréscimo de potência pode ser

suprido por ele. Esse ponto de operação estabelece um valor de tensão, abaixo do qual o sistema é considerado instável, para cargas do tipo potência constante. A esse ponto dá-se o nome de tensão crítica ( $V_{crit}$ ).

Analisando as curvas presentes na Figura 3, observa-se que não existe um ponto de operação, uma vez que a partir de  $P_{max}$  a característica da carga e a característica da rede não mais se interceptam.

**Figura 3 – Curva PV e definição de margem de estabilidade de tensão (MET)**



Fonte: Londero (2014, p. 55).

A margem estabilidade de tensão (MET), observada na Figura 3, pode ser obtida de acordo com a equação (6):

$$MET(\%) = \frac{P_{max} - P_0}{P_{max}} 100\% \quad (6)$$

Trata-se de uma medida da capacidade de transferência de potência do sistema de transmissão. Este índice representa a distância entre os pontos base de operação da carga ( $P_0$ ) e o ponto máximo de carregamento ( $P_{max}$ ).

## 2.4 Análise Estática e Dinâmica

A dinâmica dos equipamentos que influenciam na estabilidade de tensão é geralmente lenta. Dessa maneira, muitos fatores podem ser examinados através de métodos estáticos, que verificam a viabilidade do ponto de equilíbrio representado por uma condição de operação específica do sistema.

Os métodos estáticos baseiam-se em análise de fluxo de carga, nas curvas PV e QV e no cálculo de índices de proximidade de instabilidade de tensão.

Entretanto, os métodos estáticos não contemplam o comportamento dos equipamentos dinâmicos do sistema. A análise dinâmica do sistema inclui simulações no domínio do tempo e análise de sistemas linearizados, o que implica em um tempo computacional mais elevado para que se possa obter uma resposta mais fidedigna do desempenho dinâmico do sistema (TAYLOR, 1994).

Assim, neste presente trabalho, serão empregados métodos de análise de componentes dinâmicos para que se possa efetuar a análise acerca da estabilidade de tensão de longo prazo, procurando-se apresentar o comportamento transitório dos diversos componentes com comportamento dinâmicos como geradores síncronos, transformadores com comutação sob carga, limitadores de sobre-excitação e motores de indução

### 3 MODELAGEM DO SISTEMA

A estabilidade de tensão está relacionada com as características das cargas presentes no sistema, principalmente com as dinâmicas de restauração das cargas pós-distúrbio. Está relacionada também com a capacidade da rede de transmitir potência para as cargas. Dentro deste aspecto é válido ressaltar a influência dos equipamentos de controle de tensão empregados no sistema, uma vez que estes interferem na habilidade da rede de transferir potência, desde o ponto de geração até o ponto de consumo.

Neste trabalho serão analisados os modelos de cargas estático e dinâmico. Cargas estáticas apresentam diferentes sensibilidades em relação à tensão, e essa sensibilidade influencia fortemente o processo de restauração da carga. O modelo dinâmico demanda um tempo computacional mais elevado para sua análise. Este trabalho apresenta como principal exemplo de carga dinâmica o motor de indução.

Serão analisados também componentes de controle, presentes tanto na geração, no caso do limitador de sobre-excitação, quanto no sistema de transmissão, como por exemplo, o transformador com comutação sob carga.

#### 3.1 Gerador Síncrono

Geradores síncronos são a fonte primária de potência reativa fornecida, sendo assim, são responsáveis pela manutenção dos níveis de tensão desejados no sistema de potência. Consequentemente suas características e limitações são de extrema importância para análise de estabilidade de tensão.

Para fins de análise de estabilidade, é mais conveniente referir a posição do rotor a uma referência de rotação síncrona, conforme Cutsem (1998, p. 51). Assim, define-se o ângulo do rotor, em radianos, como sendo o ângulo elétrico entre o eixo de quadratura da máquina e a referência síncrona:

$$\delta = \theta_r - \omega_0 t - \delta_0 \quad (7)$$

Onde  $\delta$  é a posição angular do rotor,  $\delta_0$  sua posição inicial,  $\theta_r$  o ângulo elétrico entre o rotor do eixo direto e o eixo de armadura e  $\omega_0$  é a frequência angular

nominal, em radianos por segundo (CUTSEM, 1998). Quando expressa em termos de  $\delta$  e em p.u. (por unidade), a equação do movimento do sistema gerador-turbina é representada pela equação (8):

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = T_m' - T_e' \quad (8)$$

Onde:

- $H$  é a constante de inércia;
- $T_m'$  é o torque mecânico produzido pela turbina; e
- $T_e'$  é o torque eletromagnético do gerador.

A equação (8) é conhecida como equação *swing*, ou seja, é a equação de movimento da máquina síncrona.

É importante também conhecer as características da máquina síncrona quanto à sua excitação.

O circuito do rotor de uma máquina síncrona está disposto ao longo dos eixos direto (eixo d) e eixo de quadratura (eixo q). O eixo direto coincide com o eixo de excitação de campo ( $f_d$ ). O eixo de quadratura está 90° adiantado em relação ao eixo direto (CUTSEM, 1998).

É possível saber como o fluxo concatenado no enrolamento de campo varia sob a influência da tensão de excitação de campo ( $E_f$ ) e da reação de armadura ( $i_d$ ). A equação apresentada a seguir é conhecida como equação de decaimento de fluxo de campo, e mostra justamente o comportamento do fluxo concatenado no enrolamento de campo:

$$\frac{dE_q'}{dt} = \frac{E_f - E_q}{T_{d0}'} \quad (9)$$

Onde:

- $E_q'$  tensão transitória no eixo q;
- $E_f$  força eletromotriz proporcional a tensão de campo;
- $E_q$  tensão de circuito aberto; e

- $T_{d0}'$  constante de tempo transitória no eixo d em circuito aberto.

A equação (9) pode ser reescrita para analisar-se a influência da reação de armadura:

$$\frac{dE_q'}{dt} = \frac{-E_f' + E_f - (X_d + X_d')i_d}{T_{d0}'} \quad (10)$$

Sendo:

- $X_d$  a reatância síncrona do eixo direto;
- $X_d'$  a reatância transitória do eixo direto; e
- $i_d$  a corrente do estator no eixo direto.

Quando se analisa a influência de máquinas síncronas na estabilidade de tensão de longo prazo é importante considerar suas restrições de fornecimento de potência reativa ao sistema. Essas restrições estão relacionadas com os limites operacionais do gerador, que são:

- Limite térmico do estator (máxima corrente terminal);
- Limite térmico do rotor (máxima corrente de excitação);
- Limite de mínima corrente de excitação; e
- Limite de estabilidade.

A Figura 4, retirada de Rangel (2009, p. 3), apresenta os limites de capacidade de um gerador. Qualquer ponto de operação que se encontre fora da região em amarelo transgredirá os limites de operação segura e deve ser evitado (RANGEL, 2009).

O limite térmico do estator é definido como sendo o lugar geométrico onde se encontram os pontos de operação com corrente estatórica nominal constante. Como este limite é determinado pela corrente terminal do gerador, a potência aparente varia diretamente com a tensão terminal (RANGEL, 2009).

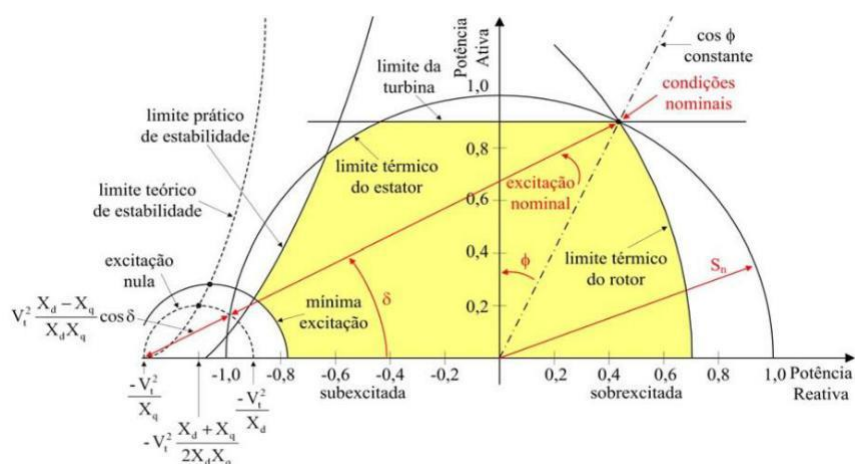
O limite térmico do rotor é formado pelos pontos de operação do gerador com corrente de excitação nominal constante. Sua relação com a tensão depende da

corrente demandada no estator, a qual varia diretamente com a potência aparente e inversamente com a tensão terminal (RANGEL, 2009).

O limite de mínima excitação é formado pelos pontos de operação com corrente de excitação mínima constante. Sua variação com a tensão também depende da corrente demandada no estator (RANGEL, 2009).

Por fim, o limite de estabilidade é definido pelo lugar geométrico dos pontos de operação com valor máximo de potência ativa fornecida pela máquina com excitações constantes (RANGEL, 2009).

**Figura 4 – Curva de capacidade de um gerador**



**Fonte: Rangel (2009, p. 3).**

As curvas de capacidades dos geradores do sistema teste analisado estão presentes no Anexo 1 deste trabalho, onde é possível observar os limites de operação segura para os geradores síncronos modelados.

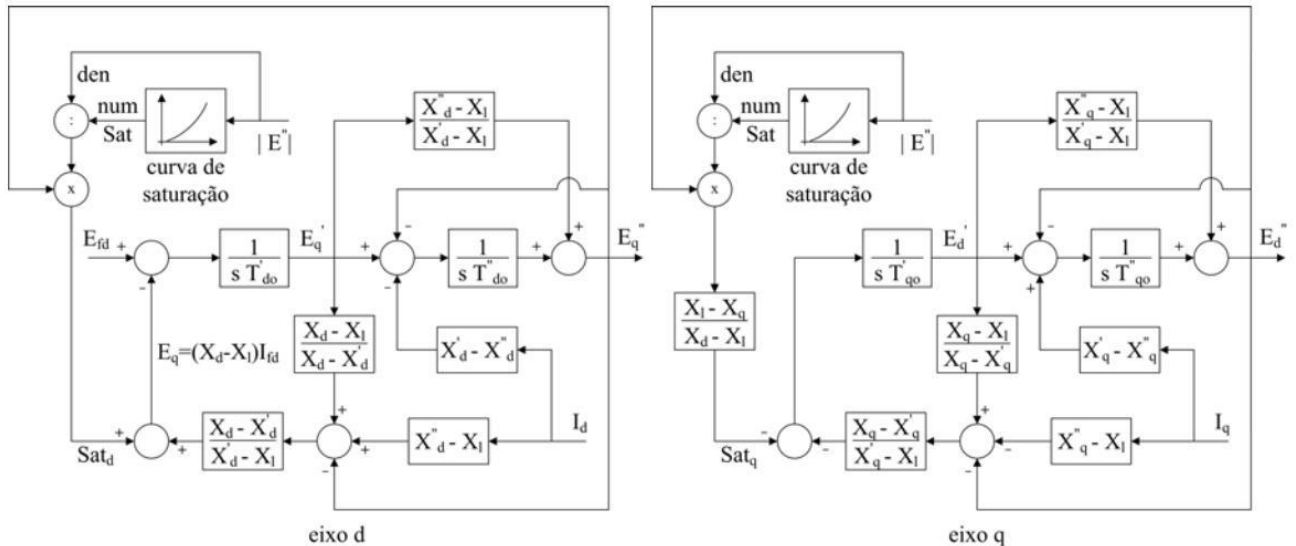
A fim de proteger as máquinas contra o sobreaquecimento dos enrolamentos, devido à elevada demanda de potência reativa, será utilizado o limitador de sobreexcitação associado a um modelo de regulador de tensão. Tais elementos serão descritos na próxima seção.

Para a realização deste trabalho será utilizado o modelo de gerador apresentado na Figura 5, retirada de CEPEL (2018, p. 183), que apresentam os diagramas de blocos no domínio da frequência dos modelos de geradores de polos lisos presentes no *software* ANATEM.

Este modelo indica as grandezas relacionadas aos eixos direto e de quadratura, como por exemplo, reatâncias síncronas, tensões e correntes. Apresenta,

também, as grandezas relacionadas a características transitórias, bem como subtransitórias, em ambos os eixos.

Figura 5 – Equações elétricas do gerador de rotor liso



Fonte: CEPEL (2018, p. 183).

### 3.2 Limitador de Sobre-Excitação

O controle do sistema de excitação de máquinas síncronas apresenta grande influência em seu desempenho, na regulação de tensão e na estabilidade. Não só a operação de uma única máquina síncrona é afetada por sua excitação, mas também, o comportamento do sistema como um todo é dependente desse sistema de excitação.

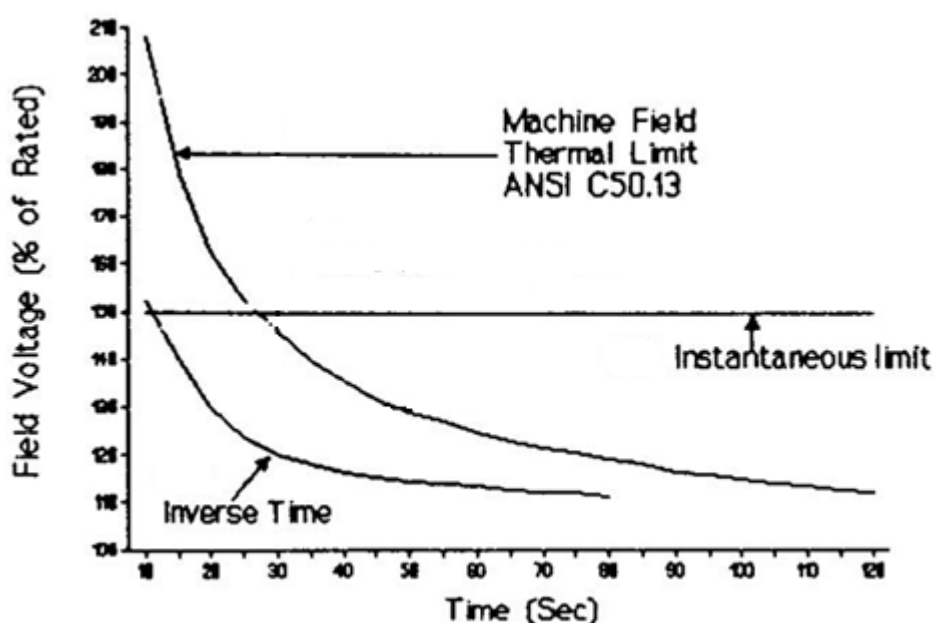
Dentre os sistemas limitadores de excitação utilizados, destaca-se o limitador de sobre-excitação (*Over Excitation Limiter* - OXL). Um limitador de sobre-excitação é utilizado para limitar a corrente de campo de uma máquina síncrona. Este tipo de limitador previne sobre-excitações que causariam carregamento térmico excessivo no enrolamento de campo da máquina. Como máquinas síncronas podem suportar sobre-excitação por um curto período de tempo, o OXL apresenta dois níveis de limite de proteção (ANSI/IEEE, 1986), conforme apresentado na Figura 6.

O primeiro nível previne sobre-excitação além de um dado valor, através de um limite instantâneo (*Instantaneous limit*), ou seja, caso a corrente de campo exceda

o limite máximo estabelecido ( $I_{fdmax 2}$ ), o OXL atua instantaneamente, reduzindo a corrente de campo para um valor de operação seguro (GIRGIS, 1995).

O segundo nível de proteção entra em ação atuando com característica inversamente proporcional ao tempo (*Inverse Time*), ou seja, há diminuição da corrente de campo, para valores próximos ao nominal ( $I_{fdmax 1}$ ), conforme o tempo vai aumentando (GIRGIS, 1995).

Figura 6 – Curvas do OXL e limite térmico da máquina



Fonte: Adaptado de Girgis (1995, p. 541).

