

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Eduardo Chagas de Siqueira

**Estudo investigativo da flutuação  
de tensão causada pela presença de  
um forno elétrico a arco**

São Carlos

2017



Eduardo Chagas de Siqueira

# **Estudo investigativo da flutuação de tensão causada pela presença de um forno elétrico a arco**

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

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

Orientador: Prof. Dr. Mário Oleskovicz

São Carlos

2017



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

DD278e De Siqueira, Eduardo Chagas  
Estudo investigativo da flutuação de tensão causada  
pela presença de um forno elétrico a arco / Eduardo  
Chagas De Siqueira; orientador Mário Oleskovicz. São  
Carlos, 2017.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com  
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de  
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,  
2017.

1. Flutuação de Tensão. 2. Forno Elétrico a Arco.  
3. Índice de Severidade de Curta Duração. I. Título.



# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Eduardo Chagas de Siqueira

Título: “Estudo investigativo da flutuação de tensão causada pela presença de um forno elétrico a arco”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado

em 31 / 10 / 2017,

com NOTA 6,0 (seis , zero), pela Comissão Julgadora:

*Prof. Associado Mário Oleskovicz - Orientador - SEL/EESC/USP*

*Mestre Carlos Henrique Beuter - Doutorando - SEL/EESC/USP*

*Mestre Jeovane Vicente de Sousa - Doutorando-SEL/EESC/USP*

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:

Prof. Associado Rogério Andrade Flauzino



## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente aos meus pais por todo o suporte e carinho que me deram durante toda a minha vida e por propiciarem a oportunidade de vivenciar esta experiência.

Agradeço aos meus irmãos e avós que estiveram presentes nos momentos de felicidade e dificuldade.

Agradeço ao meu avô pelas emoções compartilhadas e por todos os ensinamentos me passados ao longo da vida.

Agradeço a minha namorada que esteve presente nos momentos de necessidade e por sempre acreditar em mim.

Agradeço a companhia dos amigos que deixei em Curitiba que, apesar da longa distância, mantivemos uma forte amizade.

Agradeço ao apoio dos amigos que fiz em São Carlos durante estes anos de curso, por toda a cooperação e união, que contribuiu com a minha formação.

Agradeço ao professor Mário Oleskovicz, que na figura de orientador me deu suporte e me norteou para que este trabalho pudesse ser realizado.

Agradeço a toda a equipe de professores e funcionários da Escola de Engenharia de São Carlos, que de forma geral foram fundamentais para o desenvolvimento do curso e possibilitaram esta experiência.



## Resumo

DE SIQUEIRA, E. C. **Estudo investigativo da flutuação de tensão causada pela presença de um forno elétrico a arco.** Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2017.

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) ressalta a importância do tema de Qualidade de Energia Elétrica (QEE). Mais especificamente, expõe a severidade da flutuação de tensão causada pela presença de um forno elétrico a arco (FEA) em uma rede elétrica. Os FEAs são cargas industriais que consomem uma grande quantidade de potência reativa durante a operação e causam flutuações de tensão, que se tornam prejudiciais a todo o sistema de potência e às demais cargas conectadas na rede elétrica. Neste trabalho foi apresentado as principais causas e efeitos da flutuação de tensão, o método de medição adotado atualmente e as técnicas de mitigação utilizadas frequentemente. A proposta deste trabalho é a obtenção do índice de severidade de curta duração a partir da medição da forma de onda obtida em uma rede elétrica sob influência de flutuação de tensão causada pelo processo de fundição de um forno a arco. Para a obtenção das formas de onda, foi modelado uma rede elétrica composta por um FEA e uma fonte no ambiente Simulink do MatLAB. O método para a obtenção dos índices consiste na aplicação de um algoritmo desenvolvido em MatLAB nas formas de onda obtidas, que resultam na magnitude do índice e demonstram a sua gravidade em relação às normas nacionais.

**Palavras chave:** Qualidade de Energia Elétrica, Flutuação de Tensão, Forno Elétrico a Arco, Índice de Severidade de Curta Duração, MatLAB, Simulink.



## **Abstract**

DE SIQUEIRA, E. C. **Investigation of the voltage fluctuation caused by the presence of an electric arc furnace.** Final Paper – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2017.

*This academic paper highlights the importance of the theme of Electric Energy Quality. More specifically, it exposes the severity of the voltage fluctuation caused by the presence of an electric arc furnace in an electric grid. EAFs (Electric Arc Furnace) are industrial loads that consume a large amount of reactive power during operation and cause voltage fluctuations, which become detrimental to the entire power system and other loads connected to the network. In this paper the main causes and effects of voltage fluctuation, the measurement method adopted today and the frequently used mitigation techniques were presented. The purpose of this work is to obtain the short duration severity index from the measurement of the waveform obtained in an electric network under influence of voltage fluctuation caused by the EAF process of casting. To obtain the waveforms, an electrical network composed of an EAF and a source were modeled in the Simulink environment of MatLAB, software widely used to simulate problems related to engineering. The method for obtaining the indices consists in the application of an algorithm developed in MatLAB in the waveforms obtained, which result in the magnitude of the index and demonstrate its seriousness in relation to the national standards.*

**Keywords:** Voltage Fluctuation, Electric Arc Furnace, Perception of Short Term, Flicker, Electric Energy Quality, MatLAB, Simulink.



## Lista de Figuras

Figura 1 - Onda de tensão sob efeito da flutuação. ....	4
Figura 2 - Variação de potência durante operação de um FEA.....	6
Figura 3 - Flutuação de tensão causada pela presença do FEA.....	6
Figura 4 – Curvas para estimativa da flutuação de tensão. ....	7
Figura 5 - Tensão no terminal de uma máquina de indução variável. ....	7
Figura 6 – Sistema de potência de um forno a arco.....	9
Figura 7 – Características operacionais em função da tensão e corrente.....	10
Figura 8 - Resultado do experimento realizado. ....	13
Figura 9 – Diagrama da determinação da severidade de cintilação.....	14
Figura 10 – Estrutura do instrumento de medição de <i>flicker</i> . ....	15
Figura 11 – Processo de avaliação do PST.....	16
Figura 12 - Compensador convencional para fornos a arco.....	20
Figura 13 - Classificação dos reguladores de tensão. ....	22
Figura 14 - Flutuação de tensão causada por de bancos de capacitores. ....	23
Figura 15 – Diagrama de um TCR.....	24
Figura 16 – Ondas de tensão e corrente para diferentes ângulos de disparo. .	25
Figura 17 – Configuração básica de um TSC. ....	26
Figura 18 - Configuração de um SVC.....	29
Figura 19 – Circuito elétrico de um STATCOM.....	31
Figura 20 – Interface do MatLAB. ....	35
Figura 21 – Interface do Simulink. ....	36
Figura 22 – Biblioteca do Simulink.....	36
Figura 23 – Sistema principal do FEA.....	39
Figura 24 – Subsistema do FEA.....	40
Figura 25 – Algoritmos de simulação do FEA. ....	41
Figura 26 – Forma de onda de tensão sob efeito de flutuação a 4 Hz. ....	42
Figura 27 – Forma de onda de tensão sob efeito de flutuação a 6 Hz. ....	42
Figura 28 – Forma de onda de tensão sob efeito de flutuação a 8 Hz. ....	43
Figura 29 – Forma de onda de tensão sob efeito de flutuação a 10 Hz. ....	43
Figura 30 – Forma de onda de tensão sob efeito de flutuação a 12 Hz. ....	44
Figura 31 – Forma de onda de tensão sob efeito de flutuação a 14 Hz. ....	44



## Lista de Siglas e Abreviaturas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standard Institute</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
EAF	<i>Electric Arc Furnace</i>
FEA	Forno Elétrico a Arco
FPC	Função de Probabilidade Cumulativa
GTO	<i>Gate Turn Off</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PRODIST Nacional	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PST	<i>Perception of Short Term</i>
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
SD	Sistema de Distribuição
SEP	Sistema Elétrico de Potência
STATCOM	<i>Static Synchronous Compensator</i>
SVC	<i>Static Var Compensator</i>
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TCR	<i>Thyristor-Controlled Reactor</i>
TSC	<i>Thyristor-Switched Capacitor</i>



## Sumário

1	Introdução.....	1
1.1	Objetivos da Pesquisa.....	2
1.2	Estrutura do documento .....	2
2	A Flutuação de tensão.....	4
2.1	Causas da flutuação de tensão.....	5
2.1.1	O Forno a Arco .....	8
2.2	Efeitos da flutuação de tensão .....	11
2.2.1	<i>Flicker</i> .....	11
2.3	Medição.....	13
2.3.1	Índice de Curta Duração.....	17
2.3.2	Índice de Longa Duração.....	18
2.3.3	Norma Nacional.....	18
3	Técnicas de mitigação dA flutuação de tensão .....	20
3.1	Modificações no sistema.....	21
3.2	Compensadores dinâmicos.....	21
3.3	Capacitores em série .....	23
3.4	O TCR.....	24
3.5	O TSC .....	26
3.6	O SVC.....	27
3.6.1	Princípio de Operação .....	27
3.6.2	Aplicações .....	28
3.6.3	Limitações .....	29
3.7	O STATCOM.....	30
3.7.1	Princípios de Operação .....	30
3.7.2	Aplicações .....	31
3.7.3	Limitações .....	32
3.7.4	Diferenças entre SVC e STATCOM.....	32
3.8	Outros Métodos.....	33
4	Simulação e resultados .....	34
4.1	MatLAB e Simulink.....	34
4.2	Simulação do FEA.....	37

4.3	Modelo .....	37
4.4	Implementação.....	39
4.5	Resultados .....	41
5	Conclusão.....	46
	Referências Bibliográficas .....	48
	Anexo I .....	50

## 1 INTRODUÇÃO

Todo o país que apresenta uma economia desenvolvida compartilha de uma característica em comum: uma indústria robusta, capaz de suprir as necessidades da nação para um desenvolvimento contínuo. O setor industrial, porém, é completamente dependente de energia para que as máquinas possam operar e cumprir seu papel de transformação de matéria prima e produção de bens.

As fontes de energia já foram várias durante a história do homem, desde força de tração animal nos períodos medievais, passando pela revolução industrial que apresentou a força das máquinas a vapor e das máquinas de combustão, e finalmente a dominância de máquinas movidas através de energia elétrica no último século. Essa dominância se deu devido a facilidade de geração, transmissão, distribuição e uso, características intrínsecas da eletricidade, além de apresentar menores perdas, sendo assim mais eficiente que qualquer forma de energia anterior.

A fim de suprir as necessidades das máquinas industriais, que atualmente são alimentadas exclusivamente por energia elétrica, existe um grande e complexo Sistema Elétrico de Potência (SEP) composto por equipamentos de geração, transmissão e distribuição, que tem como objetivo alimentar todas as máquinas elétricas de produção nacional, com a finalidade de manter um fornecimento eficiente e estável para proporcionar o crescimento econômico da nação.

Portanto é de extremo interesse que o SEP forneça energia elétrica de forma adequada, contínua, segura e de acordo com os padrões nacionais estipulados, sem que ocorram distúrbios de falta, queda ou oscilação de tensão. Sendo que estes podem também ser causados pelos dispositivos eletrônicos dos próprios equipamentos industriais, que apresentam características não lineares entre tensão e a corrente nos terminais de alimentação.

No âmbito de prevenção contra possíveis falhas e distúrbios que possam prejudicar a operação eficiente do setor industrial, surge a preocupação com a Qualidade da Energia Elétrica (QEE) que busca investigar e estudar as anomalias a fim de descobrir um padrão de comportamento de formação e propagação, para que enfim seja possível criar técnicas e equipamentos a fim de mitigar os distúrbios e amenizar os efeitos.