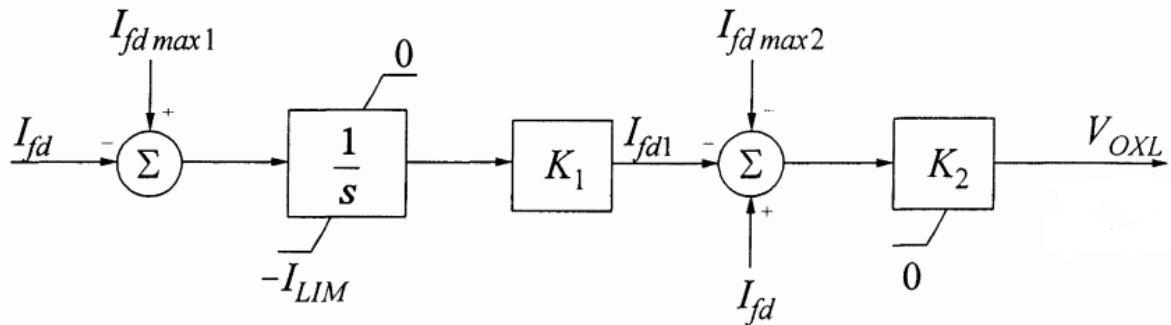
Tipicamente o limitador de sobre-excitação é utilizado junto a outro tipo de dispositivo de proteção. Um bom exemplo é a atuação em conjunto do OXL e do regulador automático de tensão (*Automatic Voltage Regulator - AVR*). Ambos atuam de maneira a fazer com que a máquina retorne a um ponto seguro de operação.

O AVR possui importante papel na manutenção da sincronia entre as unidades geradoras do sistema. O AVR atua durante condições nas quais a máquina é levada a operar além dos limites de operação definidos pela curva de capacidade da máquina.

Quando o OXL atua, é produzido um sinal que causa impacto no sistema de excitação do gerador, conforme Figura 7. Este sinal ( $V_{OXL}$ ) é adicionado ao somador

do regulador de forma subtrativa, causando um efeito equivalente à redução da tensão de referência ( $V_{REF}$ ) do AVR.

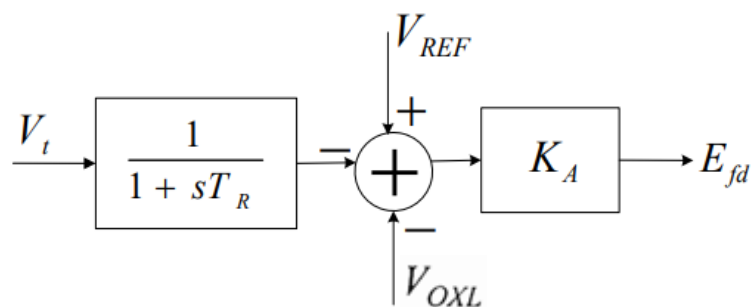
Figura 7 – Diagrama de blocos do OXL



Fonte: Adaptado de Kundur (1994, p. 982).

Em condições normais de operação, o sinal de saída do OXL é nulo e não causa impacto na regulação de tensão da máquina. No entanto, quando o limitador atua, o seu sinal de saída reduz a tensão de referência do regulador, forçando a redução da corrente de campo para o limite estabelecido, por meio da redução da excitação do gerador. A atuação conjunta do OXL e AVR pode ser observada na Figura 8.

Figura 8 – Diagrama de blocos do AVR



Fonte: Adaptado de Kundur (1994, p. 759).

### 3.3 Linha de Transmissão

As linhas de transmissão são um conjunto de condutores que transportam potência elétrica das unidades geradoras até as cargas consumidoras. São caracterizadas por três parâmetros: resistência série  $R$ , devido à resistividade do

condutor utilizado, indutância série  $L$ , por apresentar um campo magnético ao redor do condutor e uma capacitância shunt  $C$ , devido à presença de campo elétrico entre os condutores (KUNDUR, 1994).

Para a representação da linha de transmissão pode-se usar o modelo  $\pi$ -equivalente (STEVENSON, 1986), com todos os parâmetros concentrados. Esse modelo permite representar os comportamentos resistivo, indutivo e capacitivo, distribuídos ao longo da linha, em apenas um ponto.

No modelo  $\pi$  equivalente, apresentado na Figura 9, os comportamentos resistivos e indutivos estão concentrados em  $Z$ , a impedância total série da linha, e o comportamento capacitivo está concentrado em  $Y$ , a admitância total transversal da linha. Esses parâmetros concentrados são obtidos através do produto entre os parâmetros por unidade de comprimento e a extensão da linha (STEVENSON, 1986).

Assim, tem-se que:

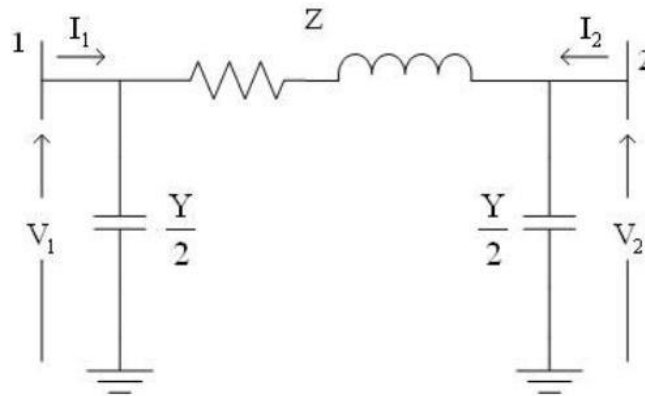
$$Z = (r + j\omega l)d \quad (11)$$

$$Y = j\omega cd \quad (12)$$

Onde:

- $\omega$  é a frequência angular do sistema ( $rad/s$ );
- $r$  é a resistência por unidade de comprimento ( $\Omega/km$ );
- $l$  é a indutância por unidade de comprimento ( $H/km$ );
- $c$  é a capacitância por unidade de comprimento ( $C/km$ ); e
- $d$  é o comprimento da linha ( $km$ ).

Figura 9 – Modelo  $\pi$  equivalente com parâmetros concentrados



Fonte: Adaptado de Stevenson (1986, p. 98).

Sendo assim, pode-se relacionar as correntes e tensões da seguinte maneira:

$$I_1 = \frac{V_1 - V_2}{Z} + V_1 \frac{Y}{2} \quad (13)$$

$$I_2 = \frac{V_2 - V_1}{Z} + V_2 \frac{Y}{2} \quad (14)$$

Levando em consideração que a resistência série  $R$  é pequena, pode-se relacionar a indutância  $L$  com a capacitância  $C$ , obtendo-se um novo parâmetro conhecido como impedância característica da linha (*Surge Impedance*) que é igual a  $\sqrt{L/C}$  (STEVENSON, 1986).

A potência entregue pela linha, quando a mesma é influenciada apenas pela impedância característica, é chamada de carregamento característico (*Surge Impedance Loading - SIL*) (STEVENSON, 1986), sendo representada da seguinte maneira:

$$SIL = \frac{V_0^2}{z_c} \text{ [MW]} \quad (15)$$

Onde:

- $V_0$  é a tensão nominal da linha [kV]; e
- $Z_C$  é a impedância característica da linha [ $\Omega$ ].

Quando a linha de transmissão está operando em seu carregamento característico, o consumo de reativos pela indutância série é compensado pela geração de reativos de sua capacitância shunt.

Em geral, devido às características próprias, a linha de transmissão pode atuar consumindo potência reativa (condição de carga pesada) ou então injetando potência reativa (condição de carga leve).

### 3.4 Cargas Estáticas

De acordo com o IEEE (1993, p. 472), o termo carga pode apresentar diversos significados. Dentre eles:

- Dispositivos que consomem potência;
- Potência total consumida pelos componentes conectados ao sistema elétrico;
- Parte do sistema que não é explicitamente representada pela modelagem deste, mas é tratado como se fosse um dispositivo que consome potência, estando conectado a um barramento do sistema; e
- Potência de saída de um gerador ou de uma planta geradora.

Com base em suas características, os tipos de cargas são divididos em dois modelos: modelo estático e modelo dinâmico.

O modelo de carga estática expressa as potências ativa e reativa como função da tensão em qualquer instante de tempo. As componentes ativa e reativa são tratadas por equações algébricas que determinam seu consumo pelas cargas. Usualmente utiliza-se o modelo de carga exponencial para representação destas. A relação entre potência e tensão, nesse modelo, se dá da seguinte maneira:

$$P = P_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^\alpha \quad (16)$$

$$Q = Q_0 \left( \frac{V}{V_0} \right)^\beta \quad (17)$$

Esse tipo de modelo é utilizado para representar a tensão específica do componente.  $V_0$  é a tensão inicial de operação do sistema, e  $P_0$  e  $Q_0$  são as potências consumidas na condição inicial (IEEE, 1998).

Os parâmetros nesse modelo são os expoentes  $\alpha$  e  $\beta$ . Dependendo do valor atribuído a esses expoentes a carga pode ser do tipo potência constante, quando  $\alpha$  e/ou  $\beta$  for igual a 0, corrente constante, com  $\alpha$  e/ou  $\beta$  igual a 1, e impedância constante quando  $\alpha$  e/ou  $\beta$  for igual a 2.

O modelo dinâmico de carga expressa as potências ativa e reativa, em qualquer instante de tempo, como função da magnitude da tensão e da frequência, incluindo instantes de tempo passados, bem como instantes de tempo presente. Equações diferenciais são comumente empregadas para representar tal modelo. Neste trabalho será apresentado como exemplo de modelo dinâmico o motor de indução.

### 3.5 Transformador com comutação sob carga

Dentre os elementos a serem analisados, em relação à sua interferência na estabilidade de tensão, está o transformador com comutação sob carga (*On-Load Tap Changer* - OLTC). Este é amplamente utilizado nos dias de hoje para controle de tensão.

Transformadores com comutação sob carga não são componentes de carga, no entanto, do ponto de vista do sistema de transmissão, podem ser considerados como parte da carga que afeta a estabilidade do sistema de potência.

Este tipo de transformador é utilizado principalmente quando se faz necessário manter os níveis de tensão do sistema dentro de certas faixas de valores pré-estabelecidos.

Para manter o nível tensão da barra controlada, o tap pode variar para mais ou para menos, a depender do lado a ser controlado. Na Figura 10, o modelo

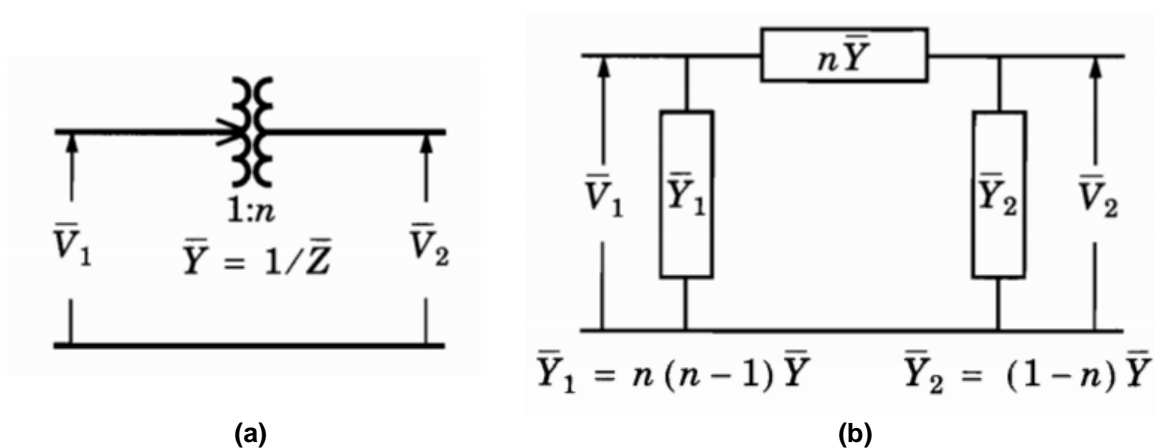
esquemático de um transformador OLTC e seu circuito  $\pi$  equivalente são apresentados, estando o tap variável no lado  $V_2$ .

A partir das admitâncias indicadas na Figura 10b, é possível analisar o efeito da variação da relação de transformação sobre os módulos das tensões  $V_1$  e  $V_2$ . Quando o tap opera em condição nominal, ou seja,  $n = 1$ , as admitâncias *shunt* ligadas às barras 1 e 2 são nulas e o circuito  $\pi$  equivalente se resumirá apenas à admitância série  $\bar{Y}$  (SMOLINSKI, 1981).

Caso o valor do tap seja alterado para um valor menor que o tap nominal ( $n < 1$ ), a admitância *shunt* ligada à barra 1, terá sinal contrário a  $\bar{Y}$ , sendo capacitiva e a admitância *shunt* ligada à barra 2 será indutiva. Logo, a tensão da barra 1 tenderá a aumentar, enquanto a tensão da barra 2 a diminuir (SMOLINSKI, 1981).

Ao contrário, se o valor do tap for alterado para um valor maior que o nominal ( $n > 1$ ), a admitância *shunt* conectada à barra 1 terá o mesmo sinal que  $\bar{Y}$ , sendo indutiva, e a admitância *shunt* conectada à barra 2 será capacitiva. Assim, a tensão da barra 1 tenderá a diminuir e a tensão da barra 2, por sua vez, tenderá a aumentar (SMOLINSKI, 1981).

Figura 10 – Diagrama esquemático e circuito  $\pi$  equivalente do OLTC

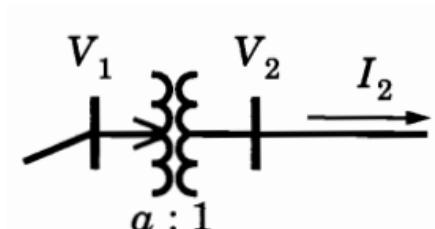


Fonte: Taylor (1994, p. 102).

Portanto, para que a ação do tap eleve a tensão da barra de carga, a admitância *shunt* deste lado deve ser matematicamente equivalente à um capacitor e a admitância *shunt* do lado oposto a um indutor (TAYLOR, 1994). Neste trabalho,

conforme apresentado na Figura 11, considera-se que o tap variável está do lado oposto ao da carga, assim, para elevar a tensão da barra de carga, o tap deverá diminuir.

Figura 11 – Circuito equivalente do OLTC



Fonte: Taylor (1994, p. 98).

O diagrama esquemático de controle do OLTC utilizado neste trabalho está representado na Figura 12, retirada de Rangel (2007, p. 3).

Figura 12 – Diagrama esquemático de controle do OLTC



Fonte: Adaptado de Rangel (2007, p. 3).

O elemento sensor é responsável pela medição de tensão do barramento e a compara com um sinal de referência de controle. A fim de se evitar atuações frequentes devido a oscilações do sinal de tensão, o erro é aplicado a uma banda morta e, caso o erro ultrapasse a banda morta, o elemento sensor envia um sinal para atuação do relé de temporização (RANGEL, 2007).

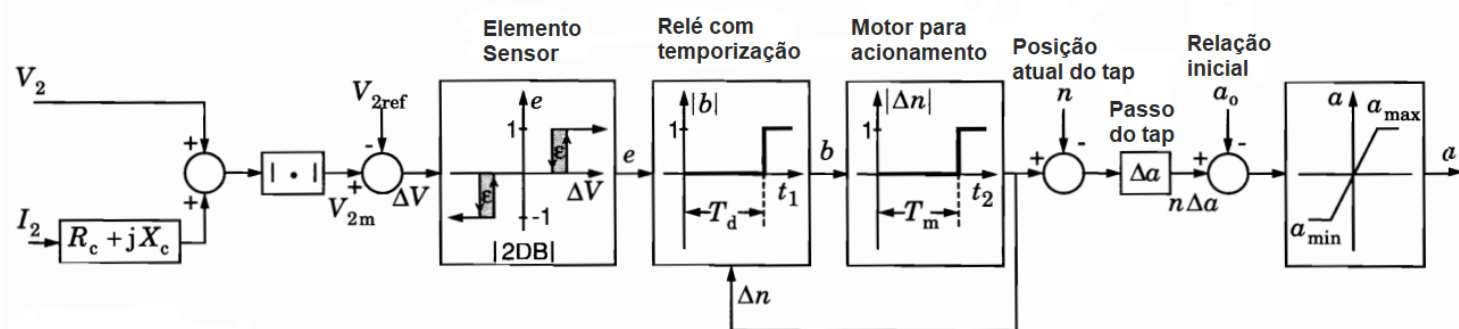
A filosofia de temporização ( $T_d$ ) varia para cada fabricante. Neste trabalho é considerado o esquema de dupla temporização fixa, sendo a primeira mudança mais lenta do que as subsequentes.

Uma vez ativado o relé de temporização, a mudança do tap é acionada por meio de um motor que prepara o mecanismo de atuação. A mudança de tap ocorre

de maneira quase instantânea, no entanto é necessário um tempo de preparação do mecanismo ( $T_m$ ).

Esse motor faz com que o comutador altere a posição do tap, sempre de maneira discreta. Quando a mudança de tap se completa, a temporização do relé é reiniciada, preparando o mecanismo para novas atuações (RANGEL, 2007).

Figura 13 – Diagrama de blocos do OLTC



Fonte: Adaptado de Taylor (1994, p.98).

A partir do momento que o elemento sensor identifica um sinal diferente do sinal de referência, o sinal é medido e, ao atingir o limite da banda morta, ativa-se o temporizador do relé.

De acordo com o diagrama da Figura 13, caso o sinal medido seja inferior ao sinal de referência, ou seja, o nível de tensão da barra controlada for menor do que o especificado, o erro  $e$  atingirá um valor negativo, do contrário será positivo.

A depender do sinal do erro, os sinais de saídas do bloco do relé com temporização ( $b$ ) e do motor para acionamento ( $\Delta n$ ) assumirão os valores dispostos nas tabelas 1 e 2, influenciando no sentido de movimentação do tap.

Tabela 1 – Possíveis valores de saída do bloco do relé com temporização ( $b$ )

$b$	$T_d$	$e$
1	$>t_1$	1
-1	$>t_1$	-1

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 2 – Possíveis valores de saída do bloco do motor para acionamento ( $\Delta n$ )**

$\Delta n$	$T_m$	$b$
1	$>t_2$	1
-1	$>t_2$	-1

Fonte: Autoria própria.

Assim, caso a tensão da barra controlada diminua, o tap do OLTC diminuirá, na tentativa de incrementar a tensão e vice-versa.

### 3.6 Motor de Indução

Máquinas de indução são componentes importantes na análise da estabilidade de tensão por se tratar de uma carga que possui um baixo fator de potência, pois apresenta uma alta demanda de potência reativa. Sendo assim é mais propício à paralisação quando o nível de tensão se encontra em um nível abaixo do esperado (CUTSEM, 1998).

Esse tipo de carga requer torque praticamente constante em todas as velocidades, sendo, do ponto de vista de estabilidade, a carga com maior demanda. Assim as dinâmicas de máquinas de indução estão entre as mais importantes dentre as características de cargas do sistema (CUTSEM, 1998).

Para a modelagem do motor de indução nos estudos de estabilidade de tensão, os transitórios relacionados à tensão no estator podem ser negligenciados. Analisam-se os transitórios elétricos no rotor, envolvendo circuitos equivalentes do rotor e o movimento mecânico do rotor caracterizado pela equação de aceleração correspondente.

Quando existe movimento relativo entre o campo do estator e o campo do rotor, tensões são induzidas nos enrolamentos do rotor. Quando a velocidade do rotor se aproxima da velocidade do campo do estator, as tensões induzidas no rotor tendem a se anularem. Para que se possa desenvolver torque positivo, a velocidade do rotor deve ser menor que a velocidade do campo do estator. A essa diferença de velocidade dá-se o nome de escorregamento, que pode ser equacionado da seguinte maneira:

$$s = \frac{\omega_0 - \frac{d\theta_r}{dt}}{\omega_0} \quad (18)$$

Onde:

- $s$  é o escorregamento;
- $\omega_0$  é a frequência angular nominal; e
- $\frac{d\theta_r}{dt}$  é a velocidade de rotação do rotor em radianos elétricos por segundo.

A equação do movimento do rotor pode ser escrita em função do escorregamento, como mostrado na equação (19):

$$2H \frac{ds}{dt} = T_m(s) - T_e(V, s) \quad (19)$$

Onde  $H$  é chamado de constante de inércia,  $T_m$  o torque mecânico em p.u que depende da velocidade de rotação, logo depende do escorregamento  $s$ , e  $T_e$  é o torque eletromagnético também em p.u.

Logo após a ocorrência de um distúrbio, o escorregamento não pode mudar de valor instantaneamente devido à inércia mecânica. Esse fato causa diminuição no torque elétrico, logo o rotor irá desacelerar, de acordo com a equação (19), aumentando, assim, o consumo de potência ativa até que uma nova condição de equilíbrio seja alcançada (CUTSEM, 1998).

A condição de equilíbrio de torque é a seguinte:

$$T_e(V, s) = T_m(s) \quad (20)$$

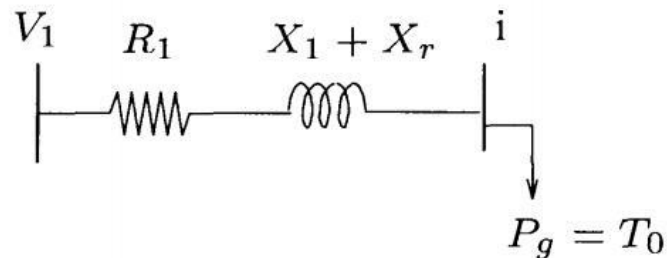
Dependendo da característica de torque mecânico a máquina de indução pode ser classificada de acordo com seu modelo de torque, sendo eles: modelo de torque constante, modelo de torque quadrático e modelo de torque composto.

O modelo de torque constante (*constant torque*) apresenta a seguinte característica:

$$T_m(s) = T_0 \quad (21)$$

Sendo  $T_0$  o torque de saída da máquina de indução. Em regime permanente o modelo de torque constante é equivalente a uma carga com característica de potência constante. Assim, o torque elétrico, em p.u., é equivalente à potência, em p.u., do entreferro ( $P_g$ ). Logo, quando o torque elétrico se aproxima dos valores do torque mecânico, a potência é restaurada.

**Figura 14 – Equivalente de Thévenin do modelo de torque constante**



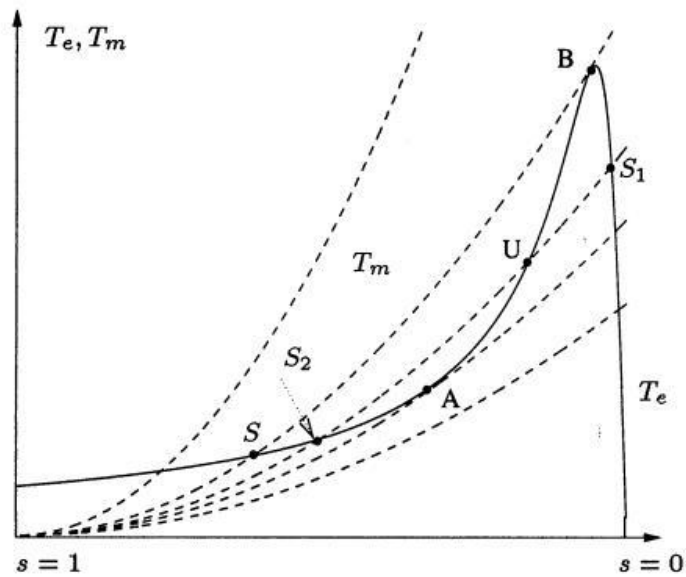
Fonte: Cutsem (1998, p. 105).

O modelo de torque quadrático (*quadratic torque*) tem sua característica apresentada na equação (22):

$$T_m(s) = T_2(1 - s)^2 \quad (22)$$

Esse tipo de modelo tem como propriedade fundamental o número de pontos de intersecções entre o torque mecânico e elétrico, podendo ser um ou três. Para valores de  $T_2$  pequenos um único ponto de intersecção é notado, sendo este próximo à velocidade síncrona. Conforme o valor de  $T_2$  aumenta os pontos de intersecção tornam-se três. Quando há apenas um ponto de intersecção, o ponto de operação é estável. Para o caso de três pontos de intersecção o ponto de operação que se encontra no meio é considerado instável ( $U$ ), enquanto os demais pontos ( $S_1$  e  $S_2$ ) são estáveis.

Figura 15 – Modelo de torque quadrático



Fonte: Cutsem (1998, p. 108).

Por fim, tem-se o modelo de torque composto (*composite torque*), onde se combina os modelos de torque constante, torque quadrático e, há também, uma terceira componente importante durante a partida do motor, o torque estático.

O torque estático (*static torque*) pode ser modelado em função do escorregamento, de acordo com a equação (23):

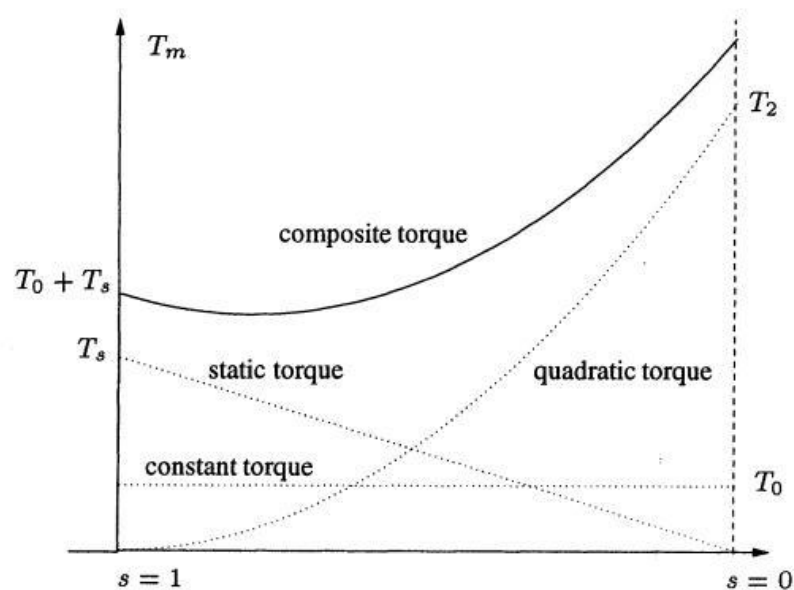
$$T_m(s) = T_s s \quad (23)$$

Somando-se o torque estático aos demais modelos obtêm-se:

$$T_m(s) = T_0 + T_s s + T_2(1 - s)^2 \quad (24)$$

A Figura 16, retirada de Cutsem (1998, p. 110), mostra a característica do modelo de torque composto, ilustrando a influência dos demais torques. Neste trabalho será utilizado o modelo de torque constantes nas simulações realizadas.

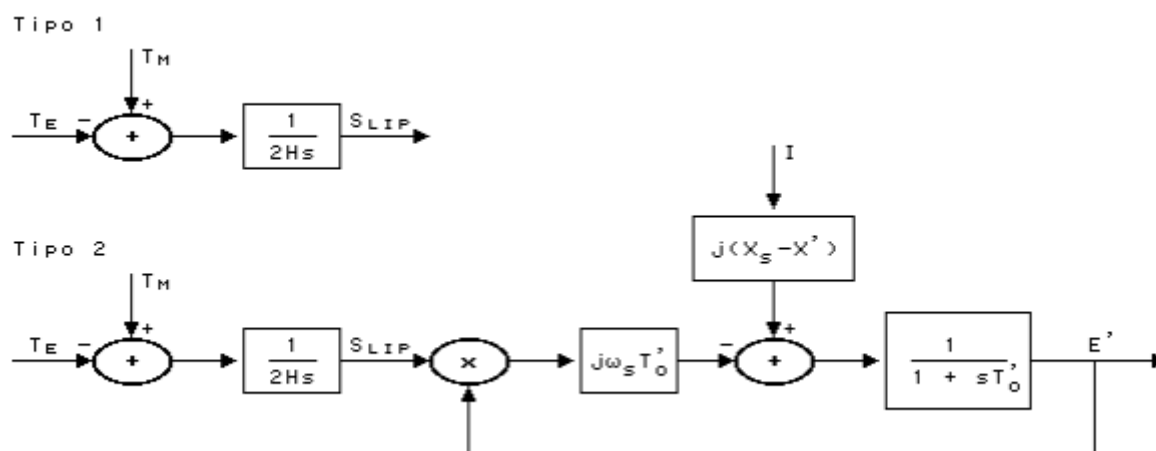
Figura 16 – Características do torque composto



Fonte: Cutsem (1998, p. 110).

Para a realização deste trabalho, será utilizado o modelo dinâmico fornecido pelo *software* ANATEM, apresentado na Figura 17, retirada CEPEL (2018, p. 193). O ANATEM apresenta dois tipos de representação: tipo 1, que se trata da representação de um motor de gaiola simples sem efeito transitório no rotor, e o tipo 2, que representa o motor de gaiola simples com efeito transitório no rotor. Neste trabalho para a realização da análise dinâmica será utilizado a representação do tipo 2.

Figura 17 – Formato de dados do motor de indução



Fonte: CEPEL (2018, P. 193).

Onde:

- $H$  é a constante de inércia da máquina;
- $T_M$  é o torque mecânico em p.u.;
- $T_E$  é o torque elétrico em p.u.;
- $\omega_s$  é a velocidade síncrona em rad/seg;
- $Slip$  é o escorregamento do rotor;
- $X_s$  é a reatância do enrolamento do estator;
- $X'$  é a reatância transitória do enrolamento do estator;
- $E'$  é a tensão transitória do estator
- $I$  é a corrente no estator; e
- $T_0'$  é a constante de tempo do rotor a circuito aberto.

## 4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados das simulações referentes aos estudos e análises do sistema de potência teste variando-se o carregamento do sistema e as características de seus elementos, sobretudo os modelos dinâmicos do OLTC e OXL, combinados com os modelos estáticos e dinâmicos de cargas, com a finalidade de verificar suas influências na estabilidade de tensão de longo prazo.

Inicialmente foram executados fluxos de cargas para validar o sistema e obter seu ponto de operação inicial para cada condição sob análise. Uma vez obtidos a convergência dos fluxos de potência do sistema, foram realizados incrementos de carga, por meio de simulações dinâmicas, a fim de se obter as curvas PV dos barramentos do sistema e, eventualmente, observar seu colapso. O sistema em análise não foi dividido em áreas de controle, assim, o incremento de carga foi realizado na área total do sistema.

Todas as simulações foram executadas com auxílio dos *softwares* ANAREDE (CEPEL, 2017) e ANATEM (CEPEL, 2018), que são ferramentas computacionais utilizadas por diversos agentes do setor elétrico para realização de estudos de expansão e operação do sistema elétrico brasileiro.

### 4.1 Sistema Teste

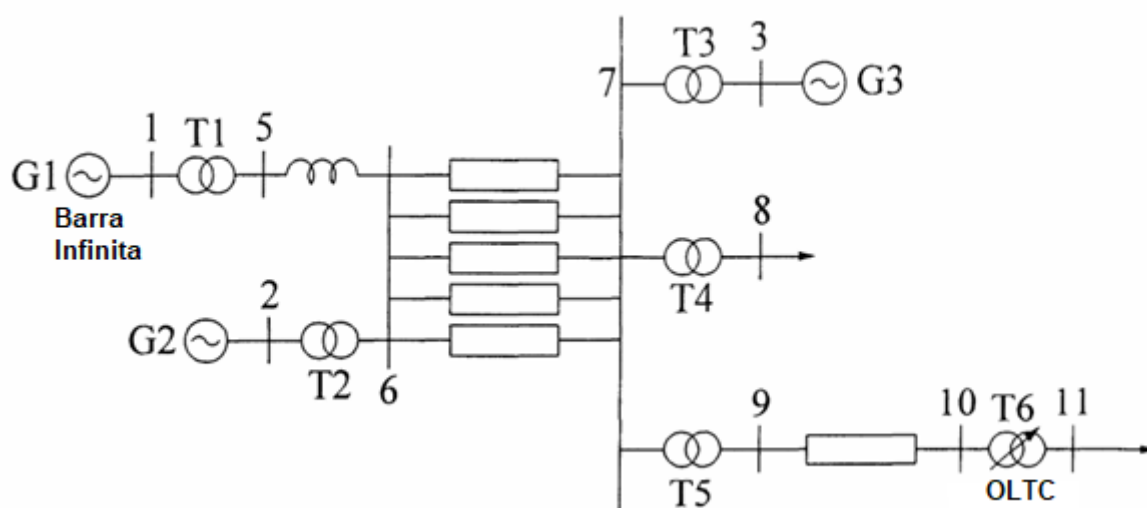
O sistema teste estudado é composto por dez barras, das quais três barras são de geração e duas barras são de cargas. Dentre os geradores, dois deles são modelados como geradores convencionais de polos lisos, e estão conectados nas barras 2 e 3 (G2 e G3). Ambos os geradores G2 e G3 são equipados com limitadores de sobre-excitação (OXL) atuando em conjunto com reguladores automáticos de tensão (AVR). A barra 1, por sua vez, foi modelada como sendo a barra de referência do sistema, sendo considerada uma barra infinita (sistema de enorme porte), sendo responsável por suprir o incremento de potência ativa do sistema.