Dentre os distúrbios, pode-se definir o fenômeno de flutuação de tensão, sendo caracterizado por variações sistemáticas e randômicas na forma de onda de tensão do SEP. A flutuação de tensão apresenta magnitude entre 0,9 e 1,1 p.u. e é causada por máquinas elétricas que forçam variações rápidas e contínuas de corrente durante a operação. Um dos

efeitos no SEP mais conhecidos é a cintilação luminosa de lâmpadas, também conhecido como *flicker* (DUGAN *et al.*, 2003).

Nesse contexto, com foco na QEE dos SEP, esse trabalho se destina a estudar a técnica de medição do fenômeno de flutuação de tensão em redes industriais causado por fornos a arco - FEA (EAF – *Electric Arc Furnace*) através do método proposto pela norma internacional IEC 61000-4-15.

## 1.1 Objetivos da Pesquisa

O objetivo deste trabalho é a modelagem de cargas elétrica não lineares comumente encontradas em sistemas elétricos de distribuição. Nesta pesquisa será abordado especificamente o forno a arco elétrico, conhecido pela grande influência no sistema em que está conectado com a formação do fenômeno de flutuação de tensão.

Para o desenvolvimento deste trabalho foi simulado uma situação na qual o forno a arco estava conectado com uma fonte de alimentação que representa o sistema de distribuição de energia. A modelagem foi realizada no ambiente de trabalho Simulink, ferramenta disponibilizada pelo software MatLAB.

O distúrbio da flutuação de tensão causa o denominado efeito *flicker* que é caracterizado por cintilações luminosas, chegando a causar mal-estar visual a quem estiver próximo. As simulações apresentadas evidenciam esse fenômeno e tais resultados poderão ajudar na busca de soluções para os problemas manifestados, bem como servir de apoio para os demais estudos no contexto de QEE.

Pretendeu-se também apontar indicadores que visam qualificar e quantificar o problema manifestado, com a finalidade de melhor avaliação e auxílio a busca por métodos que visam minimizar os efeitos causados pela flutuação de tensão. Por fim, foi alcançado um aprofundamento dos conhecimentos relativos à QEE e a simulação de sistemas elétricos de potência.

## 1.2 Estrutura do documento

O trabalho está organizado em 5 capítulos.

O capítulo 1 é composto pela introdução, apresenta ao leitor o tema a ser desenvolvido, bem como o objetivo do estudo dentro da área de qualidade da energia elétrica.

O capítulo 2 apresenta conceitos teóricos relacionados ao efeito da flutuação de tensão, explorando as causas, com ênfase no forno a arco elétrico, as consequências em

um sistema de potência, com ênfase no efeito *flicker*, e o método de medição visando a obtenção de indicadores de percepção.

O capítulo 3 apresenta um estudo investigativo sobre diversas técnicas de mitigação da flutuação de tensão utilizadas atualmente, composto por uma explicação operacional básica, assim como explorando as vantagens e desvantagens dos métodos, com ênfase no SVC (*Static Var Compensator*) e no STATCOM (*Static Synchronous Compensator*).

O capítulo 4 é dedicado especialmente para o método utilizado para a simulação assim como os resultados obtidos durante o desenvolvimento da pesquisa.

No capítulo 5 está apresentada a conclusão do trabalho, e na sequência, as referências bibliográficas utilizadas e o conteúdo em anexo.

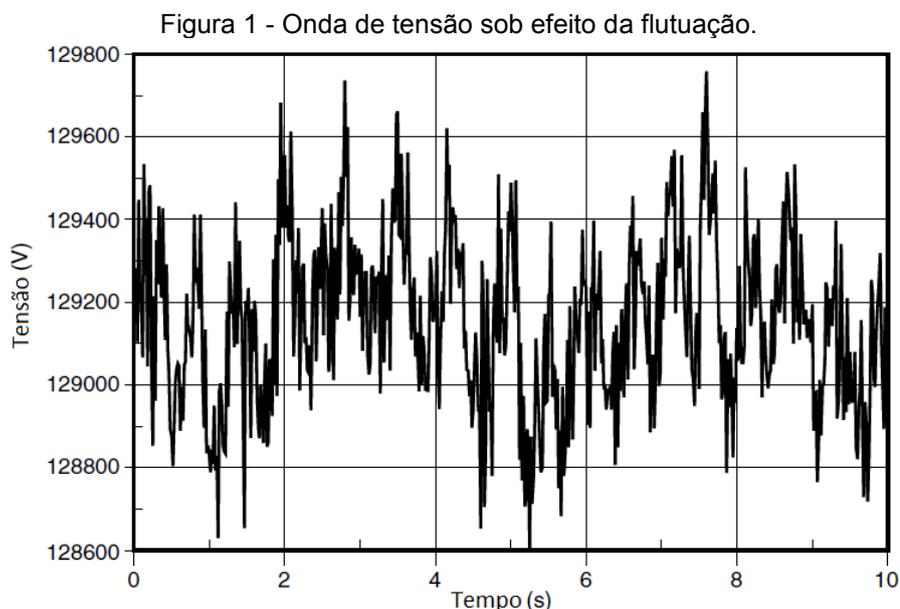
## 2 A FLUTUAÇÃO DE TENSÃO

Flutuação de tensão é um distúrbio de tensão de ocorrência frequente nas redes e sistemas de distribuição elétrica no país e no mundo. Segundo Dugan et al. (2003), caracteriza-se como um problema de QEE qualquer distúrbio ou ocorrência manifestada nos níveis de tensão, nas formas de onda de tensão ou corrente que possam resultar em insuficiência, má operação, falha ou defeito permanente em equipamento de um sistema elétrico.

Segundo Hanzelka (2014), a flutuação de tensão é um fenômeno caracterizado por uma rápida variação no valor eficaz da tensão, visualmente representado por uma modulação no contorno da forma de onda de tensão. Para Dugan *et al.* (2003), a variação da magnitude da tensão durante a perturbação é aleatória e costuma ser entre 90% a 110% do valor nominal da tensão segundo o padrão ANSI C84.1 definido pelo *American National Standard Institute*.

A comissão internacional de eletrotécnica (IEC – *International Electrotechnical Commission*) apresenta várias definições para o distúrbio da flutuação de tensão em sistemas de potência na norma IEC 61000-2-1 (DUGAN *et al.*, 2003). Neste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) a definição de interesse é "uma série de oscilações de tensão aleatórias e sistemáticas", pois é a melhor descrição para o fenômeno criado a partir da operação do forno a arco.

Pode ser observado na Figura 1 um exemplo da forma de onda de tensão com a manifestação do fenômeno de flutuação da tensão.



Fonte: DUGAN *et al.*, 2003, p.29.

## 2.1 Causas da flutuação de tensão

A flutuação de tensão é causada pela insuficiência do sistema de potência em fornecer a potência reativa demandada pelas cargas conectadas à rede. A queda de tensão na carga leva ao aumento da demanda por potência reativa, que caso não seja fornecida pelo sistema de potência, levará a queda de tensão na barra. A queda de tensão levará a um rápido e progressivo declínio no local e se espalhará para as barras vizinhas, causando um colapso no sistema de potência (KUNDUR, 1993).

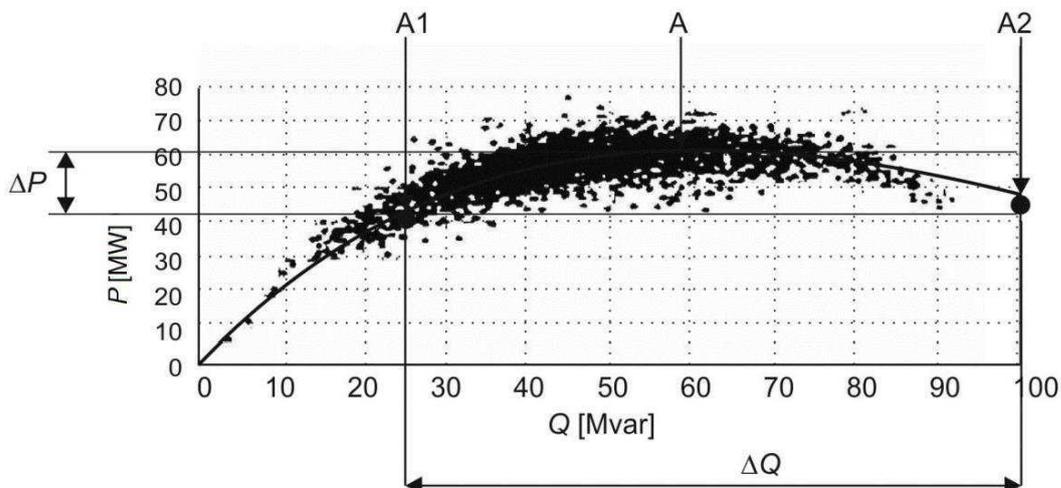
Um dos principais fatores que levam a ocorrência do fenômeno descrito é a variação ao longo do tempo da impedância das cargas ligadas ao sistema de potência. As principais fontes do distúrbio são cargas industriais que necessitam de grande quantidade de potência para se manterem em operação (HANZELKA, 2014).

Cargas causadoras de flutuação são aquelas as quais a potência necessária para realizar certa tarefa é relativamente grande em comparação com a potência de curto circuito no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) (DUGAN *et al.*, 2003). Em nível de alta tensão podemos citar como exemplo destas cargas os FEAs, máquinas de compressão, máquinas de tração e máquinas de solda. Em nível de baixa tensão pode-se citar controladores eletrônicos, pistões elétricos e elevadores de cargas.

Das cargas citadas, o FEA é um dos principais equipamentos na rede elétrica responsáveis pela flutuação de tensão. Esta carga necessita de uma elevada quantidade de corrente para derreter material metálico, que tem suas propriedades modificadas com o aumento de temperatura. Durante o ciclo de operação a carga varia significativamente com o tempo causando variações na quantidade de corrente drenada necessária para realizar o trabalho. No começo do ciclo de derretimento é quando ocorre a maior drenagem de corrente, podendo ocorrer curto circuito entre os eletrodos por causa do material sendo derretido. Neste período a flutuação de tensão manifestada está na frequência entre 1 e 10 Hz. No período seguinte, de refinamento, a carga se estabiliza, porém, com altas potências associadas (HANZELKA, 2014).

A Figura 2 mostra a relação da potência ativa e reativa de um FEA. No ponto A, onde a potência ativa atinge o seu máximo, o fator de potência equivale a 0,7 e representa o ponto de efetividade máxima em um processo metalúrgico. Durante a operação, a resistência do FEA varia mudando o ponto de operação de A1 para A2. Como pode ser observada na Figura 2, a variação de potência reativa é muito maior que a de potência ativa neste intervalo entre A1 e A2.

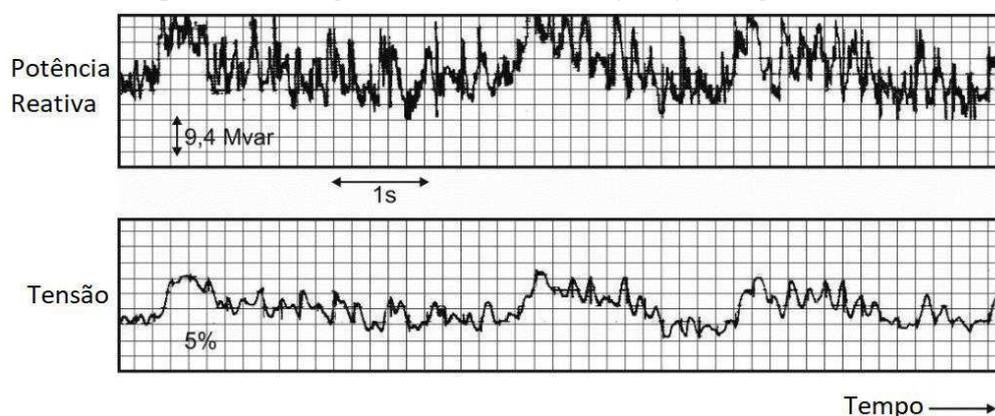
Figura 2 - Variação de potência durante operação de um FEA.