Tabela 3 – Cenário base de geração do sistema

Barramento	P (MW)	V (p.u.)
G1	3981	0,980
G2	1736	0,964
G3	1154	1,040

Fonte: Autoria própria.

Figura 18 – Sistema teste estudado



Fonte: Adaptado de Kundur (1994, p. 980).

Nas barras 8 e 11 estão conectadas as cargas do sistema. A carga da barra 8 foi modelada como sendo uma carga de potência constante ( $P_{cte}$ ), enquanto a carga da barra 11 foi modelada como sendo 50%  $I_{cte}$  (corrente constante) e 50%  $Z_{cte}$  (impedância constante), tanto para a componente de potência ativa, quanto para a de potência reativa. Por fim, o sistema é composto também de seis transformadores, sendo o transformador conectado no trecho entre as barras 10 e 11 (T6), um OLTC, com controle de tensão sobre a barra 11. Os demais transformadores possuem tap fixo. Os dados de modelagem completos do sistema, constam no Anexo 1 deste trabalho.

Para fins de estudos, foram verificados dois cenários de carregamento do sistema, o cenário 1 e o cenário 2. As informações de carregamento podem ser verificadas nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Cenário 1 de carregamento do sistema

Barramento	P (MW)	Q (MVAr)
8	3271	1015
11	3384	971
Total da área	6655	1986

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5 – Cenário 2 de carregamento do sistema

Barramento	P (MW)	Q (MVAr)
8	3345	1038
11	3460	993
Total da área	6805	2031

Fonte: Autoria própria.

## 4.2 Resultados do Fluxo de Potência

Para iniciar os estudos do sistema, foi definido o ponto de operação inicial do sistema, via fluxos de potência realizados com auxílio do *software* ANAREDE. Os resultados obtidos são apresentados nas tabelas 6 e 7.

O transformador OLTC T6, alocado entre as barras 10 e 11, controla a tensão da barra 11, mantendo-a em 0,950 p.u. enquanto o tap permanecer dentro da faixa de 0,9 p.u. e 1,1 p.u.

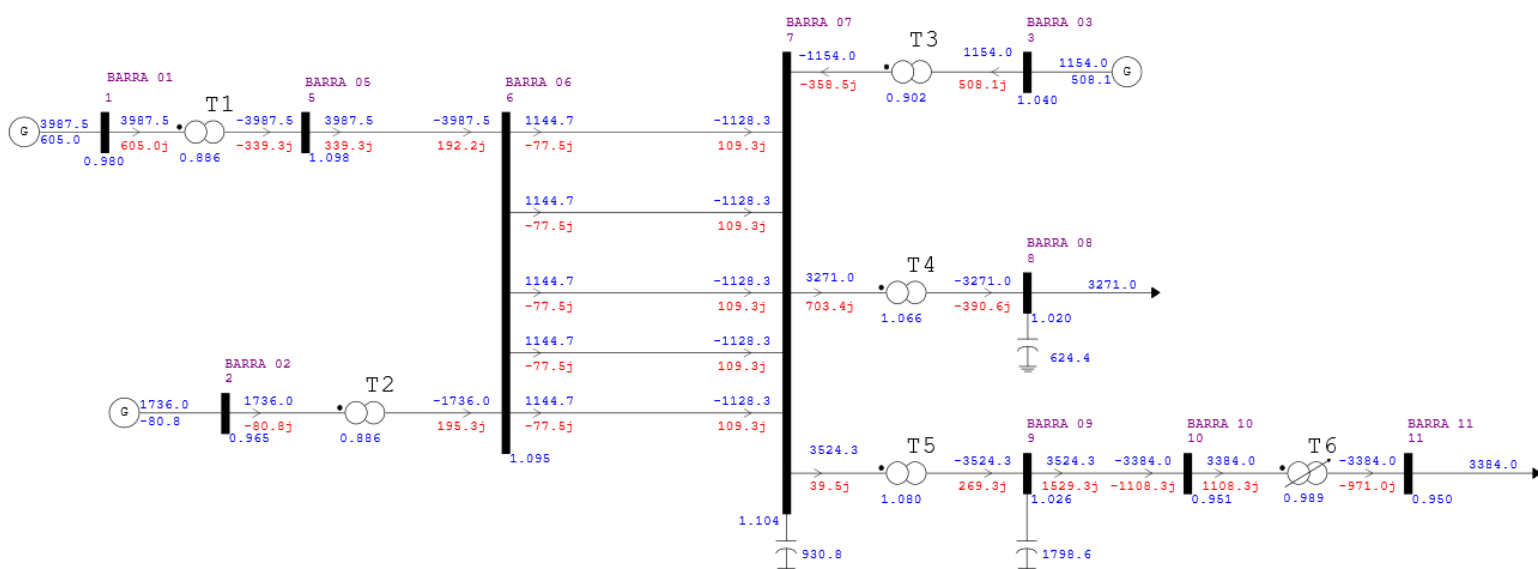
Tabela 6 – Resultados do fluxo de potência para o cenário 1

Barra	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (°)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVAr)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVAr)
1	Referência	0,980	0	3988	605	-	-
2	PV	0,965	-7,6	1736	-80,8	-	-
3	PV	1,040	-21	1154	508,1	-	-
5	PQ	1,098	-3,8	-	-	-	-
6	PQ	1,095	-11	-	-	-	-

7	PQ	1,104	-27	-	-	-	-
8	PQ	1,02	-32	-	-	3271	1015
9	PQ	1,026	-32	-	-	-	-
10	PQ	0,951	-37	-	-	-	-
11	PQ	0,950	-40	-	-	3384	971

Fonte: Autoria Própria.

Figura 19 – Diagrama unifilar do sistema no cenário 1 de carga



Fonte: Autoria própria.

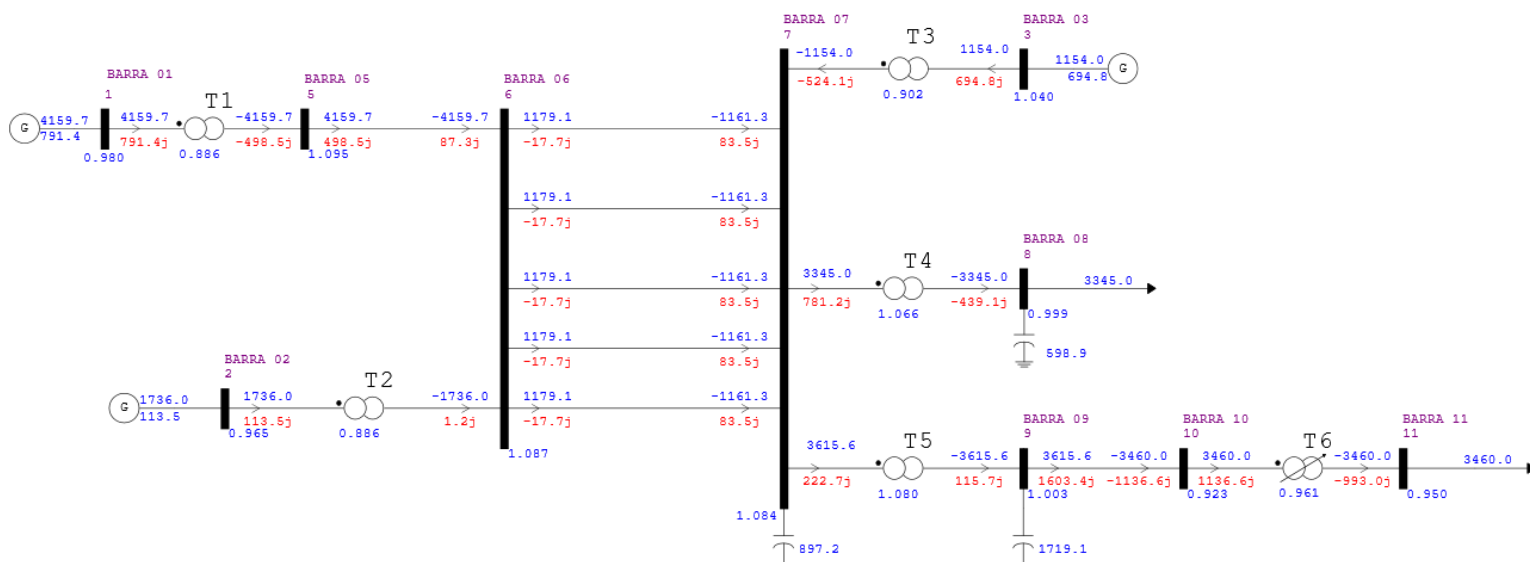
Tabela 7 - Resultados do fluxo de potência para o cenário 2

Barra	Tipo	Tensão (p.u.)	Ângulo (°)	Geração Ativa (MW)	Geração Reativa (MVar)	Carga Ativa (MW)	Carga Reativa (MVar)
1	Referência	0,980	0	4160	791,4	-	-
2	PV	0,965	-8,2	1736	113,5	-	-
3	PV	1,040	-22	1154	694,8	-	-
5	PQ	1,095	-3,9	-	-	-	-
6	PQ	1,087	-12	-	-	-	-

7	PQ	1,084	-29	-	-	-	-
8	PQ	0,999	-34	-	-	3345	1038
9	PQ	1,003	-34	-	-	-	-
10	PQ	0,923	-40	-	-	-	-
11	PQ	0,950	-42	-	-	3460	993

Fonte: Autoria própria.

Figura 20 - Diagrama unifilar do sistema no cenário 2 de carga



Fonte: Autoria própria.

### 4.3 Incrementos de Carga no Sistema

Uma vez validado o sistema e obtidos os pontos de operação iniciais para cada cenário de carregamento, sucessivos incrementos de cargas foram realizados para obtenção e análise das curvas PV do sistema.

As simulações foram executadas com um tempo total de 1200 segundos com incremento de carga iniciando em 1 segundo e finalizando em 1000 segundos, sendo o mesmo aplicado a cada 1 segundo.

A fim de avaliar os impactos dos diferentes componentes do sistema, foram considerados cinco casos:

- Caso 1: sistema sem dinâmica;
- Caso 2: sistema com AVR;
- Caso 3: sistema com AVR e OXL;
- Caso 4: sistema com AVR, OXL e OLTC;
- Caso 5: sistema com carga dinâmica.

O caso 1 desconsidera a dinâmica dos elementos do sistema e os geradores são representados por barra infinita, reproduzindo pontos de operação que nem sempre são coerentes com os sistemas atuais. Já o caso 2, é modelado com geradores não-ideais controlados apenas pelo AVR com altos ganhos e limites de saturação.

Os casos 3 e 4 representam casos reais de operação do sistema, com o OXL sempre em operação, enquanto o OLTC pode estar fora de serviço, ou seja, com a capacidade de comutar seu tap bloqueada.

Por fim, no caso 5, a carga da barra 8 foi substituída por um grupo de motores de indução, representando a carga dinâmica. Além da carga dinâmica, o AVR, OXL e OLTC também estão presentes no sistema.

Para observar o colapso do sistema, em cada caso foram aplicados diferentes valores de incrementos de carga e, em seguida construídas as respectivas curvas PV. O incremento de carga ocorreu de maneira homogênea no sistema, ou seja, as cargas nas barras 8 e 11 incrementaram de maneira igual.

Para o caso 5, a carga da barra 8, por se tratar de uma carga diferente dos demais casos, foi incrementada variando-se a velocidade do torque do motor de indução. Com a finalidade de observar os efeitos da adição da carga dinâmica no sistema, este caso foi analisado apenas no cenário de maior carregamento inicial (cenário 2).

Tabela 8 – Incremento de carga para cada caso e cenário

Caso	Cenário 1		Cenário 2	
	MW/s	%	MW/s	%
1	3,33	50%	3,00	44%
2	2,66	40%	2,45	36%
3	1,43	21,5%	1,16	17%
4	1,02	15%	0,85	12,5%
5	-	-	0,74	12,5%

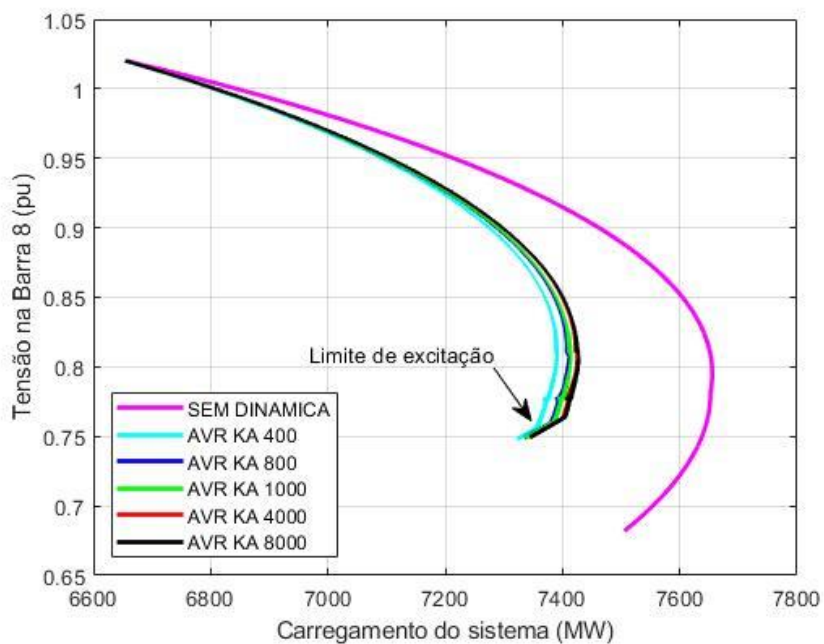
Fonte: Autoria própria

#### 4.3.1 Casos 1 e 2

Os casos 1 e 2 foram analisados devido a aproximação com a curva PV estática do sistema, sendo casos de referência para os estudos dos demais casos.

Durante as simulações, foi observado que, as curvas PV dos casos 1 e 2 se aproximam quanto maior for o ganho ( $K_A$ ) modelado para o AVR, até que os limites de excitação da malha de controle sejam atingidos. Essa constatação pode ser verificada na Figura 21. Para efeitos de análise do sistema do caso 2, o ganho considerado na modelagem foi de 400.

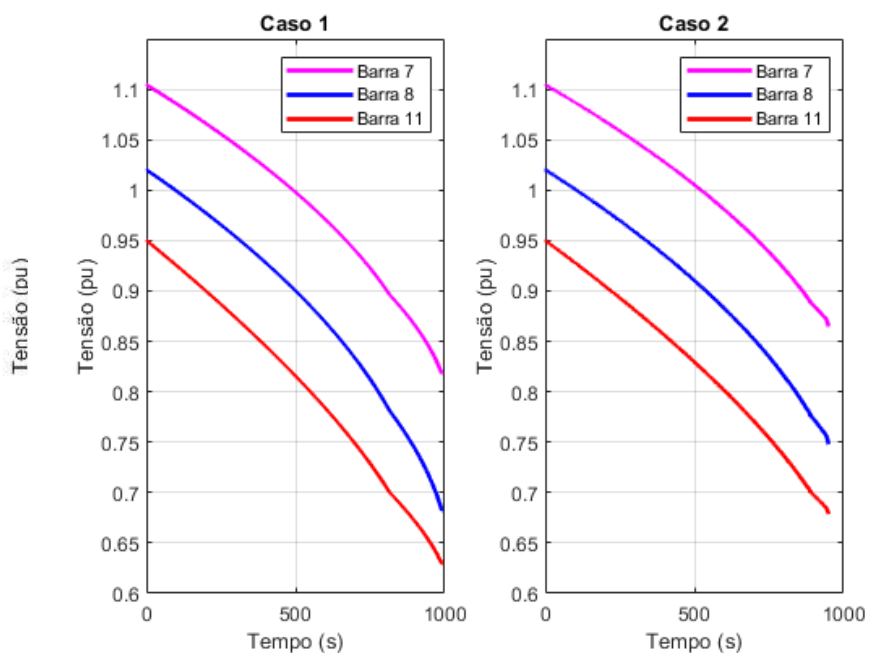
Figura 21 – Semelhanças entre as curvas PV dos casos 1 e 2



Fonte: Autoria própria.

À medida que ocorre o aumento da carga e a demanda por reativos no sistema aumenta, as tensões nas barras diminuem gradativamente. Para suprir o aumento da demanda, as unidades geradoras injetam mais potência reativa.

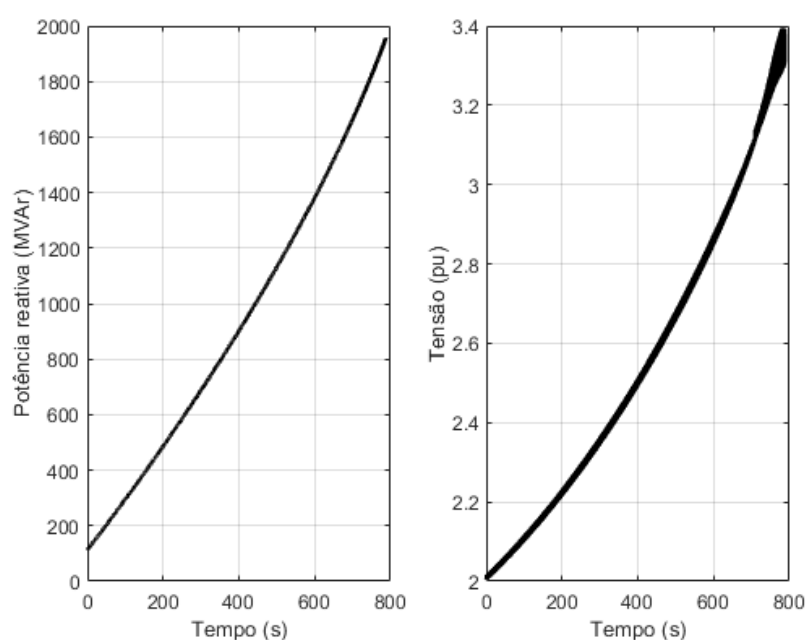
Figura 22 – Perfil de tensão das barras 7, 8 e 11 no cenário 1



Fonte: Autoria própria.

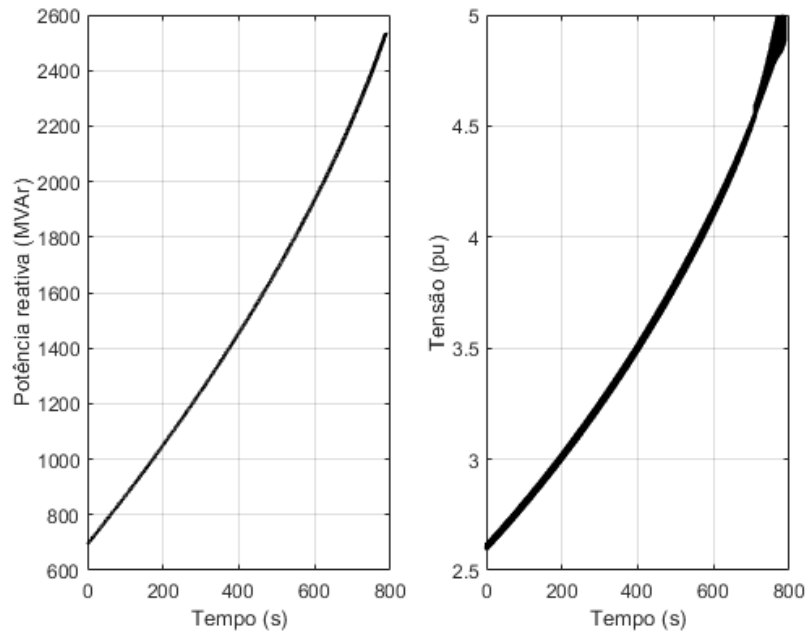
Conforme a tensão nas barras diminui, para o caso 2, o AVR atua na tentativa de restaurar a tensão dos geradores G2 e G3, aumentando a excitação de campo e, por consequência, incrementando a injeção de potência reativa no sistema. No entanto, por volta de 770 segundos, o AVR da máquina G3 atinge seu limite máximo. Com o intuito de comparar um modelo de AVR ideal com um modelo de AVR real, este limite se encontra acima da realidade, sendo seu valor 5 p.u., conforme apresentado na Figura 24.

**Figura 23 – Potência reativa e excitação de campo do G2 no cenário 2**



Fonte: Autoria própria.

Figura 24 - Potência reativa e excitação de campo do G3 no cenário 2



Fonte: Autoria própria.

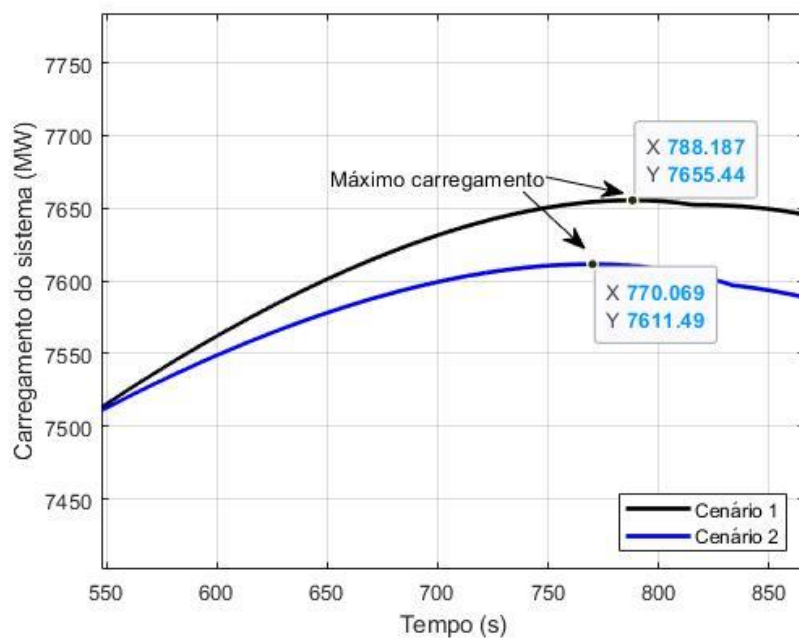
Nas tabelas 9 e 10 são apresentadas os tempos de simulação onde  $T_{sim}$  corresponde ao tempo de simulação e  $T_{max}$  ao instante em que o sistema atinge seu carregamento máximo. Em ambos os casos, a degradação acentuada do perfil de tensão das barras do sistema o levou ao colapso. A simulação em ambos os casos terminou antes do tempo total de simulação.

Tabela 9 – Tempos de simulação do caso 1

Cenário	$T_{sim}$ (s)	$T_{max}$ (s)
1	990,99	788,19
2	999,99	770,07

Fonte: Autoria própria.

Figura 25 – Carregamento vs tempo do caso 1



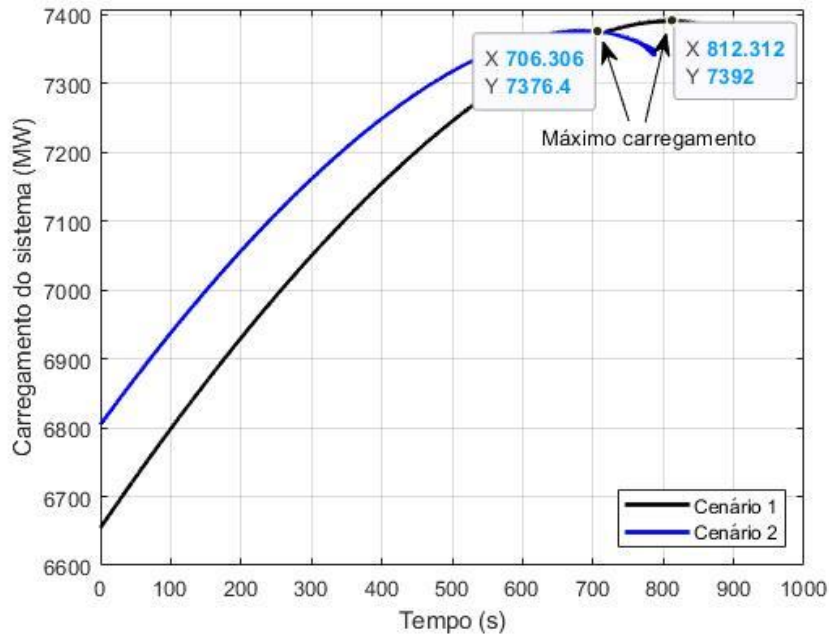
Fonte: Autoria própria.

Tabela 10 – Tempos de simulação do caso 2

Cenário	$T_{sim}$ (s)	$T_{max}$ (s)
1	949,90	812,31
2	787,70	706,31

Fonte: Autoria própria.

Figura 26 – Carregamento vs tempo do caso 2

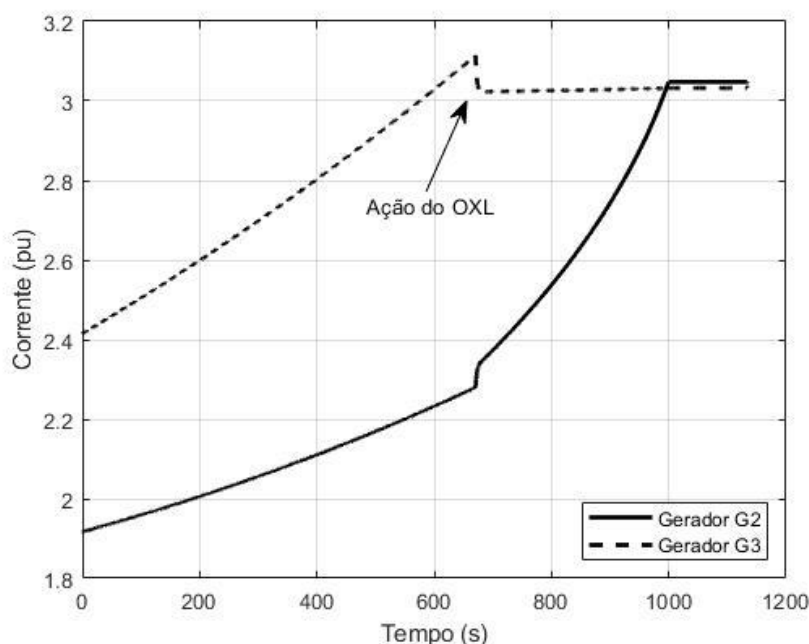


Fonte: Autoria própria.

#### 4.3.2 Caso 3

Para o caso 3, quando os níveis de tensão das barras caem, o AVR atua no sentido de restaurar a tensão nos barramentos dos geradores G2 e G3. Sua atuação, faz com que a excitação de campo dos geradores aumentem, incrementando por consequência a corrente de campo das máquinas. Quando a corrente de campo ultrapassa o valor de tempo inverso definido ( $I_{fdmax1}$ ) o OXL atua, enviando um sinal que é subtraído da tensão de referência do AVR, levando a excitação da máquina a diminuir, reduzindo a corrente de campo e, limitando assim o fornecimento de potência reativa.

Figura 27 – Correntes de campo dos geradores G2 e G3 no cenário 1



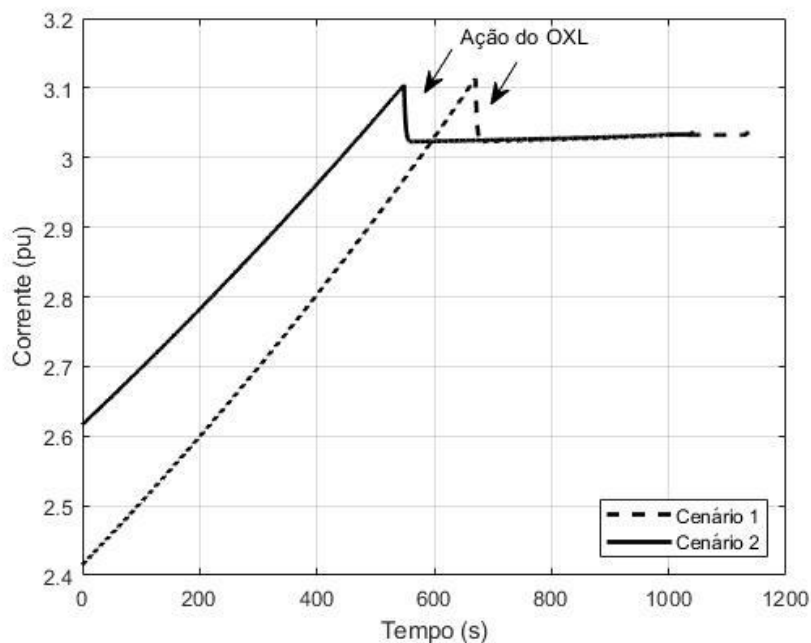
Fonte: Autoria própria.

Em ambos os cenários de carga, a atuação do OXL do gerador G3 reduz sua corrente de campo e, conseqüentemente, reduz o fornecimento de potência reativa. Diante disso, os geradores G1 e G2 incrementam a injeção de potência reativa, o que leva ao incremento da corrente de campo dos mesmos. No cenário 1, o sistema atinge seu carregamento máximo por volta de 670 segundos devido a atuação do OXL, enquanto no cenário 2, isso ocorre em 548 segundos.

Para este caso, em ambos os cenários, finalizado o período de incremento de carga, as barras do sistema estão com seus níveis de tensão muito abaixo, quando comparado com as tensões no instante  $t = 0$ , a demanda por potência reativa está acima da capacidade de fornecimento do sistema, o que leva ao colapso e a simulação encerra-se antes do tempo previsto.

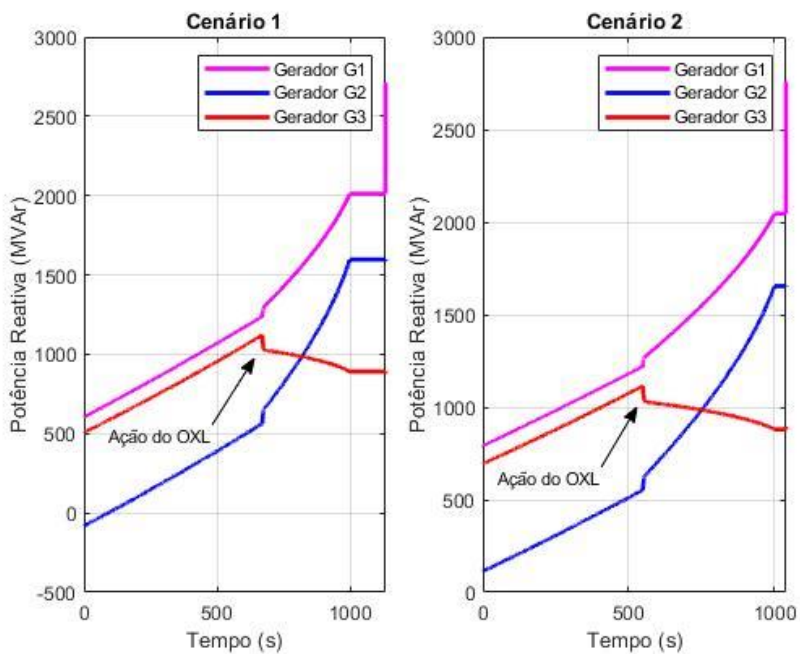
Assim, é possível analisar pelas curvas das Figuras 31 e 32 que o OXL contribui com o fenômeno de instabilidade de tensão no sistema, modificando de maneira significativa a forma da curva PV, reduzindo o máximo carregamento do sistema.

Figura 28 – Correntes de campos do gerador G3 em ambos os cenários



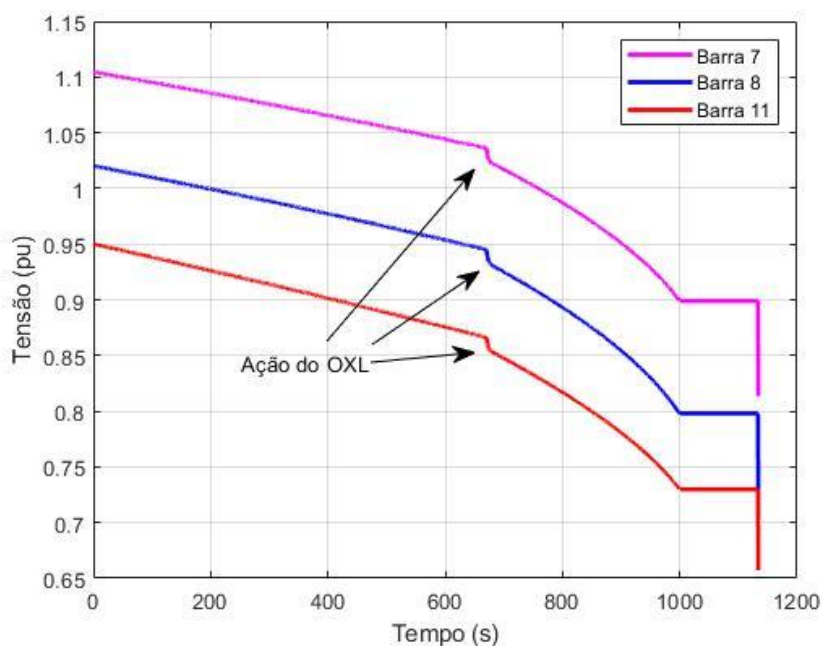
Fonte: Autoria própria.