Fonte: HANZELKA, 2014, p. 4.

Conforme apresentado na Figura 3, as rápidas variações de potência reativa na operação do FEA afetam a barra na qual o mesmo está conectado causando a flutuação de tensão.

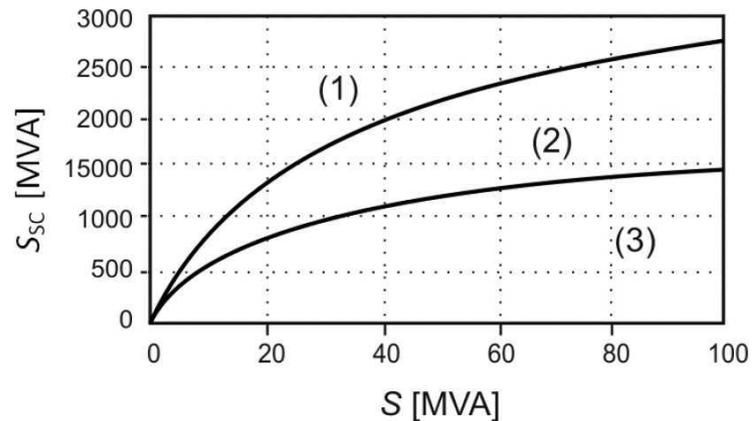
Figura 3 - Flutuação de tensão causada pela presença do FEA.



Fonte: HANZELKA, 2014, p. 4.

A Figura 4 apresenta um gráfico da operação de um FEA que relaciona a potência de curto circuito ( $S_{SC}$ ) no ponto de instalação com a potência do transformador de alimentação ( $S$ ). Tal relação permite estimar o grau da flutuação de tensão a ser causada pela operação da carga. Segundo Hanzelka (2014), a área indicada por (1) representa um nível de operação na qual a geração de flutuação de tensão não é significativa. Na área de operação (2) o uso de dispositivos estabilizadores e compensadores são necessários. Por fim, na área (3) de operação estão contidos todos os casos em que algum método de mitigação é indispensável, desde compensadores até a troca do FEA.

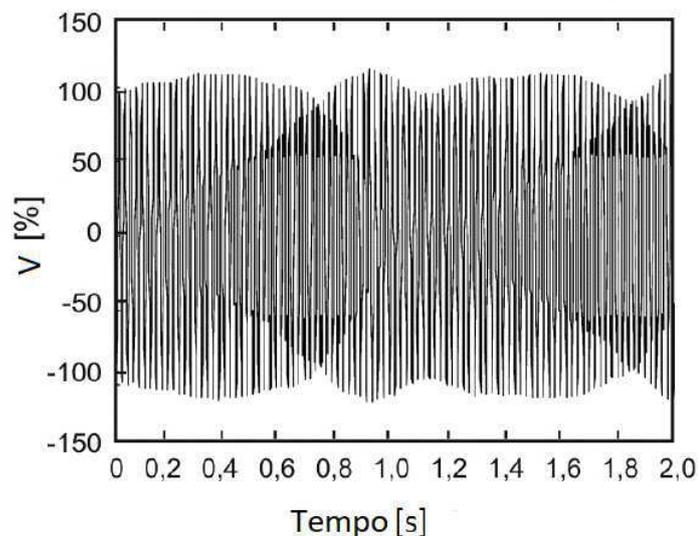
Figura 4 – Curvas para estimativa da flutuação de tensão.



Fonte: HANZELKA, 2014, p. 5.

Motores de indução são outras fontes de flutuação de tensão muito comuns no ambiente industrial. Estes compõem serras elétricas, prensas, máquinas de bombeamento, compressão e refrigeração. Uma grande quantidade de corrente é drenada da rede quando se dá a partida em um motor de indução, podendo ser de cinco a oito vezes a corrente nominal, sendo a maior parte da potência reativa e, portanto, causando flutuações de tensão na rede (HANZELKA, 2014). Outro problema relacionado aos motores, e comum a todos os equipamentos citados no exemplo, é quando a carga necessita de torque variável, variando a corrente no circuito e a potência reativa e gerando flutuação de tensão no terminal na qual a carga está conectada (Figura 5).

Figura 5 - Tensão no terminal de uma máquina de indução variável.



Fonte: HANZELKA, 2014, p. 6.

Outro fator que deve ser levado em consideração em relação a geração de distúrbios de tensão é se a rede principal (concessionária) possui capacidade de suportar a quantidade de corrente exigida pelos equipamentos conectados, a fim de manter a tensão

nominal e proporcionar uma operação dentro dos padrões e sem distúrbios. Para que isto ocorra, a rede deve ser planejada de forma a suportar toda a demanda de potência que pode vir a ocorrer, caso contrário, a rede pode ser definida como fraca e apresentar problemas de QEE (DUGAN *et al.*, 2003).

No cenário atual, com o crescimento industrial, a tendência é o aumento do número de cargas pesadas conectadas à rede, resultando em uma maior quantidade de corrente drenada. Caso isto ocorra em um sistema de potência fraco, com propensão a curtos circuitos, serão causadas quedas repentinas na tensão da barra. Dependendo da magnitude destas quedas e da frequência com a qual elas ocorrem pode resultar em flutuações de tensão observáveis. Por exemplo, lâmpadas incandescentes conectadas a essa rede industrial sofrerão cintilação (tremulação) luminosa (*flicker*) (HANZELKA, 2014).

Para avaliar o grau de flutuação de tensão que pode ocorrer, por exemplo em uma linha de distribuição, deve-se levar em consideração a quantidade de potência reativa requerida pela carga, a impedância da linha, a topologia da rede de potência e a frequência com que ocorrem tais variações de corrente (HANZELKA, 2014).

### 2.1.1 O Forno a Arco

O FEA foi originado em 1878, quando W. Von Siemens patenteou um dispositivo composto por dois eletrodos dispostos horizontalmente. O objetivo do equipamento era criar um arco elétrico através de um material metálico, com o intuito de aquecer a carga por irradiação. Porém, foi somente no século XX, com a queda dos custos de energia elétrica, que o uso desse forno começou a ser viabilizado e o FEA tomou posição significativa na indústria de produção de aço (GARCIA, 2010).

Atualmente os fornos elétricos a arco são ferramentas bastante utilizadas na produção de aço de alta qualidade devido à possibilidade de se controlar, de maneira precisa, os parâmetros envolvidos na carga (GARCIA, 2010).

Segundo Schauder e Gyugyi (1995), nos últimos anos houve uma demanda crescente por fornos a arco elétricos cada vez mais potentes a fim de suprir as necessidades da indústria, chegando a consumir potência ativa em valores superiores a 100 MW. Os FEAs, porém, são a principal causa de harmônicos, inter-harmônicos, flutuação de tensão e variação de consumo de potência reativa na rede industrial (GÖL *et al.*, 2010). O que vem a enfatizar a necessidade e a importância do uso e estudo de equipamentos para regulação e mitigação da flutuação de tensão cada vez mais robustos.

O FEA representa uma carga grande e complexa em uma rede elétrica de potência. Os parâmetros variáveis, desbalanceados e com baixo fator de potência definem as características não lineares e variantes no tempo apresentadas pelos FEAs. As oscilações

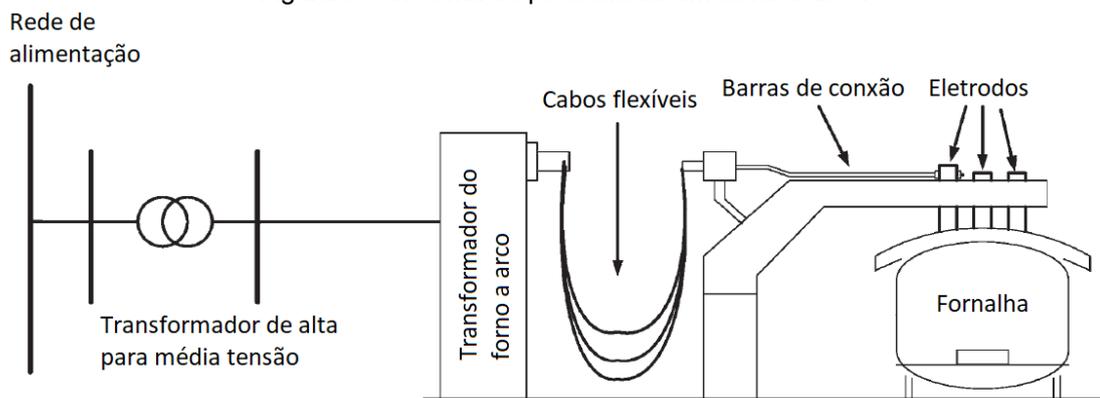
de corrente, instáveis e imprevisíveis, somadas a um consumo excessivo de potência ativa e reativa causam as quedas de tensão nos terminais do sistema de alimentação, resultando em fortes flutuações de tensão (SCHAUDER, 1999). Flutuações de tensão, devido às variações aleatórias do arco elétrico durante o derretimento do metal, apresentam tipicamente frequências entre 0,5 Hz e 25 Hz (MONTANARI, 1994).

Diferente de motores elétricos e sistemas eletrônicos, o forno a arco não apresenta um dispositivo compensador para a proteção contra variações na tensão embutido no PAC. Sendo assim, o forno é muito sensível às variações de tensão que ocorrem na rede elétrica, afetando negativamente a sua eficiência durante a operação da máquina (ERINMEZ, 2003).

Durante a operação, a potência reativa drenada pelo forno tem um impacto majoritário na rede de alimentação, criando uma queda de tensão no lado primário do transformador. Esse fenômeno afeta outras cargas conectadas na mesma rede, reduzindo a quantidade de potência ativa disponível. Neste cenário, faz-se então necessária uma solução para que a tensão seja mantida em nível adequado, proporcionando um ambiente adequado de operação para o sistema elétrico e seus usuários (KASHANI *et al.*, 2013).

O circuito primário de um forno a arco consiste na rede de distribuição de alimentação, um transformador de alta tensão para média tensão, cabos de conexão e um transformador para o forno a arco. Já o circuito secundário consiste de cabos flexíveis, barras de conexão e eletrodos como ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Sistema de potência de um forno a arco.



Fonte: Göll *et al.*, 2010.