Figura 29 – Potência reativa dos geradores em ambos os cenários



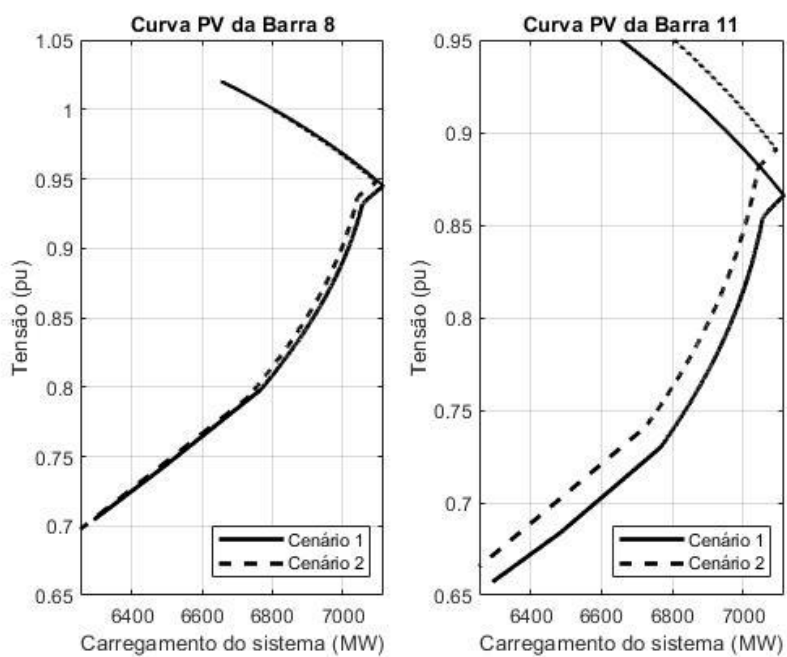
Fonte: Autoria própria.

Figura 30 – Tensão nas barras 7, 8 e 11 no cenário 2



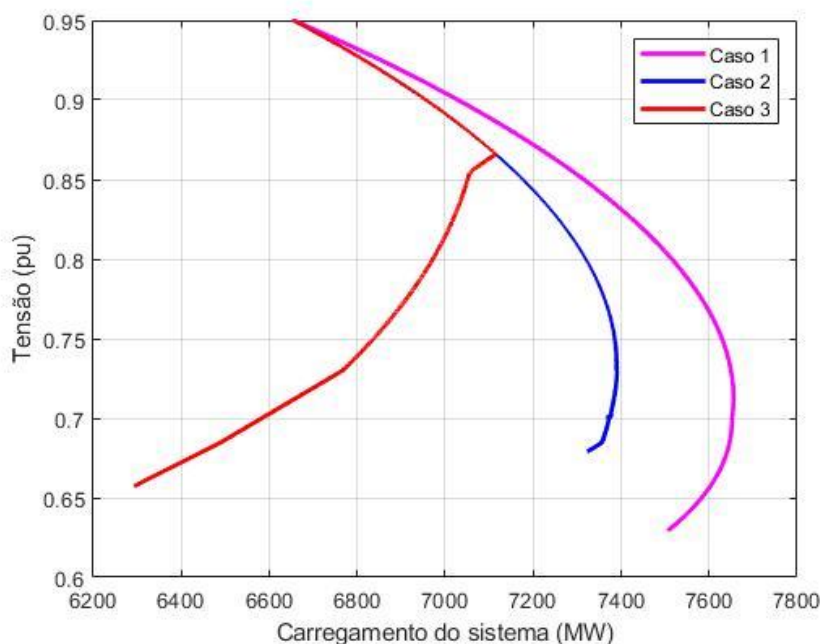
Fonte: Autoria própria.

Figura 31 – Curva PV das barras com carga



Fonte: Autoria própria.

Figura 32 – Curva PV da barra 11 dos casos 1, 2 e 3 no cenário 1



Fonte: Autoria própria.

#### 4.3.3 Caso 4

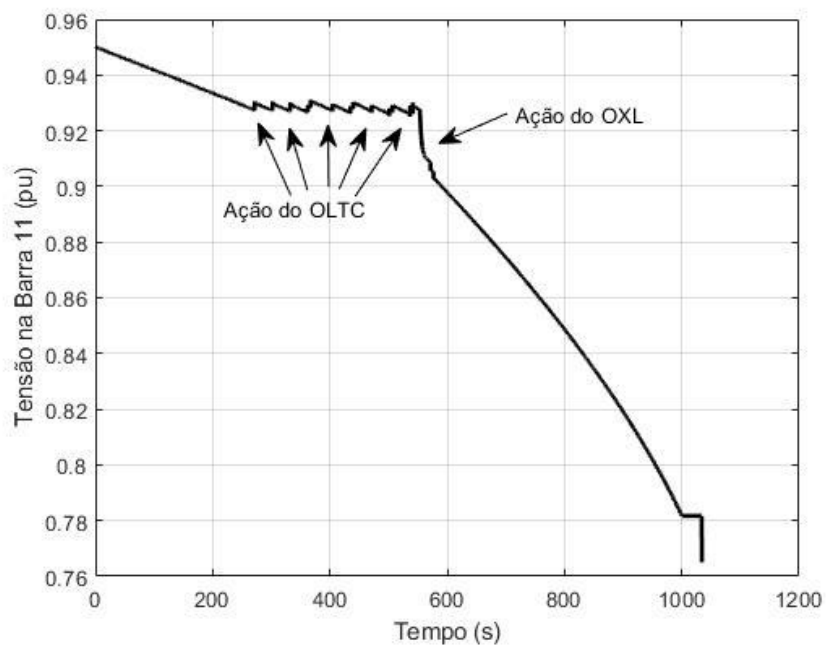
Quando o OLTC é adicionado ao sistema, conforme o carregamento aumenta e os níveis de tensão das barras vão diminuindo, o mesmo atua diminuindo o tap, com a finalidade de elevar a tensão da barra 11 para a tensão de referência.

À medida que se transcorre a comutação de tap, o OLTC aumenta a capacidade de absorção de potência reativa pelo sistema. Devido a maior demanda de reativos, a corrente de campo das unidades geradores aumenta, enquanto a tensão nas outras barras diminui.

Dentre todos os casos, o caso 4 é o que atinge o ponto de carregamento máximo mais rápido. Durante as simulações no cenário 1, o ponto de carga máxima é atingido em 542 segundos, enquanto que no cenário 2 foi de 453 segundos. Isso ocorre justamente devido a ação do OLTC e, por isso, conforme consta na Figura 34, a atuação do OXL acontece mais cedo.

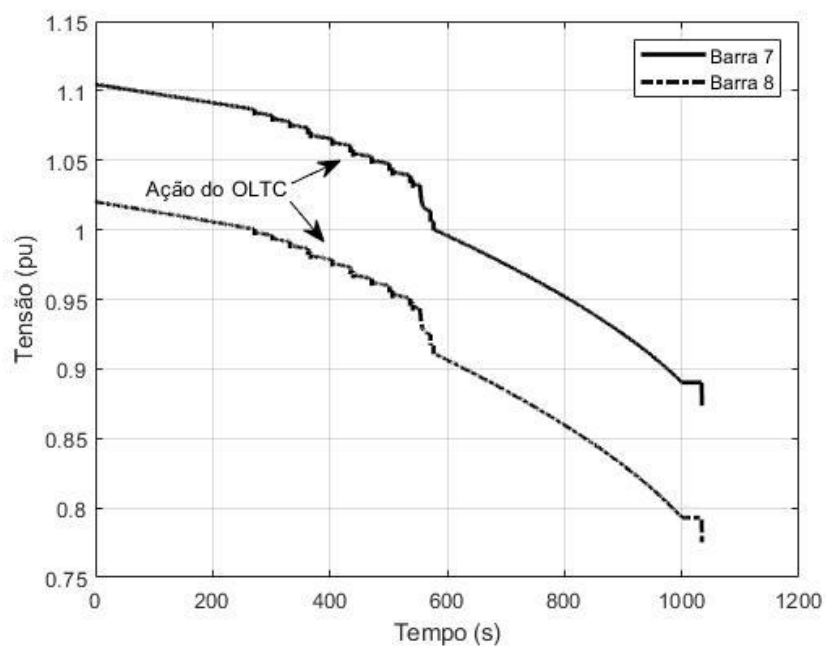
Assim, mesmo que atue no sentido de manter a tensão da barra controlada dentro da faixa estabelecida, o OLTC promove a queda de tensão no sistema como um todo, acelerando a instabilidade de tensão e, eventualmente, ocasionando o colapso.

Figura 33 – Tensão na barra 11 no cenário 1



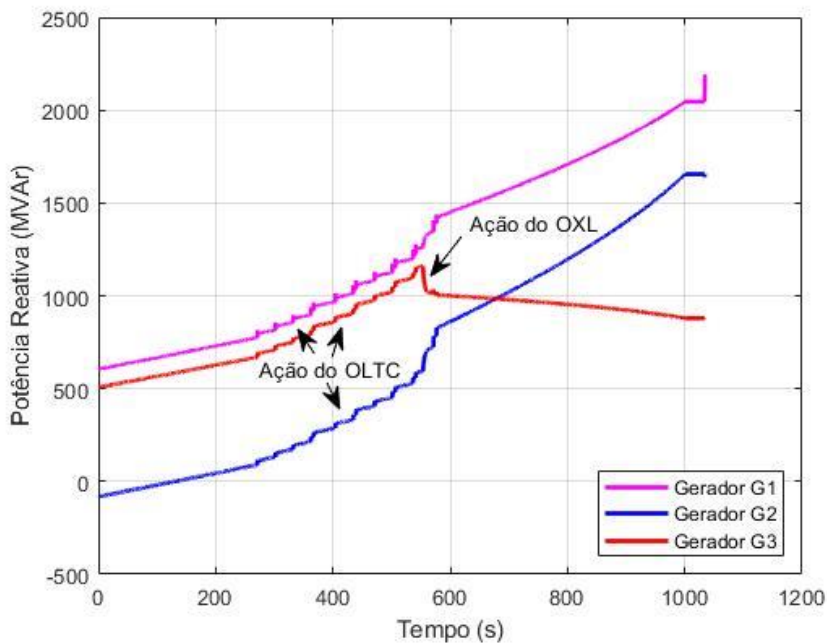
Fonte: Autoria própria.

Figura 34 – Tensão nas barras 7 e 8 no cenário 1



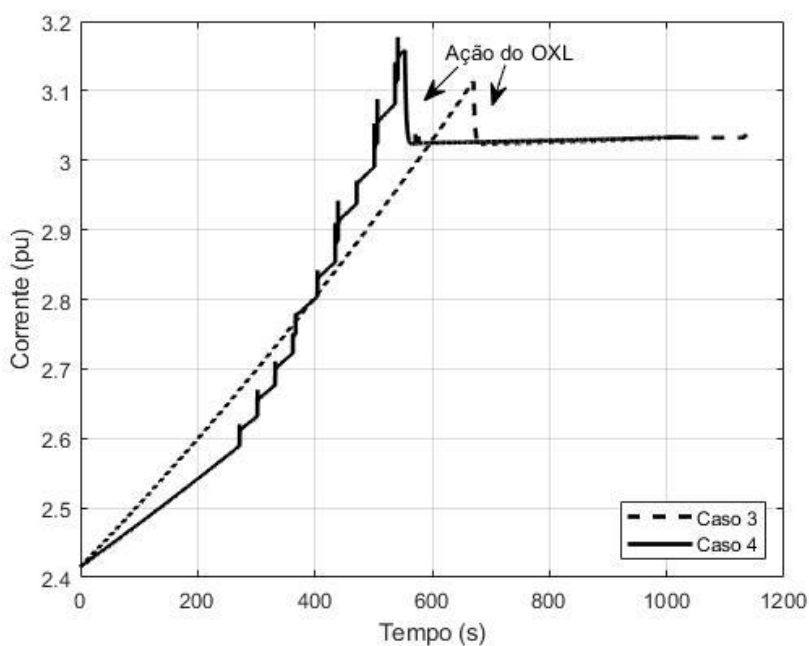
Fonte: Autoria própria.

Figura 35 – Potência reativa dos geradores no cenário 1



Fonte: Autoria própria.

Figura 36 – Comparação da atuação do OXL nos casos 3 e 4 no cenário 1



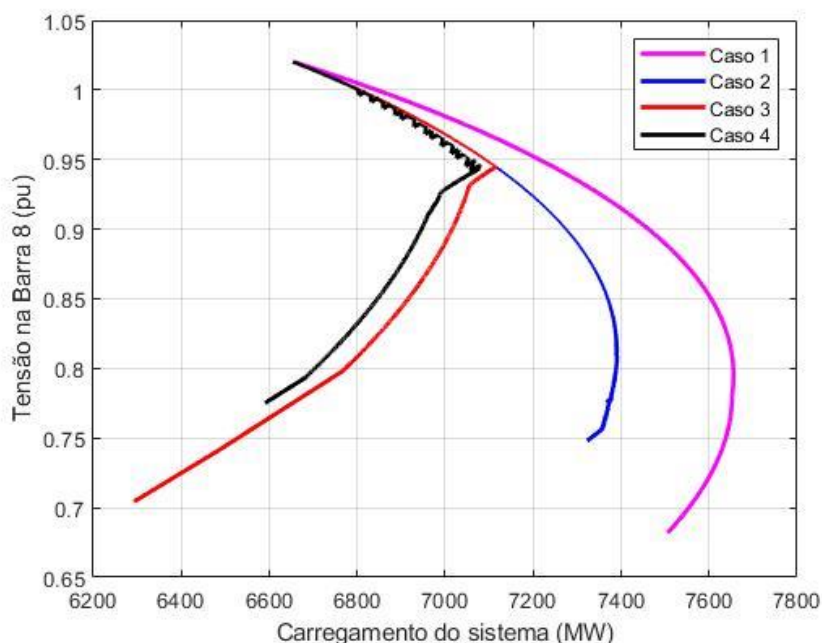
Fonte: Autoria própria.

Tal fato pode ser comprovado analisando as Figuras 37 e 38, onde são apresentados as curvas PV das barras 8 e 11 de todos os casos estudados até aqui. É possível notar como a presença do OLTC no sistema altera o formato da curva.

Na Figura 37, a ação do OLTC faz com que a tensão da barra 8 se degrade rapidamente, quando comparado com os demais casos, conforme ocorrem as mudanças de tap. Além disso, as atuações do OLTC fazem com que o ponto de máximo carregamento (“nariz” da curva) seja alcançado mais rapidamente do que nos demais casos.

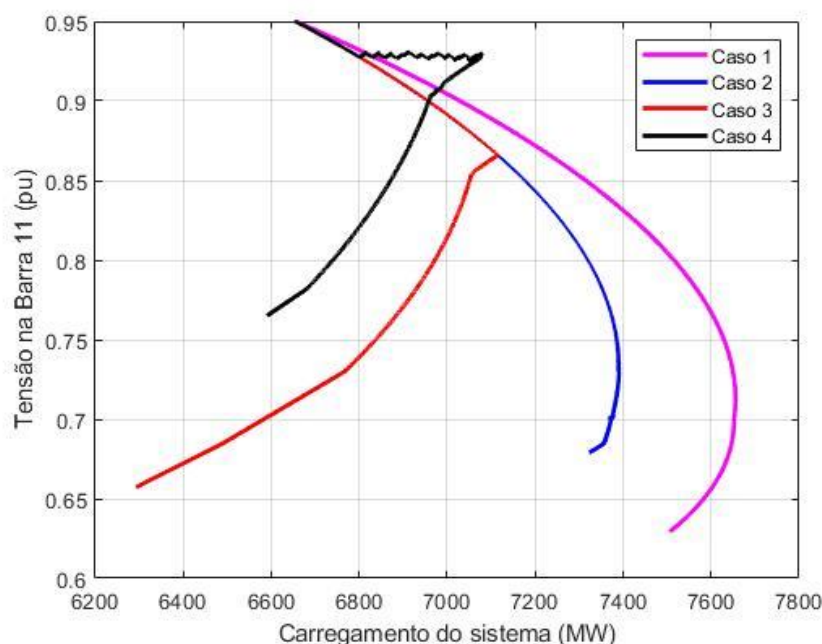
Além dos efeitos supracitados, na Figura 38 fica evidente a acentuada degradação do perfil de tensão da barra 11. Assim, é possível notar que quando o OLTC está alocado próximo a carga, o mesmo contribui no sentido de acelerar a queda de tensão do barramento (CORSI, 2017).