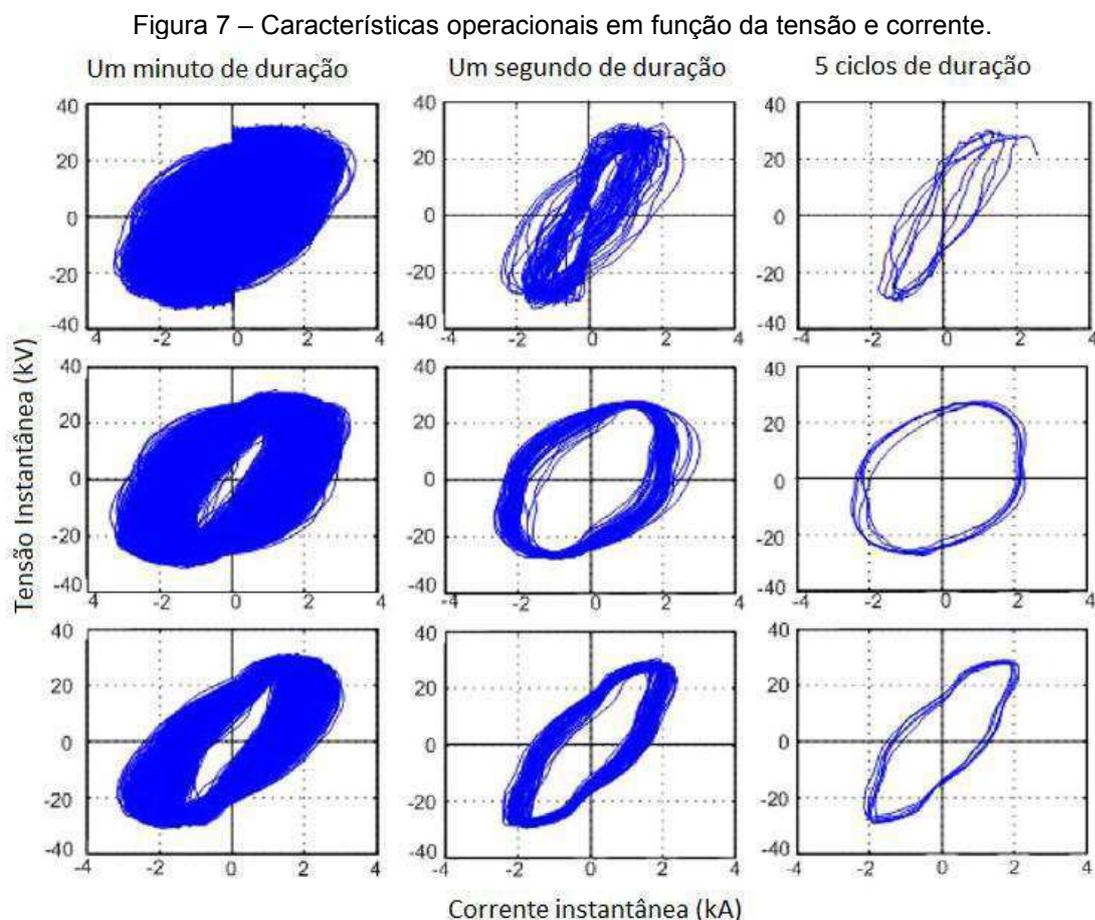
O circuito secundário consiste em aproximadamente 75% da impedância total do circuito, sendo que todos os componentes variam no tempo durante o período de operação. Além disso, a resistência do forno a arco se altera dinamicamente de forma não linear, dependendo não apenas do estado e do tipo do material metálico sendo derretido, como também da configuração do sistema de controle dos eletrodos (GÖLL *et al.*, 2010).

A potência ativa entregue ao forno a arco pode ser controlada tanto manualmente, como de forma automatizada, e consiste na mudança dos passos do *tap* do transformador. Para um controle efetivo essa mudança ocorre diversas vezes durante a operação (GÖL *et al.*, 2010).

Como a impedância do secundário é refletida para o primário sendo multiplicada pelo quadrado da relação do número de voltas (espiras) do enrolamento no núcleo do transformador, uma mudança causada pela variação no *tap* no secundário causa um efeito muito maior no primário, o que vem a evidenciar a natureza não linear, desbalanceada e de alta oscilação do forno a arco (GÖL *et al.*, 2010).

Segundo Heydt (1991), o processo de fundição pelo forno a arco é composto de três etapas: perfuração, derretimento e refinação.

Durante o processo de operação do forno a arco, o material metálico muda seu estado físico de sólido para líquido, diminuindo a distância entre o eletrodo e o metal. O arco elétrico se torna mais estável conforme o derretimento procede e a aleatoriedade das características de tensão e corrente diminuem, como pode ser visto na Figura 7 (primeira linha: perfuração; segunda linha: derretimento; terceira linha: fundição) (HEYDT, 1991).



Fonte: Göl *et al.*, 2010.

Os valores instantâneos da tensão e corrente da linha no lado de média tensão do transformador do FEA foram medidos e plotados no plano tensão-corrente durante um minuto, um segundo e cinco ciclos de operação. Cada gráfico corresponde a um dos três processos e revela as características estocásticas do forno a arco.

## 2.2 Efeitos da flutuação de tensão

A flutuação de tensão em sistemas de potência é a causa de diversos efeitos adversos, tanto de natureza técnica, quanto de natureza ergonômica. No meio industrial é difícil quantificar os danos causados pelo fenômeno, pois são de difícil determinação, mas não deixam de trazer custos adicionais (HANZELKA, 2014) e interferir no funcionamento de equipamentos elétricos conectados a uma mesma rede de elétrica (GYUGYI, 1993).

O efeito da flutuação de tensão no terminal das máquinas de indução pode alterar o torque realizado pela máquina e o escorregamento do rotor afetando a velocidade e eficiência da linha de produção. Em casos de flutuação mais extrema, pode ocorrer vibração do rotor, reduzindo a força mecânica e a vida útil da máquina (HANZELKA, 2014).

Em geradores e motores síncronos a flutuação de tensão afeta o ângulo de fase do rotor, causando oscilação antes de se estabilizar a cada mudança de carga, desgastando a peça, aumentando as perdas no torque e diminuindo a eficiência (DUGAN *et al.*, 2003).

Em retificadores eletrônicos de fase controlados por parâmetros do lado da saída CC (Corrente Contínua), o efeito da flutuação de tensão reduz o fator de potência destes equipamentos e proporciona a presença de componentes harmônicos e inter-harmônicos não característicos. Além disso, mudanças de tensão no lado CC poder levar a falha do disparo dos componentes eletrônicos, impedindo a comutação dos estados e não funcionando corretamente (HANZELKA, 2014).

### 2.2.1 Flicker

O termo *flicker* representa o efeito mais conhecido decorrente da flutuação de tensão e é utilizado muitas vezes como sinônimo para o distúrbio. *Flicker* traduzido para o português significa tremulação (cintilação) que é exatamente o fenômeno luminoso que pode ser observado em lâmpadas conectadas a um sistema de potência de baixa capacidade sob efeito da flutuação de tensão (DUGAN *et al.*, 2003).

A maioria das pessoas já experimentou o desconforto de estar presente em um ambiente no qual existe variação da intensidade de iluminação das lâmpadas locais. Isto ocorre quando outras cargas ligadas ao mesmo circuito de alimentação variaram, repentinamente, a corrente consumida. Em ambientes domésticos normalmente são fontes

desse fenômeno os aquecedores e os condicionadores de ar, os quais tem a capacidade de gerar um flicker observável. Uma descrição mais precisa de flicker pode ser encontrada na IEC EM 61000-3-3 a qual define o fenômeno como “O incômodo subjetivo da cintilação imposta à luz produzida por lâmpadas incandescentes de 230 V, 60 W pelas flutuações de tensão de alimentação” (GARCIA, 2010).

O problema é famoso, pois é um dos mais antigos já identificados na área de QEE e foi mencionado pela primeira vez no final do século XIX com o início da implementação de sistemas de corrente alternada. A facilidade da percepção vem de sua característica principal. O *flicker* pode ser observado a olho nu como uma tremulação luminosa persistente, não sendo necessário equipamento de medição para evidenciar sua existência (DUGAN *et al.*, 2003).

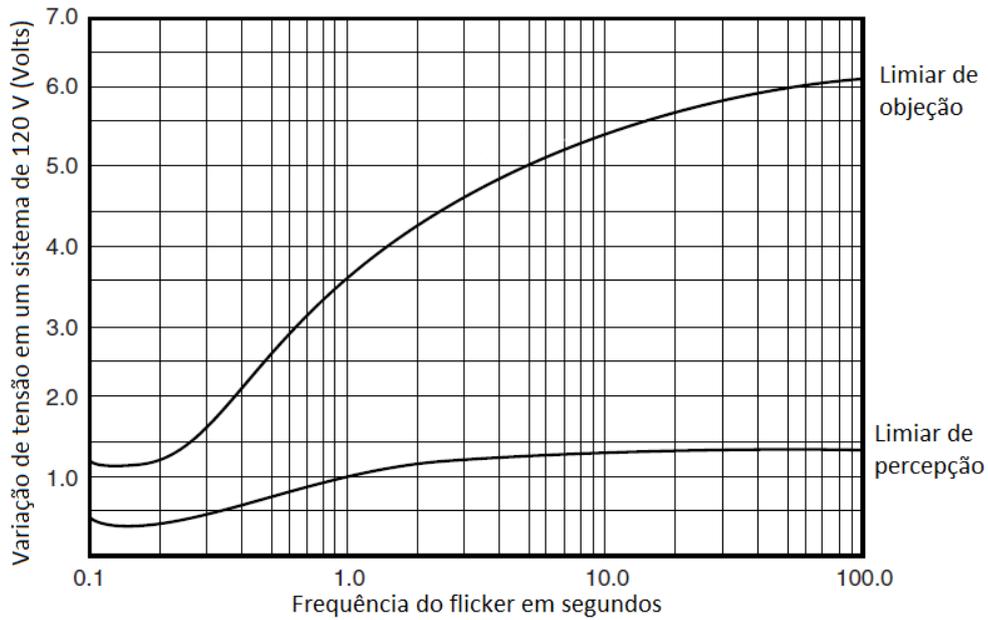
Existem diversos estudos que visam à obtenção de curvas de percepção de *flicker* para tentar correlacionar com os efeitos causados nos seres humanos. Porém a maneira como os dados são coletados é subjetiva, uma vez que está relacionada com a capacidade de percepção de quem se voluntaria para sofrer tais experiências. Os testes são realizados expondo os voluntários a tremulações luminosas emitidas por diversas fontes de luz, variando a forma de onda e a frequência das oscilações e então recolhendo resultados (DUGAN *et al.*, 2003).

Experimentos tentando relacionar as medidas de flutuação de tensão em alta tensão com as tremulações luminosas observadas por usuários em baixa tensão se provou ineficaz. Os possíveis motivos para essa divergência podem ser: a atenuação da flutuação de tensão através de um transformador abaixador; o fato de que muitos equipamentos atuais estão equipados com equipamentos eletrônicos para manter tensão constante; e o fato que variações rápidas de tensão provocam variações rápidas luminosas não detectáveis a olho nu (DUGAN *et al.*, 2003).

Alguns experimentos realizados com observadores, nos Estados Unidos, na Inglaterra e na França, demonstram que a sensibilidade do olho humano às variações luminosas está restringida a uma faixa estreita de frequências de cintilação, entre 0 Hz e 30 Hz (Garcia, 2010) e uma variação da amplitude da tensão de apenas 0,3% em frequência de 10 Hz já é perceptível ao olho humano. (MONTANARI, 1994).

Pessoas submetidas a oscilações luminosas constantes podem sofrer mal-estar e fadiga. Por isso não é recomendado nem leitura, nem a visualização de imagens, nem a realização de trabalho sob o fenômeno. Além disso, o *flicker* também estimula o cérebro podendo causar, em casos mais graves, ataques epiléticos e acidentes de trabalho. A Figura 7 demonstra um experimento realizado com voluntários para tentar classificar diferentes níveis de *flicker*, que demonstrou natureza psicofísica de alta complexidade matemática e biológica (DUGAN *et al.*, 2003).

Figura 8 - Resultado do experimento realizado.



Fonte: Dugan et al, 2003, p.317.

O *flicker* pode ocorrer tanto em lâmpadas incandescentes quanto em lâmpadas fluorescentes, porém o modo como ocorre varia para cada fonte luminosa, pois as características de funcionamento e resposta são diferentes.

O fluxo luminoso em lâmpadas incandescentes é dependente da temperatura do filamento contido no bulbo e está diretamente relacionado com a potência dissipada pela carga. Sendo assim, são mais sensíveis a variações de tensão e corrente, exibindo oscilações perceptíveis a olho nu quando em presença de sub-harmônicos causadores de flutuação de tensão.

Lâmpadas fluorescentes, por outro lado, são equipadas com circuitos eletrônicos para diminuir a sensibilidade a pequenas flutuações de tensão. Estes dispositivos não lineares contém um ângulo de ignição para disparo do arco permitindo que a lâmpada forneça luminosidade constantemente. Porém mudanças na forma, no ângulo de fase e na amplitude da onda de tensão de alimentação podem ocasionar o mau funcionamento do dispositivo eletrônico, não ocorrendo o disparo no ângulo de ignição (HANZELKA, 2014).

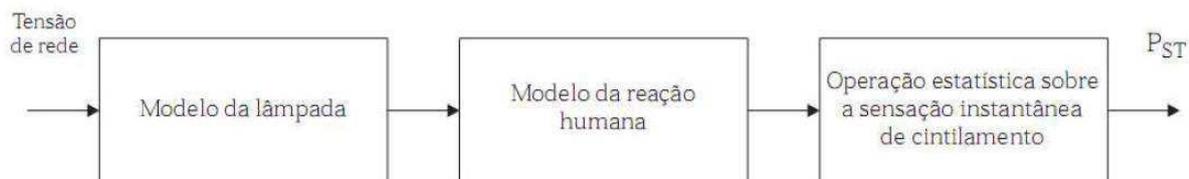
### 2.3 Medição

A medição de efeito de cintilação luminosa é necessária a fim de garantir que os níveis de perturbação estejam de acordo com o estipulado pela norma padrão. Sendo necessária para determinar a emissão de flutuação de tensão pela carga em operação em relação aos valores limites estabelecidos (HANZELKA, 2014).

Segundo afirma Garcia (2010), a metodologia de processamento da tensão que tem como objetivo avaliar os níveis de *flicker* foi proposta pela primeira vez pela UIE (*International Union for Electroheat*) em 1982 e aprovada em 1986 pela IEC. Atualmente o método e as especificação que descrevem como deve ser realizado a medição do efeito *flicker* são descritos pela IEC – 61000-4-15.

O diagrama de bloco do instrumento proposto pelo relatório da UIE, demonstrado na Figura 9, simula a função de transferência envolvendo a cintilação luminosa emitida por uma lâmpada incandescente, a captação realizada pelo olho e a interpretação feita pelo cérebro. Neste sistema, as flutuações de tensão são medidas e processadas a partir de um modelo de que simula a relação entre o fluxo luminoso de uma lâmpada de tungstênio e a reação humana às flutuações de fluxo luminoso expostas. Este processo resulta em uma medida da severidade da cintilação instantânea.

Figura 9 – Diagrama da determinação da severidade de cintilação.

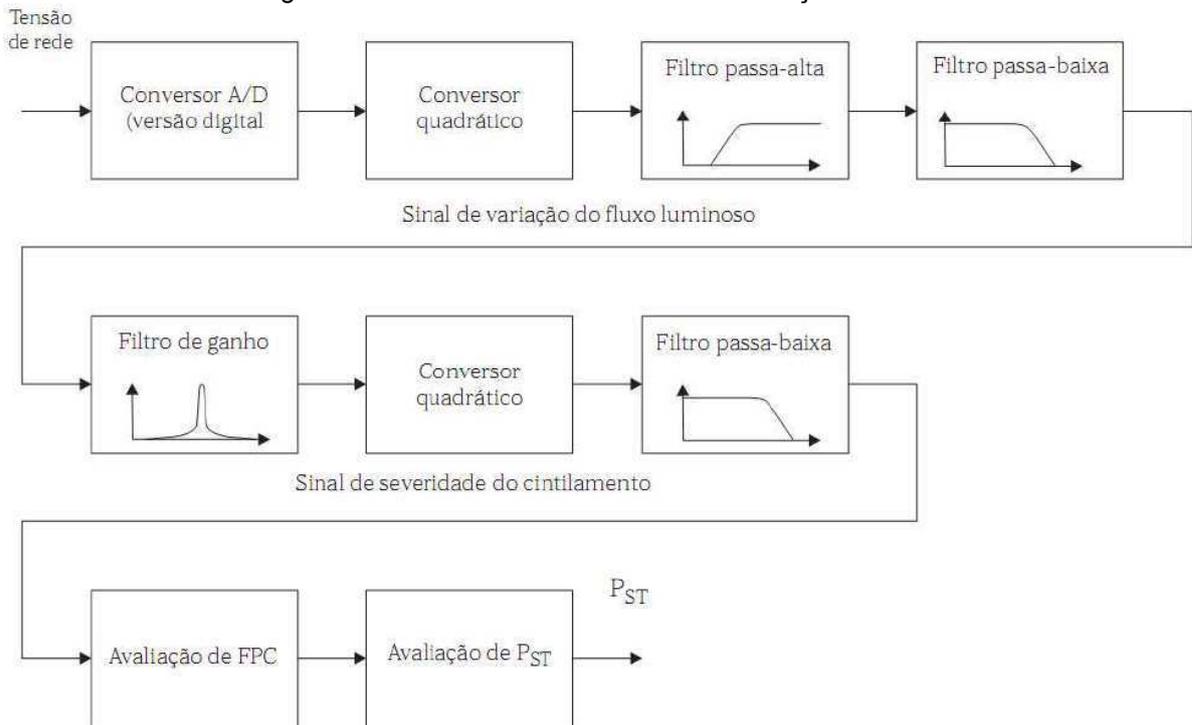


Fonte: Garcia,2010.

Como cada pessoa demonstra reações diferentes para variações do fluxo luminoso, é utilizado um modelo estatístico com base em pesquisas experimentais com grupos de diversos indivíduos e, assim, se obtém o valor do índice de percepção de curta duração, ou  $P_{st}$ .

O diagrama de bloco do instrumento de medição de *flicker* está desenhado na Figura 10 com maior nível de detalhamento. Está ilustrado o esquema proposto pelo documento IEC – 61000-4-15, desde do processamento do sinal de tensão, passando pelos filtros e conversores, até a avaliação estatística do  $P_{st}$  (GARCIA, 2010).

Figura 10 – Estrutura do instrumento de medição de *flicker*.



Fonte: Garcia,2010

Um conversor analógico digital é utilizado somente em implementações digitais do instrumento. O conversor quadrático, em conjunto dos filtros, representa o modelo de uma lâmpada de tungstênio que opera com 60W e a 230 V. Um filtro passa-alta realiza a remoção da componente contínua presente no sinal obtido, uma vez que o importante são os níveis das variações apresentadas pela tensão adquirida, já o filtro passa-baixa representa as propriedades dinâmicas da lâmpada (GARCIA, 2010).

O filtro que representa as reações humanas foi projetado a partir de pesquisas psicofisiológica sobre os efeitos da variação do fluxo luminoso no cérebro humano. Estas pesquisas demonstravam análises sobre o efeito das variações de frequência e da intensidade do fluxo luminoso em seres humanos. O conversor quadrático e o filtro passa-baixa modelam o efeito da fadiga das variações luminosas sobre o cérebro humano a partir da seguinte função de transferência (GARCIA, 2010):

$$K(s) = \left( \frac{\kappa \omega_1 s}{s^2 + 2\lambda s + \omega_1^2} \right) \cdot \left( \frac{1 + \frac{s}{\omega_2}}{\left(1 + \frac{s}{\omega_3}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{\omega_4}\right)} \right) \quad (1)$$

Em que os valores são ajustados de acordo com uma lâmpada incandescente de 60 W e 230 V:

$$\kappa = 1,6357$$

$$\lambda = 2\pi 4,167375$$

$$\omega_1 = 2\pi 9,077169$$

$$\omega_2 = 2\pi 2,939902$$

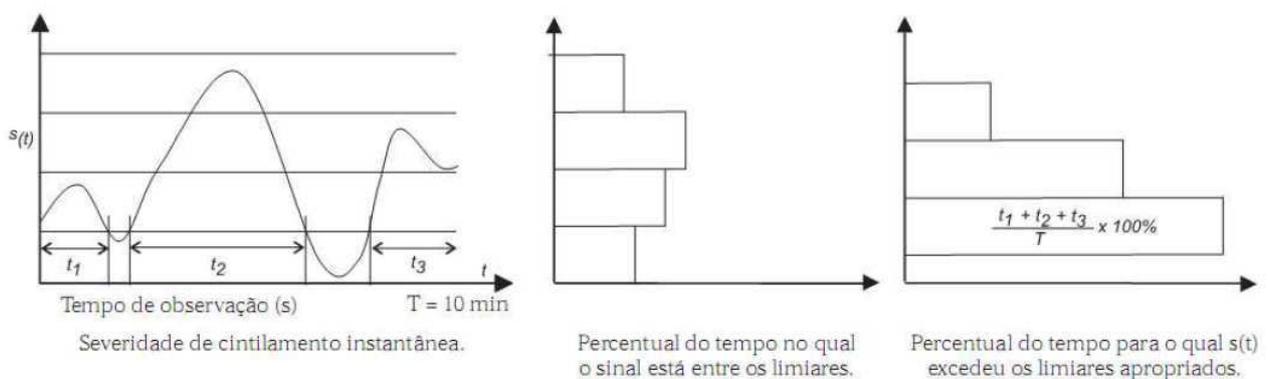
$$\omega_3 = 2\pi 1,394468$$

$$\omega_4 = 2\pi 17,31512$$

Os dois últimos blocos da Figura 10 representam a secção de processamento estatístico dos resultados obtidos após a aplicação de filtros quadráticos e de integradores nos dados obtidos pela Equação 1. O *flicker* deve ser avaliado por um período longo o suficiente de tempo para se assemelhar ao mecanismo de percepção visual. Deve-se, também, assumir que o valor instantâneo do *flicker* variará aleatoriamente dentro de uma larga faixa de valores (devido à natureza aleatória do fenômeno). Por isso a necessidade de um método de análise estatístico, o qual leva em consideração não apenas a intensidade da cintilação como também o tempo de medição. Caso fosse avaliado apenas o valor de pico do *flicker* não seria possível avaliar corretamente a severidade do distúrbio (HANZELKA, 2014).

Através de uma avaliação baseada na Função de Probabilidade Cumulativa (FPC) durante o período de observação, se é calculado o  $P_{st}$ , sendo o modelo do FPC representado na Figura 11 (GARCIA, 2010).

Figura 11 – Processo de avaliação do PST.



Fonte: Garcia, 2010.

O primeiro gráfico representa os níveis da severidade de cintilação instantânea em relação ao tempo dentro de um período de observação de 10 minutos. As linhas horizontais demarcam os limiares pré-definidos utilizados a fim de agrupar as medições de acordo com os níveis de severidade. No segundo gráfico está demonstrado o percentual de tempo no qual o sinal permaneceu entre os limiares de severidade demarcados e no terceiro gráfico está representado a porcentagem do tempo de observação em que os valores instantâneos excedem cada limiar durante o período de observação.

A base de tempo de medição para se determinar os indicadores de *flicker* deveria ser idêntica ao do ciclo de trabalho da carga que causa a perturbação. Porém como na maioria das vezes existe mais de uma carga conectada à rede de alimentação e causando a flutuação de tensão, foi adotado uma medida comum para todos os casos para englobar toda a variação de cargas que podem existir (HANZELKA, 2014).