**Figura 37 – Curva PV da barra 8 no cenário 1**



**Fonte: Autoria própria.**

Figura 38 – Curva PV da barra 11 no cenário 1



Fonte: Autoria própria.

#### 4.3.4 Caso 5

Nesta análise foi inserido um motor de indução na barra 8, sendo este responsável por 100% da carga ativa desta barra. A carga da barra 11 permaneceu como modelada anteriormente. Aplicou-se então o mesmo incremento de carga do caso 4, no cenário 2 de carregamento.

Com o acréscimo do motor, uma carga altamente reativa, a demanda por reativos do sistema aumentou substancialmente. Com isso, a tensão nas barras tendem a diminuir.

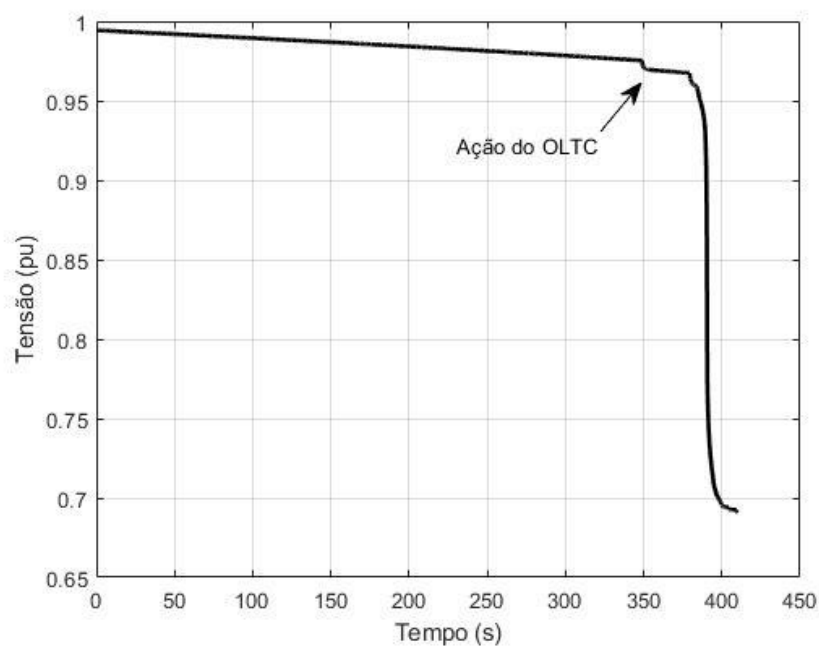
No intuito de controlar a tensão da barra 11 e restabelecê-la para o nível de referência, o OLTC tem sua primeira atuação por volta dos 350 segundos.

Novamente o OLTC comuta seu tap, o sistema é sobrecarregado ainda mais, uma vez que sua ação aumenta o consumo de reativos. Isso faz com que o perfil de tensão das barras do sistema seja degradado.

A queda acentuada de tensão faz com que, por volta de 390 segundos, o motor reduza sua velocidade de rotação, que cai aos poucos, o que resulta na diminuição da potência ativa absorvida pela máquina. Contudo, a potência reativa absorvida pelo mesmo incrementa de maneira abrupta.

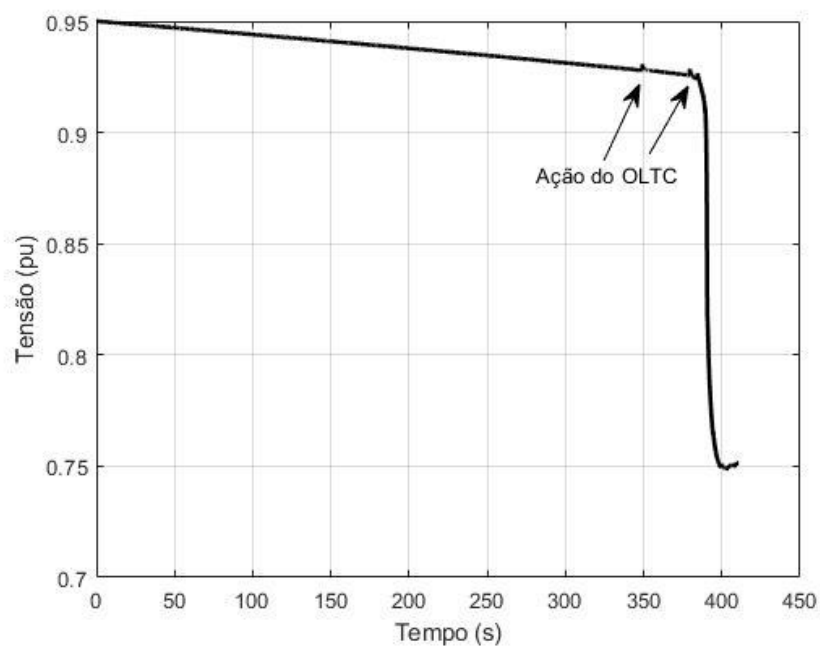
O elevado consumo de reativos, leva os geradores a incrementarem a injeção de potência reativa, elevando assim suas correntes de campo. Esse aumento, faz com que o OXL instalado no gerador G3 atue, na tentativa de reduzir a excitação da máquina. Essa ação faz com que o perfil de tensão das barras do sistema continuem diminuindo e, assim, o sistema entra em colapso, finalizando a simulação antes do tempo previsto.

**Figura 39 – Tensão na barra 8**



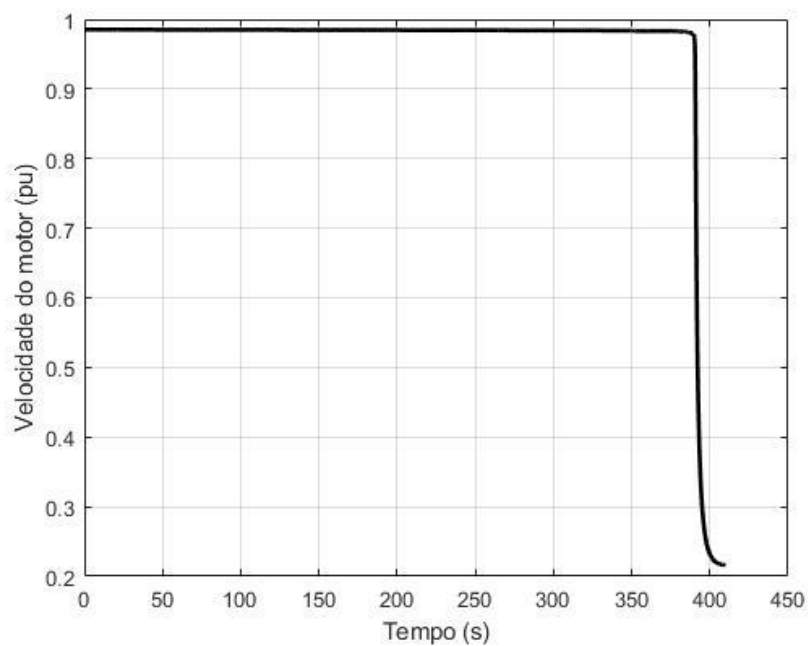
Fonte: Autoria própria.

Figura 40 – Tensão na barra 11

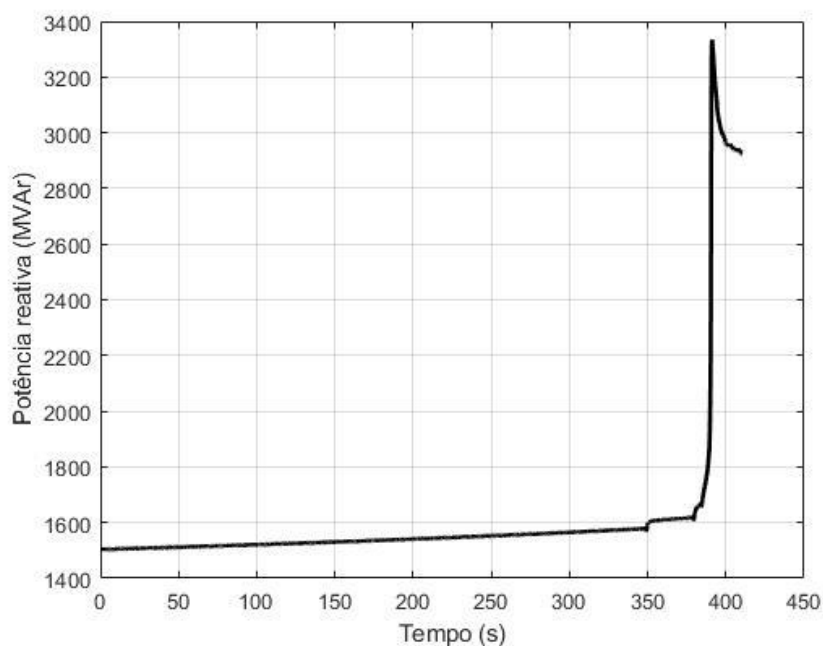


Fonte: Autoria própria.

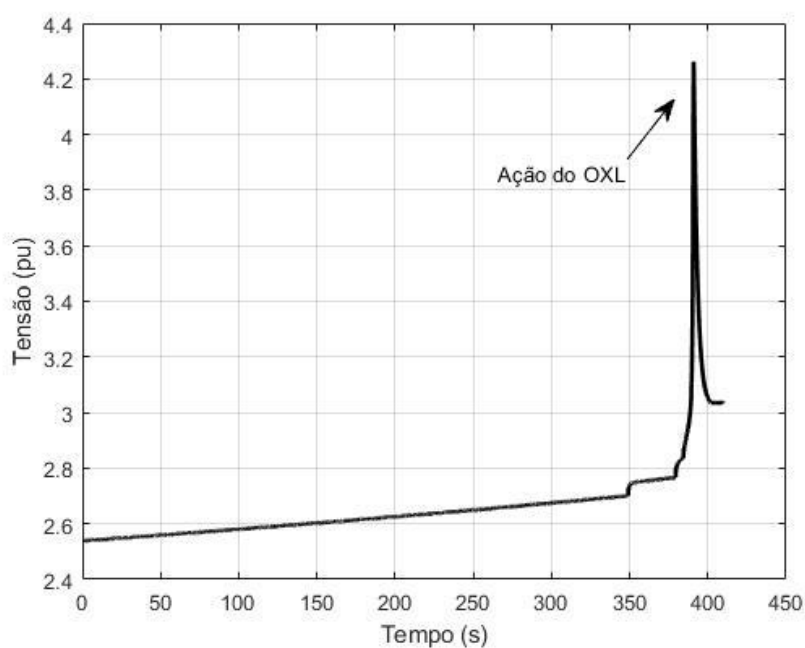
Figura 41 – Velocidade do motor



Fonte: Autoria própria.

**Figura 42 – Potência reativa absorvida pelo motor**

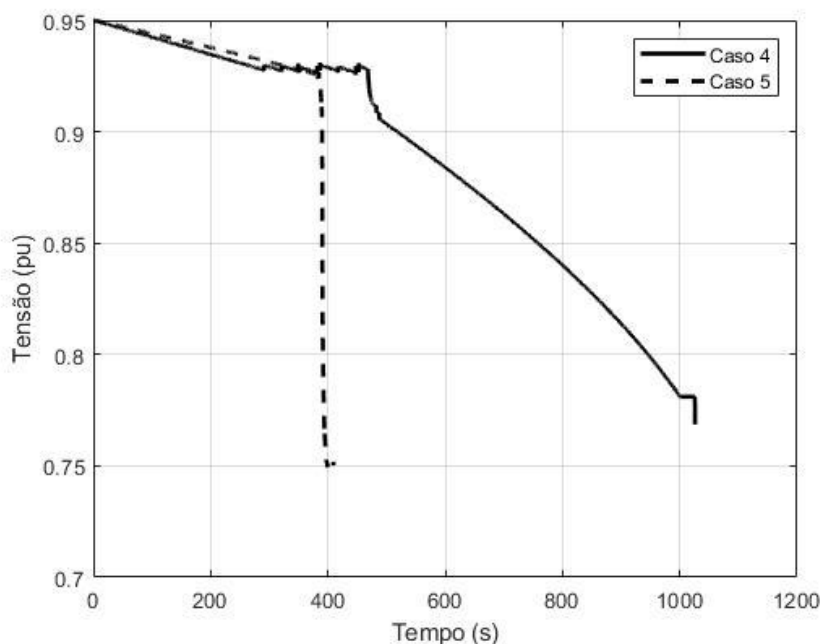
Fonte: Autoria própria.

**Figura 43 – Corrente de campo do gerador G3**

Fonte: Autoria própria.

Dessa forma, é possível notar como a adição de uma carga dinâmica e reativa acelera o colapso do sistema. Na Figura 44 está o comparativo da tensão na barra 11, para os casos 4 e 5, no cenário 2 de carregamento.

**Figura 44 – Comparativo da tensão na barra 11 para o cenário 2**



Fonte: Autoria própria.

#### 4.3.5 Conclusões dos Estudos Realizados

Analisando as curvas PVs dos casos estudados, conforme apresentado na Figura 45, é possível notar a influência que os equipamentos com dinâmica apresentam na estabilidade de tensão do sistema.

Os resultados mostram que o sistema estudado nos casos 1 e 2 não representam a dinâmica real do sistema e necessitam de um incremento maior de carga para atingir os pontos máximos de carregamento. Já nos demais casos, a presença de equipamentos de controle e de diferentes tipos de cargas impactam diretamente no formato da curva e seu carregamento máximo.

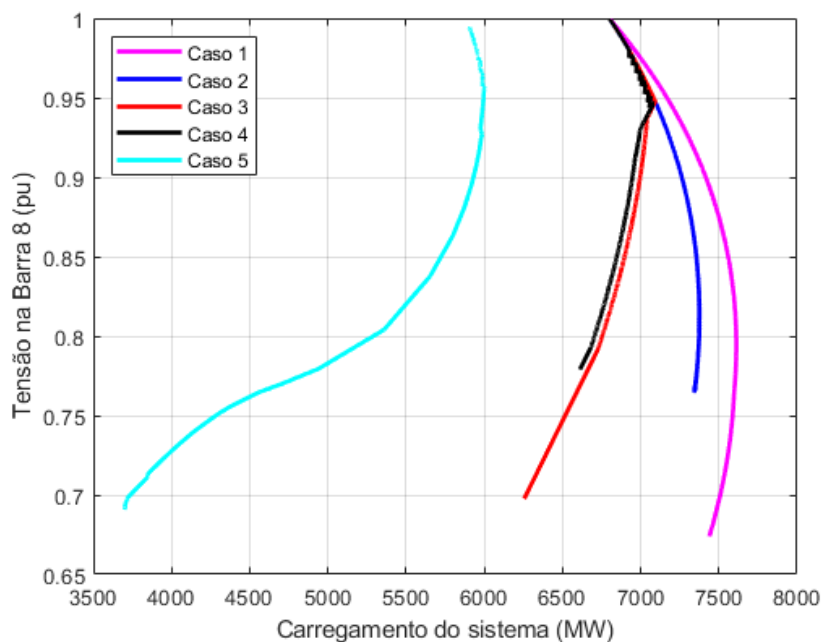
No caso 3, conforme ocorre o incremento de carga, as tensões nas barras do sistema caem. Quando isso ocorre, o AVR atua no sentido de restaurar a tensão das barras dos geradores, incrementando a excitação de campo. Ao ser atingido um determinado valor de corrente de campo, o OXL atua reduzindo-a e, conseqüentemente, reduz a injeção de potência reativa no sistema, inibindo a ação do AVR de incrementar a tensão do sistema, logo o sistema entra em colapso.

No caso 4, quando adicionado o OLTC, conforme este atua no sentido de restaurar a tensão da barra 11, o perfil de tensão das demais barras se degrada mais rapidamente. Em determinado momento, a ação conjunta do AVR e do OXL faz com

que a injeção de potência reativa diminua, sendo insuficiente para suprir a demanda do sistema, levando o sistema ao colapso.