Na prática são adotados dois intervalos de observação. O período de curta duração consiste em dez minutos, sendo o tempo longo o suficiente para garantir que a curta duração e as variações de tensão fora do padrão não tenham efeito substancial no resultado final obtido, além de ser o suficiente para possibilitar uma descrição detalhada da influência de cargas que causam a perturbação e possuem um curto ciclo de trabalho. Já o período de longa duração consiste em duas horas de observação, sendo um período longo o suficiente para possibilitar análise de cargas industriais de longo ciclo de trabalho, principalmente as de natureza aleatória (HANZELKA, 2014).

### 2.3.1 Índice de Curta Duração

O índice de curta duração é representado pela raiz da soma ponderada dos níveis obtidos pela função de probabilidade de distribuição, representado pela seguinte fórmula:

$$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_{1s} + 0,0657P_{3s} + 0,28P_{10s} + 0,08P_{50s}} \quad (2)$$

Sendo que:

$$P_{1s} = \frac{P_{0,7} + P_1 + P_{1,3}}{3} \quad (3)$$

$$P_{3s} = \frac{P_{2,2} + P_3 + P_4}{3} \quad (4)$$

$$P_{10s} = \frac{P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17}}{5} \quad (5)$$

$$P_{50s} = \frac{P_{30} + P_{50} + P_{80}}{3} \quad (6)$$

Os números indicados no subscrito representam o percentual de tempo no qual foram excedidos os limiares fixados para os níveis de *flicker* em 0,1%; 1%; 3%; 10% e 50% durante o período de observação de 10 minutos, após as amostras serem coletadas (Garcia, 2010). Já o subscrito "s" indica que a medida foi suavizada através das médias dos valores obtidos. Isto é necessário pois em alguns casos pode haver variações abruptas nos valores

de tensão mensurados e, assim, ocorrer uma alteração substancial no indicador do *flicker* de curta duração (HANZELKA, 2014).

### 2.3.2 Índice de Longa Duração

O período de dez minutos, que é a base de tempo para a determinação do indicador de *flicker* de curta duração, é apropriado para a avaliação de distúrbios causados pela operação de cargas individuais. Para o efeito de flutuação de tensão combinado de diversas cargas operando aleatoriamente, é necessário um indicador de longo prazo. Um conjunto de medições do  $P_{st}$  é adotado para resolver este problema (Hanzelka, 2014). Sendo o  $P_{lt}$  definido por:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N (P_{sTi})^3}{N}} \quad (7)$$

No qual:

$P_{sTi}$  representa os valores consecutivos obtido para o índice de curto prazo.

N é o número de períodos de  $P_{st}$  dentro do período de observação de  $P_{lt}$ . Normalmente é realizado o processo para doze períodos, ou seja, 12 medições de  $P_{st}$  (10 minutos) utilizadas para calcular o  $P_{lt}$  (2 horas).

### 2.3.3 Norma Nacional

As normas nacionais que regem os distúrbios de flutuação de tensão estão dispostas no módulo 8 do documento elaborado pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) conhecido como PRODIST (Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) (ANEEL, 2017). O PRODIST é composto por uma série de módulos normativos que visam padronizar as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica nacional. A versão vigente do módulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2017), que referencia distúrbios de tensão, está disponível para livre consulta no site da ANEEL ([www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br)), onde é possível encontrar a versão atual e as anteriores.

A Tabela 1 fornece os valores a serem utilizados para a avaliação do desempenho do sistema de distribuição quanto às flutuações de tensão. Os limites se referem aos valores de  $P_{st}$  superados em apenas 5% das 1.008 leituras validas realizadas. Existem três faixas de delimitação para a classificação do indicador estabelecido, são elas: tensão nominal

abaixo de 1 kV; tensão nominal entre 1 kV e 69 kV; e tensão nominal entre 69 kV e 230 kV. Tais limites são utilizados como referência para o planejamento elétrico em relação à QEE.

Tabela 1 – Limites para cintilação luminosa na rede de distribuição.

Limites de cintilação luminosa			
Indicador	Tensão nominal		
Pst95%	$V_n \leq 1,0\text{kV}$	$1,0\text{kV} < V_n < 69\text{kV}$	$69\text{kV} \leq V_n < 230\text{kV}$
	1,0 pu	1,5 pu	2,0 pu

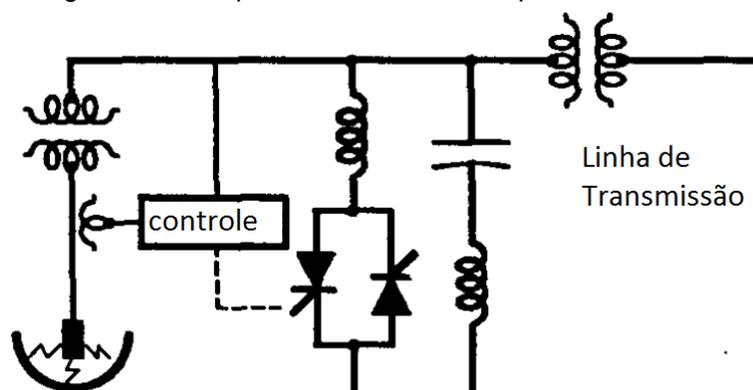
Fonte: ANEEL, 2017.

### 3 TÉCNICAS DE MITIGAÇÃO DA FLUTUAÇÃO DE TENSÃO

A mitigação de flutuação de tensão é um dos problemas relacionados à QEE mais difícil de ser corrigido. Os efeitos negativos desse problema dependem da amplitude de variação da tensão, da frequência de ocorrência e duração dos distúrbios. Estes dois últimos são definidos de acordo com o tipo da carga, que provoca as variações, e a maneira de operação do processo tecnológico envolvido (DUGAN *et al.*, 2003).

Segundo Gyugyi (1993), já foram realizadas diversas tentativas de mitigação da flutuação de tensão com o uso de equipamentos dispendo da eletrônica de potência. O objetivo é atingir a mitigação dos efeitos negativos da carga do FEA no sistema elétrico. A maioria dos equipamentos utilizava um sistema de válvulas formado por tiristores de potência que, através de um sistema de controle apropriado, selecionam conexões variadas de capacitores e indutores em paralelo a serem conectados em paralelo com o forno (Schauder, 1999), como demonstrado na Figura 12.

Figura 12 - Compensador convencional para fornos a arco.



Fonte: Schauder, 1999.

A atuação dos compensadores, em conjunto com filtros passivos de frequência, foi bem-sucedida na correção do fator de potência e na atenuação de alguns componentes harmônicos, porém não foi o suficiente para eliminar o efeito *flicker* (GYUGYI, 1993).

Ainda segundo Gyugyi (1993), o compensador convencional é limitado quanto a sua capacidade de responder rapidamente às oscilações de tensão causadas pela operação de fornos a arco. Para um funcionamento efetivo, o controle utiliza passos discretos largos e se baseia em eventos passados para realizar o disparo futuro dos tiristores, sendo incapaz de apresentar uma resposta imediata as variações.

Outra limitação apresentada foi a incapacidade de compensação da potência real drenada pelo forno, sendo possível compensar apenas potência reativa através do chaveamento de componentes passivos.

Segundo Hanzelka (2014), atualmente, as técnicas de mitigação são focadas na limitação da variação da amplitude de tensão nas linhas de transmissão e distribuição, quando estas sofrem de problemas de flutuação de tensão. Existem dois métodos principais para obter esse resultado. O primeiro tem por objetivo aumentar a capacidade de curto circuito do sistema. Já o segundo em reduzir as variações de potência reativa.

### 3.1 Modificações no sistema

O primeiro método está relacionado com a capacidade do sistema de potência de se manter estável sob a presença de cargas variáveis e de curtos circuitos, sendo esse considerado fraco caso não suporte a potência demandada e apresente distúrbios de tensão e corrente.

Uma solução intuitiva para a mitigação de tensão nesse caso seria equipar ou substituir dispositivos da rede a fim de aumentar a capacidade da potência fornecida e, por consequência, diminuir instabilidades de tensão. Como, por exemplo, realizar a substituição de cabos e transformadores por outros de maior potência, ou aumentar a tensão nominal da rede, ou construir uma linha dedicada para fornecer energia para o grupo de cargas que está causando danos à rede (HANZELKA, 2014).

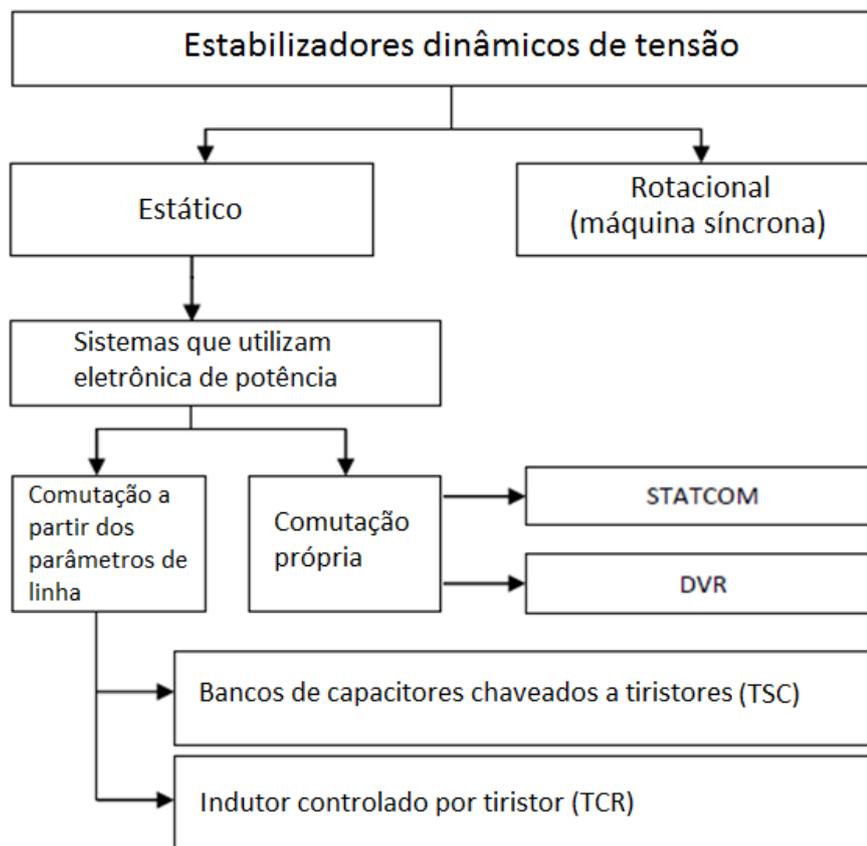
A aplicação de tais soluções, porém, seria impossível de pôr em prática devido ao grande valor que deveria ser investido, ao tamanho excessivamente grande do projeto de obras (levando a uma prolongada interrupção do fornecimento da energia), a mão de obra necessária, bem como a subutilização da capacidade instalada.

### 3.2 Compensadores dinâmicos

O segundo método utiliza de equipamentos da eletrônica de potência que são chamados de estabilizadores dinâmicos de tensão. São soluções viáveis para a eliminação da variação de amplitude de tensão em linhas (e em alguns casos pode melhorar a eficiência dos equipamentos perturbadores). A eficácia do método depende principalmente da entrega da potência reativa e da rápida reação a distúrbios. Contudo, os estabilizadores dinâmicos causam quedas de tensão na rede de alimentação com a injeção de potência reativa na frequência fundamental. A causa da flutuação pode ser tanto capacitiva quanto indutiva, e o dispositivo consegue avaliar e aumentar, ou diminuir, o valor da corrente eficaz como resposta (HANZELKA, 2014).