Por fim, no caso 5, ao adicionar uma carga dinâmica altamente reativa ao sistema, como o motor de indução, as atuações dos demais componentes do sistema (AVR, OXL e OLTC) ocorrem de maneira mais rápida, levando o sistema ao colapso mais cedo do que nos demais casos.

**Figura 45 – Curvas PV da barra 8 no cenário 2**



Fonte: Autoria própria.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência e impacto de diferentes tipos de cargas e elementos do sistema na estabilidade de longo prazo, por meio da análise de um sistema teste em ambiente computacional. Foram comparados cinco casos distintos de modelagem do sistema, com a finalidade de avaliar a influência separada de cada elemento, sendo analisados dois cenários distintos de carregamento.

O sistema teste avaliado, apesar de ser um sistema de pequeno porte, é um sistema de grande valia para análises sobre estabilidade de tensão, uma vez que contempla importantes elementos dos sistemas reais, como o OXL, o OLTC e cargas estáticas e dinâmicas que influenciam diretamente o perfil de tensão do sistema.

Conforme apresentado no capítulo anterior, todas as simulações foram realizadas com o auxílio dos *softwares* ANAREDE e ANATEM, levando em consideração a modelagem dinâmica dos componentes em estudo acerca da influência na estabilidade de tensão de longo prazo.

Além dos componentes dinâmicos, foi abordado no trabalho sistemas que apresentam resultados próximos de representações de modelos estáticos, analisados como casos de referência. Ao se comparar as curvas PV dos casos 1 e 2 com os demais casos, diferenças relevantes de carregamento e instabilidade são notadas, conforme a degradação do perfil de tensão do sistema se acentua devido ao incremento do carregamento.

Nota-se, pelas curvas PVs dos casos 3, 4 e 5, que a estabilidade dos sistemas é altamente influenciadas pelo OXL, OLTC e o motor de indução. Esses elementos interferem diretamente nos pontos de carregamento máximo e na velocidade com que o perfil de tensão do sistema se degrada. Assim, comprovou-se a influência desses elementos na instabilidade de tensão do sistema.

## REFERÊNCIAS

- BARATA, Heitor A. **Controle secundário de tensão em sistemas elétricos de potência**. 2014. 120 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.
- CEPEL, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, **ANAREDE: Programa de Análise de Redes, Manual do Usuário**, V10.02.03, Setembro 2017.
- CEPEL, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, **ANATEM: Análise de Transitórios Eletromecânicos, Manual do Usuário**, V11.03.00, Janeiro 2018.
- CHAPMAN, Stephen J.. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. São Pauli: Amgh Editora Ltda, 2013.
- CHOWDHURY, Badrul H. and TAYLOR, Carson W., **Voltage Stability Analysis: V – Q Power Flow Simulation Versus Dynamic Simulation**, IEEE Transactions On Power Systems, v. 10, n. 4, p.1354-1359, nov. 2000.
- CORSI, Sandro. **Voltage Instability – The Different Shapes of the “Nose”**. Charleston: Irep Symposium, 2007.
- CUTSEM, Thierry Van; VOURNAS, Costas. **Voltage stability of electric power systems**. 2. ed. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- GIRGIS, G. K. and Vu, H. D., **Verification of Limiter Performance in Modern Excitation Control Systems**, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 3, September 1995.
- IEEE Committee Report, **Load Representation for Dynamic Performance Studies**, IEEE IFansactions on Power Systems, Vol. 8, No. 2, pp. 472-482, May 1993.
- IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions. **Definition and classification of power system stability**, IEEE Transactions on Power Systems, v. 19, n. 2, p. 1387-1401, maio 2004.
- IEEE Task Force on Excitation Limiters, **Recommended Models for Overexcitation Limiting Devices**, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 4, September 1995.
- KUNDUR, Prabha. **Power system stability and control**. New York: McGraw-Hill, 1994.
- LEMOS, João Ricardo Ferreira. **Modelagem de Linhas de Transmissão para Estudos de Transitórios Eletromecânicos**. 2008. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

LONDERO, Rafael R. **Avaliação do impacto da geração distribuída operando de modo interligado e em ilha intencional**. 2009. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.

LONDERO, Rafael R. **Avaliação do impacto da integração de aerogeradores na estabilidade de tensão de longo-prazo em sistemas elétricos de potência**. 2014. 203 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.

PEREIRA, Rita Manuela da Fonseca Monteiro. **Estudo da Estabilidade Dinâmica de Tensão em Redes com Elevada Penetração de Energia Eólica**. 2013. 353 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Eletrotécnica, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, 2013.

RANGEL, Ricardo Diniz; GUIMARÃES, Carlos Henrique Costa. **Modelagem de transformadores com dispositivos de comutação em carga para utilização em programas de simulação dinâmica**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 19., 2007, Rio de Janeiro. Artigo. Rio de Janeiro: SNPTEE, 2007. p. 1-8.

SINDER, Rebecca Laginestra. **Impacto de Limitadores de Sobreexcitação Ativos na Avaliação da Segurança Dinâmica de Sistemas de Energia Elétrica**. 2018. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

SMOLINSKI, W. J.. **Equivalent Circuit Analysis of Power System Reactive Power and Voltage Control Problems**. IEEE Transactions On Power Apparatus And Systems, Fredericton, v. PAS-100, n. 2, p. 837-842, fev. 1981.

STEVENSON, William D.. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

TAYLOR, Carson W. **Power system voltage stability**. New York: McGraw-Hill, 1994.

UFSC. Capítulo 8: **Introdução à Estabilidade de Tensão**. Disponível em: <http://www.labspot.ufsc.br/~simoed/dincont/cap8.pdf>. Acesso em 30 de ago. de 2017.

## ANEXO 1 – Dados do Sistema Teste

Gerados Síncronos (em p.u. na base da máquina):

G1: barra infinita

G2:  $H = 2,09$  s  $S_b = 2200$  MVA

G3:  $H = 2,33$  s  $S_b = 1400$  MVA

$R_a = 0,0046$	$X_d = 2,07$	$X'_d = 0,28$	$X''_d = 0,215$
$X_q = 1,99$	$X'_q = 0,49$	$X''_q = 0,215$	$X_l = 0,155$
$T'_{d0} = 4,10$ s	$T'_{q0} = 0,56$ s	$T''_{d0} = 0,033$ s	$T'_{q0} = 0,0062$ s

Figura A.1 – Curvas de capacidades dos geradores em suas respectivas bases (cenário 1)

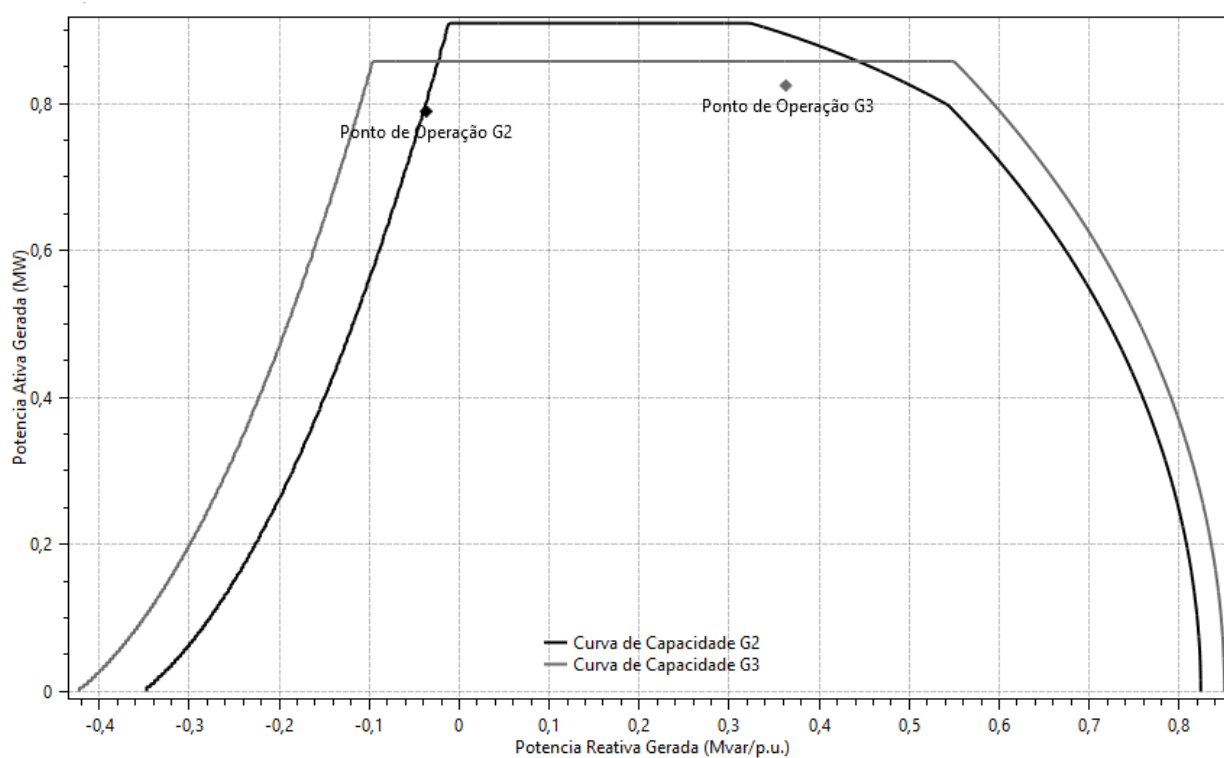
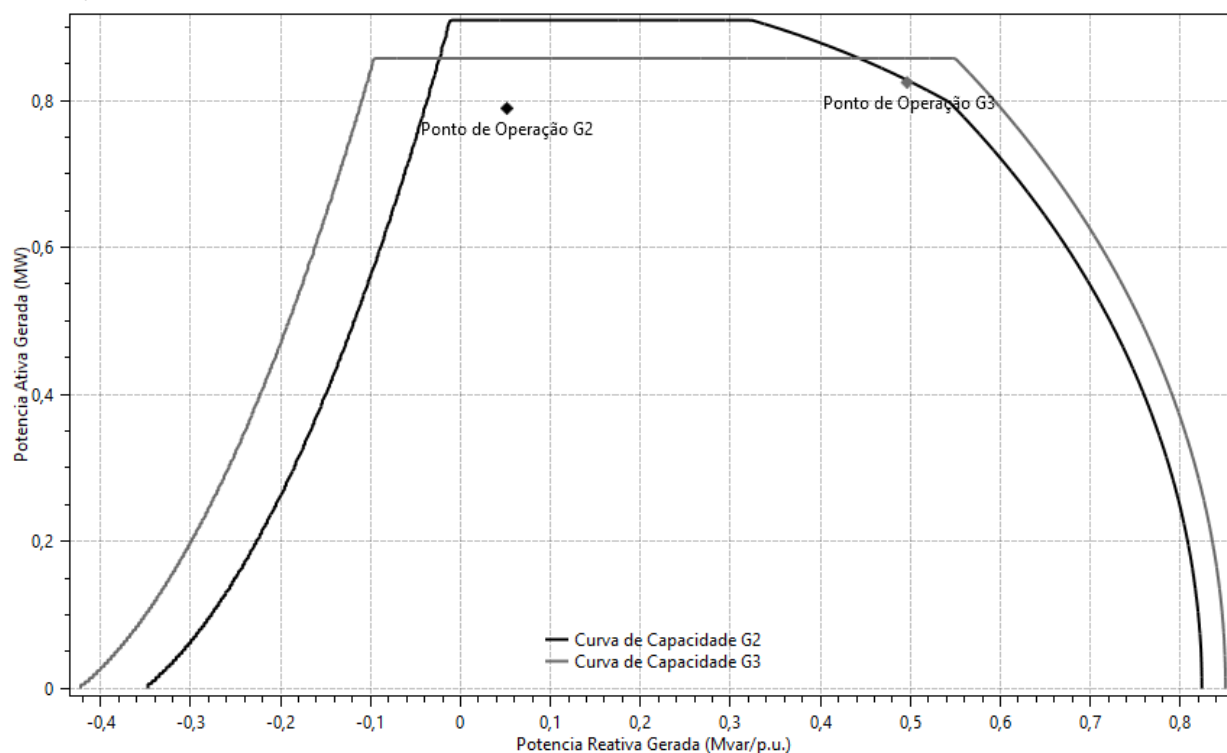


Figura A.2 – Curvas de capacidades dos geradores em suas respectivas bases (cenário 2)



Gerador	Fator de Potência	Limite de Potência Mecânica da Turbina
G2	0,85	2000 MW
G3	0,85	1200 MW

Dados do sistema de potência teste (em p.u. na base  $S_b = 100$  MVA):

Linha 5-6	$R = 0,0$	$X = 0,0040$	$B = 0,0$
Linha 6-7	$R = 0,0015$	$X = 0,0288$	$B = 1,173$
Linha 9-10	$R = 0,0010$	$X = 0,0030$	$B = 0,0$
Transformador T1	$R = 0,0$	$X = 0,0020$	$a = 0,8857$
Transformador T2	$R = 0,0$	$X = 0,0040$	$a = 0,8857$
Transformador T3	$R = 0,0$	$X = 0,0125$	$a = 0,9024$
Transformador T4	$R = 0,0$	$X = 0,0030$	$a = 1,0664$
Transformador T5	$R = 0,0$	$X = 0,0026$	$a = 1,0800$
Transformador T6	$R = 0,0$	$X = 0,0100$	$a = 1,0000$

Transformador com comutação sob carga (OLTC):

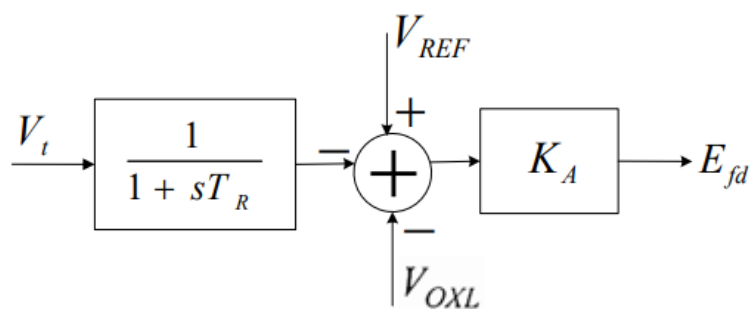
Figura A.3 – Diagrama de blocos do OLTC



Tempo de atraso para o 1º tap	30 s
Tempo de atraso taps subsequentes	5 s
Banda morta	± 1% da tensão da barra
Intervalo de tap	± 16 taps
Comprimento do tap	5/8%

Regulador automático de tensão (AVR):

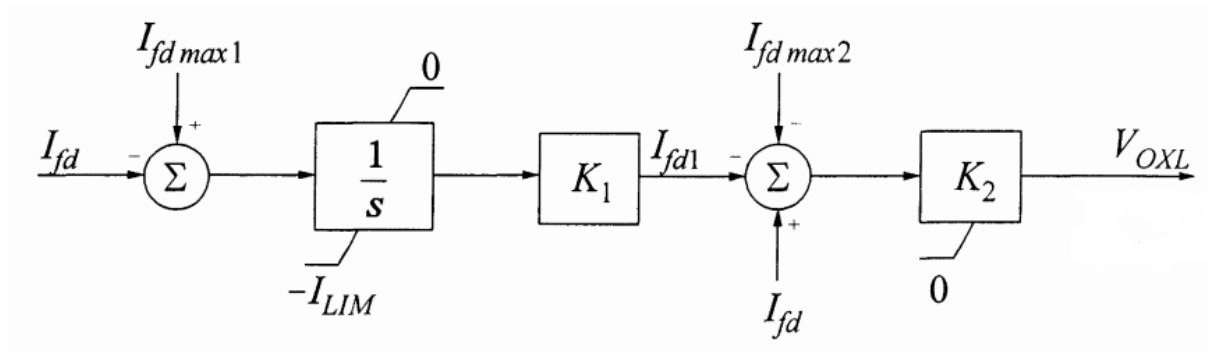
Figura A.4 – Diagrama de blocos do AVR



$K_A$	400
$T_R$	0,02 s

Limitador de sobre-excitação (OXL):

Figura A.5 – Diagrama de blocos do OXL



$I_{fdmax1}$ (p.u.)	$I_{fdmax2}$ (p.u.)	$K_1$	$K_2$	$I_{LIM}$ (p.u.)
3,02	4,60	0,41	12,6	3,85

Motor de indução (% base da máquina):

$R_s$	$X_s$	$X_m$	$R_r$	$x_r$	Potência	H	F
10	14,5	330	0,8	14,5	4450 HP	0,6 s	60 Hz