A Figura 13 mostra diferentes classificações dos estabilizadores dinâmicos de tensão. Estes são principalmente trifásicos, de alta potência nominal, construídos para estabilizar a tensão em um PAC com diversas cargas industriais, ou estabilizar um nó em um sistema de distribuição.

Figura 13 - Classificação dos reguladores de tensão.



Fonte: Hanzelka, 2014, p.78.

A máquina síncrona é considerada a origem da busca por uma solução para estabilizar a flutuação de tensão em redes industriais. Hoje em dia os equipamentos desenvolvidos com base na eletrônica de potência abrangem uma maior variedade de soluções técnicas para estabilizar a tensão (HANZELKA, 2014).

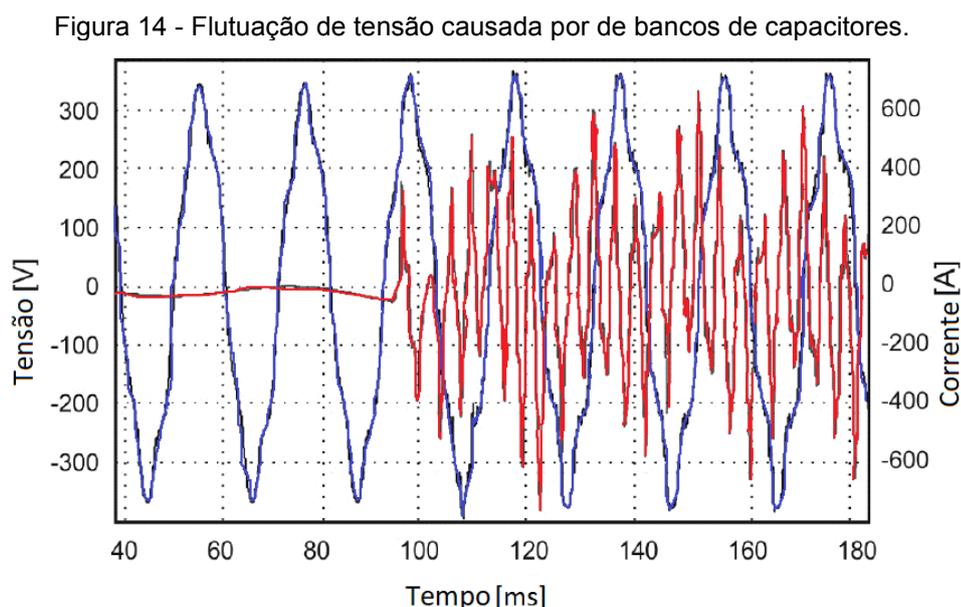
Frente a esse problema, diversos dispositivos estão sendo desenvolvidos para que se tenha uma solução prática, econômica e eficiente para a mitigação da flutuação de tensão. Os principais sendo equipamentos que realizam chaveamento através do uso da eletrônica de potência e a adição de bancos de capacitores em série, ou reatores visando corrigir o excesso de potência reativa (HANZELKA, 2014).

### 3.3 Capacitores em série

Capacitores e reatores em série são utilizados principalmente quando a fonte de flutuação é o FEA. Neste equipamento, quando o ciclo de derretimento se inicia, uma grande quantidade de corrente é drenada da rede, causando um aumento de potência reativa. Os capacitores e reatores em série estabilizam o arco formado para o derretimento do aço, reduzindo as rápidas variações de corrente nesse período e injetando potência reativa no circuito para compensar a indutância das cargas (DUGAN *et al.*, 2003).

As vantagens desse método são a reação instantânea ao fenômeno, corrigindo imediatamente a falta da corrente solicitada, e a redução de harmônicos no lado do fornecimento da energia (concessionária). A compensação, porém, só ocorre do lado da carga, ficando o lado do fornecimento ainda afetado pelo distúrbio. Outra desvantagem é em relação à instalação, a qual é complicada, por ser conectada em série envolvendo a abertura da rede. Além disso, cargas capacitivas em série são muito sensíveis a outros distúrbios, e caso não sejam projetadas e protegidas corretamente, podem causar danos à rede e a outras cargas conectadas (HANZELKA, 2014).

Bancos de capacitores em paralelo, conhecidos como *shunt*, ou em derivação, normalmente são utilizados para manter o nível de tensão nominal e corrigir o fator de potência. Não são indicados quando o objetivo é corrigir as flutuações de tensão. Sua presença pode, inclusive, piorar os efeitos da perturbação aumentando a amplitude, conforme ilustra a Figura 14 (corrente em vermelho e tensão em azul) (HANZELKA, 2014).

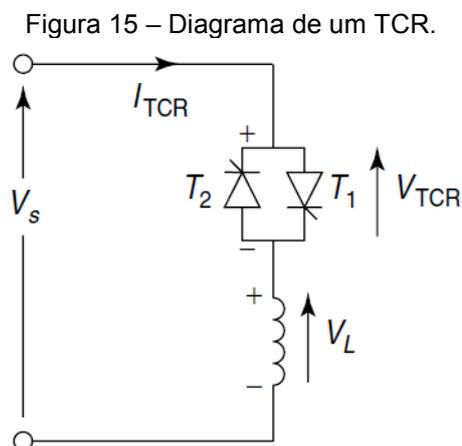


Fonte: Hanzelka, 2014, p. 6.

Os métodos mais populares para corrigir o problema da flutuação de tensão são aqueles que utilizam dispositivos da eletrônica de potência, uma vez que essa tecnologia vem sendo aprimorada e apresentando uma significativa redução dos custos. Tais dispositivos compõem equipamentos como o *Static Var Compensator* (SVC), *Thyristor-Switched Capacitor* (TSC) (Banco de Capacitores Chaveados por Tiristores), *Thyristor-Controlled Reactor* (TCR) (Indutor Controlado por Tiristores), e *soft starters* (Chave de Partida Suave), que se aproveitam da capacidade de chaveamento da eletrônica para realizar operações de controle de tensão e corrente sobre as cargas (HANZELKA, 2014).

### 3.4 O TCR

O TCR é composto de um par de tiristores, conectados em antiparalelo, em série com um indutor sem núcleo, conforme ilustrado pelo Figura 15. O par de tiristores funciona como uma válvula bidirecional, sendo que cada tiristor conduz metade do ciclo da onda senoidal de alimentação, um no semiciclo positivo e o outro no semiciclo negativo (DUGAN *et al.*, 2002).



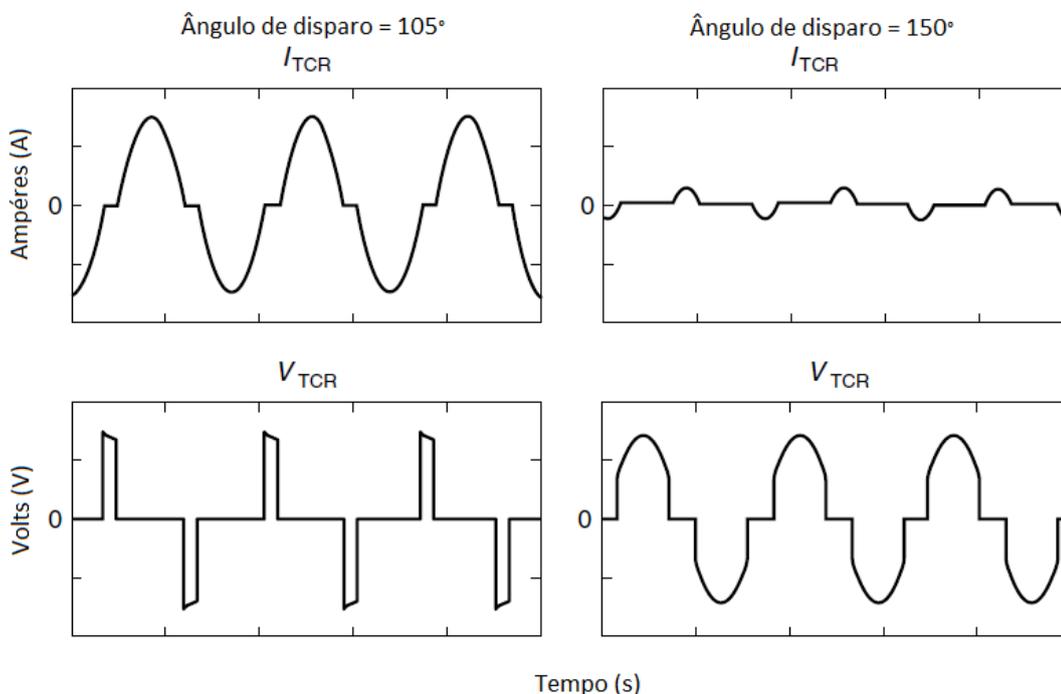
Fonte - Mathur e Varma, 2002, p. 47.

O ângulo de disparo dos tiristores é medido a partir do momento em que a tensão nos terminais altera a polaridade, começando em zero. A faixa de controle do ângulo de disparo varia de  $90^\circ$  a  $180^\circ$ , pois, por ser um circuito indutivo, a corrente está atrasada em  $90^\circ$  em relação à tensão, que realiza o controle da comutação das fases do tiristor.

Para o ângulo de disparo de  $90^\circ$  resulta na condução completa da meia onda senoidal. Conforme o ângulo vai se aproximando de  $180^\circ$ , a corrente flui na forma de pulsos simétricos e descontínuos, localizados tanto na parte positiva, quanto na parte negativa da onda senoidal, como pode ser verificado na Figura 16. Após o disparo, a interrupção do

fluxo de corrente ocorre naturalmente quando a tensão nos terminais inverte a polarização, processo conhecido como “linha de comutação” (MATHUR; VARMA, 2002).

Figura 16 – Ondas de tensão e corrente para diferentes ângulos de disparo.



Fonte - Mathur e Varma, 2002, p. 48.

Ângulos de disparo inferiores a  $90^\circ$  introduzem componentes contínuas na onda, alterando a simetria do resultado da operação. Já para ângulos de disparo iguais ou acima de  $180^\circ$ , não ocorre a condução pelo tiristor. Cada alteração no ângulo de disparo só pode ser implementada no ciclo seguinte de operação.

O TCR age primariamente como uma susceptância variável. A variação do ângulo de disparo altera a susceptância do circuito e, conseqüentemente, varia a quantidade de potência reativa absorvida pelo reator. Para ângulos de disparo superiores a  $90^\circ$ , a corrente se torna não senoidal, ocorrendo a formação de, apenas, componentes harmônicos pares (devido à simetria dos pulsos) (MATHUR; VARMA, 2002).

Ainda segundo Mathur e Varma (2002), para sistemas trifásicos são utilizadas configurações de três TCRs conectados em delta. O modo de funcionamento é similar ao de uma fase. Caso os ângulos de disparo sejam iguais, resultará em pulsos simétricos nos ciclos positivos e negativos de cada meia onda senoidal de tensão, com a manifestação de componentes harmônicos pares. Uma característica própria dessa configuração é a prevenção de harmônicos múltiplos de três na linha de transmissão, ocorrendo a eliminação dentro do próprio sistema.

Em situações reais as condições para operação balanceada podem não ser totalmente satisfeitas. Por exemplo, os indutores podem não ser idênticos, ou os ângulos de disparo podem ter uma discrepância. Esses fatores levam à emissão de componentes harmônicos não característicos, como múltiplos de 3, à linha de transmissão (MATHUR, 1984).

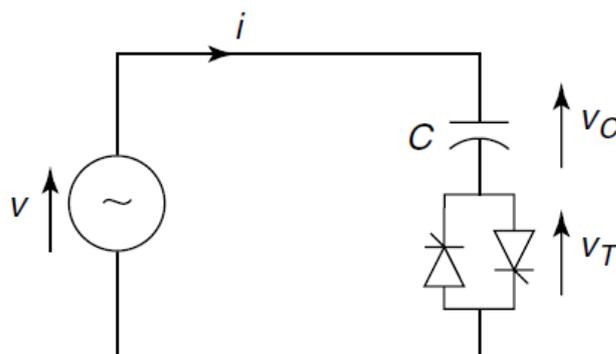
Em situações normais, a magnitude desses harmônicos é insignificante. Porém, podem ser notadas caso ocorram distúrbios maiores, resultando na presença de uma componente contínua que saturará os indutores dos transformadores, emitindo uma maior quantidade de harmônicos à linha de transmissão. Por isso, normalmente, são instalados filtros juntos com os TCR (MATHUR, 1984).

### 3.5 O TSC

O (TSC) é outro dispositivo que utiliza componentes eletrônicos para controlar o fornecimento de potência reativa em um curto período de tempo.

Um TSC básico, de fase única, é composto por um par de tiristores em antiparalelo, que atuam como um interruptor bidirecional, em série com um capacitor (Figura 17) (MATHUR; VARMA, 2002). O chaveamento deste dispositivo eletrônico é responsável pelo controle da potência reativa fornecida a rede em caso de flutuações de tensão (Dugan *et al.*, 2003).

Figura 17 – Configuração básica de um TSC.



Fonte: Mathur e Varma, 2002, p. 72.

Este controle pode ser realizado para as três fases em conjunto, ou para cada fase individualmente. Por isso, este dispositivo pode corrigir problemas de cargas desbalanceadas, além de corrigir a flutuação de tensão (DUGAN *et al.*, 2003).

O capacitor de cada ramo pode ser idêntico ou múltiplo inteiro ao dos outros ramos. O que permite transições suaves entre a ativação de cada conjunto e uma maior capacidade de controle de potência reativa a ser fornecida para cada fase (DUGAN *et al.*, 2003).

Diferentemente do TCR, os capacitores do TSC não podem ser controlados por ângulo de disparo. Sendo assim, os tiristores são disparados em um momento próximo à linha de comutação para diminuir ao máximo possível as oscilações, formando uma corrente senoidal livre de harmônicos, sem a necessidade de filtros de frequência adicionais (MATHUR; VARMA, 2002).

O indutor funciona como um limitador para sobre tensões que podem ocorrer no momento de chaveamento dos tiristores, ou caso ocorra chaveamento no momento errado. Além de servir como um filtro, juntamente com o capacitor, para determinados harmônicos (MATHUR; VARMA, 2002).

### 3.6 O SVC

O *Static Var Compensator*, mais conhecido como SVC, é composto de TCR, tiristores e filtros indutivos. Sua aplicação é muito flexível por ter como principal característica de controle a definição do ângulo de disparo dos componentes eletrônicos. Por isso pode ser utilizado para corrigir diversos problemas, como fator de potência e filtrar frequências indesejáveis (DUGAN *et al.*, 2003).

Segundo Go *et al.* (2010), o SVC é uma tecnologia confiável, utilizado principalmente para compensação em fornos a arco na correção da instabilidade de tensão. Quando acoplado a um sistema com forno a arco, o propósito do SVC é suprir a quantidade deficiente de potência reativa capacitiva faltante a fim de balancear com a potência reativa indutiva criada pelo acionamento do forno e, assim, minimizar flutuações de tensão na rede (ERINMEZ, 2003).

#### 3.6.1 Princípio de Operação

O princípio de funcionamento deste dispositivo consiste em um sensor que realiza a avaliação da tensão de rede e ajusta os disparos dos tiristores para manter a tensão medida estável através do fornecimento controlado da potência reativa armazenada nos bancos de capacitores (DUGAN *et al.*, 2003).

Para que seja possível o controle de potência reativa, o SVC é dotado de um circuito interno composto por dispositivos eletrônicos que realizam o chaveamento síncrono de bancos de capacitores e/ou reatores a fim de conecta-los ou desconecta-los da rede de energia. Criando, assim, uma susceptância variável ajustada em passos de forma a cumprir os requerimentos da falta reativa quando em paralelo (ERINMEZ, 1986).

Ao ocorrer uma flutuação de tensão, a resposta do SVC é determinada pelo ganho transitório na linha e não pelos parâmetros do sistema de potência. Diferente da condição de

estabilidade da tensão na linha e da susceptância do SVC, que serão dependentes das características do sistema no qual está inserido (MATHUR; VARMA, 2002).

Assim que uma flutuação é corrigida, ocorrerá um breve momento de sobre tensão nos terminais do SVC, isto, porém, não afetará o sistema pois o pico de tensão é determinado em ressonância com a tensão alternada (MATHUR; VARMA, 2002).

### 3.6.2 Aplicações

De acordo com o *The Electric Power Research Institute (EPRI)* (1992), o SVC é utilizado em sistemas de potência, primariamente, para o controle de tensão, porém, pode ser utilizado a fim de atingir diversos objetivos em diversos sistemas de potência modernos. Como, por exemplo, para:

- Compensação de tensão, através do controle apropriado do SVC em relação ao fator de potência da carga, é possível fornecer uma tensão constante, mantendo a tensão na barra e atenuando instabilidades;

- Aprimoramento do amortecimento elétrico e do tempo de decaimento das oscilações presentes no sistema, a fim de garantir a transferência de potência estável para as cargas (em um sistema sem amortecimento, as oscilações podem existir por um longo período, mesmo que o sistema esteja estável) (OLWEGARD *et al.*, 1981);

- Estabilização de um sistema sob presença de transitórios através do controle de tensão;

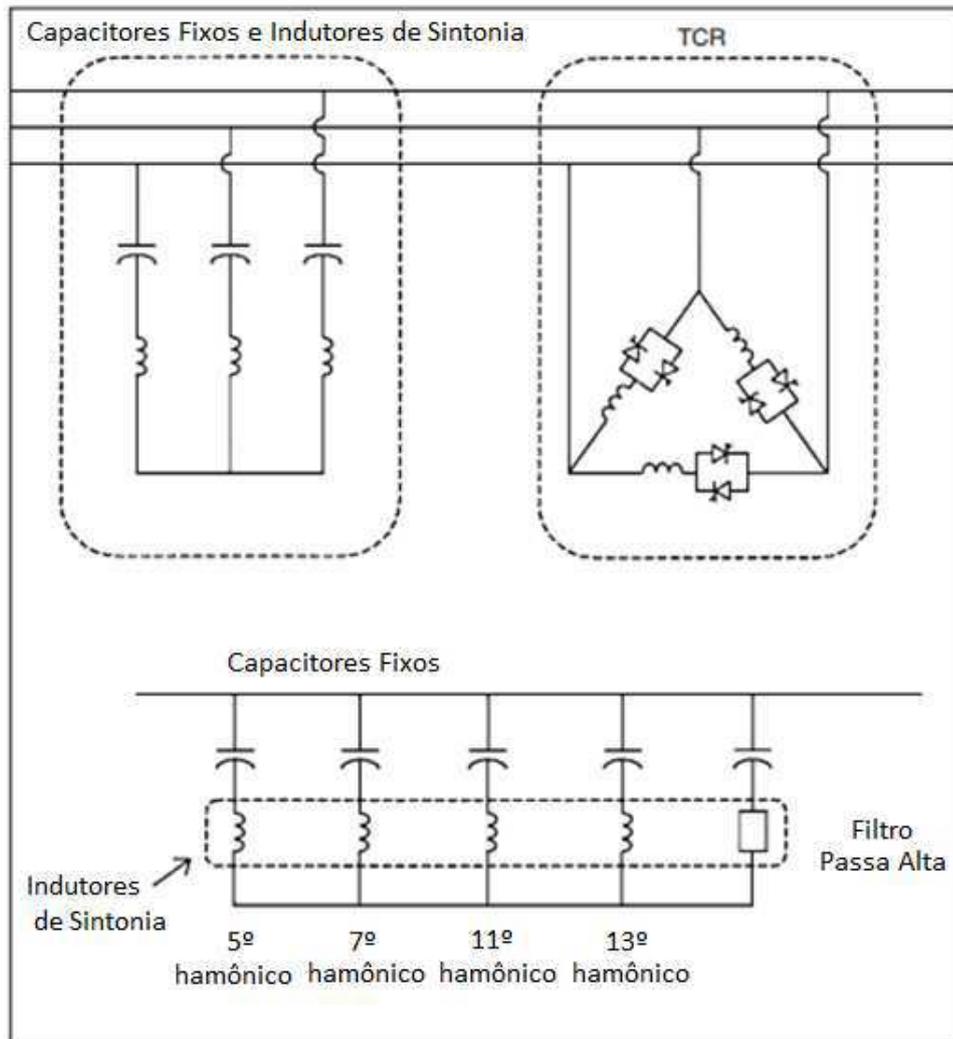
- Aumento da capacidade de transmissão em uma rede de potência (GYUGYI, 1987);

- Aumento da capacidade de manter o sincronismo em uma rede de potência sob efeito de grandes perturbações (MATHUR; VARMA, 2002); e

- Prevenção contra instabilidades na tensão.

Como pode ser observada na Figura 18, a instalação é realizada em paralelo nas redes consideradas fracas ou próxima de cargas industriais afastadas. Normalmente corrigem os distúrbios de cargas industriais que exigem grandes variações de corrente em um curto período de tempo para operação adequada, como elevadores, fornos a arco e prensas elétricas (DUGAN *et al.*, 2003).

Figura 18 - Configuração de um SVC.



Fonte: Dugan *et al.*, 2003,p. 323.

### 3.6.3 Limitações

O SVC convencional possui algumas limitações. Uma delas é a impossibilidade de oferecer uma resposta rápida para o fornecimento de potência reativa requerida pelas mudanças que ocorrem durante os processos de fundição dos materiais, tornando-se incapaz de mitigar completamente as flutuações de tensão causadas pelos fornos a arco. Essa falta de potência aparente causa variações no ângulo de fase, contribuindo com a formação do fenômeno da flutuação de tensão, afetando o restante da rede e os respectivos usuários (KASHANI *et al.*, 2013). Outra desvantagem desse equipamento é o seu alto custo. Porém, a parte composta pelo TCR pode ser substituída por uma série de capacitores. Sendo assim, uma forma mais econômica de cobrir as faltas de reativos previsíveis que podem ocorrer em cada linha (DUGAN *et al.*, 2003).

O desempenho do controle da tensão de linha realizado pelo SVC é altamente dependente de vários fatores, sendo os principais: a ressonância na rede, saturação do transformador, efeitos eletromagnéticos externos e distorção de tensão (*The Electric Power Research Institute Report*, 1992).

A presença do segundo componente harmônico na rede é um dos principais problemas enfrentado pelo SVC durante a operação. A presença do segundo harmônico faz com que apareçam componentes de corrente contínua no sistema, prejudicando o funcionamento correto do SVC. Tais harmônicos podem aparecer após tentativas de correção das flutuações de tensão, ou quando realizada a comutação de transformadores, ou na presença ruídos em sinais de controle ou ainda durante eventos externos (MATHUR; VARMA, 2002).

A ocorrência do terceiro componente harmônico na barra de tensão do SVC causa o desbalanceamento nas correntes trifásicas, levando a má operação dos TCRs, que podem não disparar no momento certo e impedir a condução de corrente. Este fenômeno pode agravar ainda mais os distúrbios na rede de energia, levando um longo tempo até desaparecerem. Para evitar que isso ocorra, normalmente é instalado um filtro em paralelo para o terceiro harmônico em paralelo (MATHUR; VARMA, 2002).

### 3.7 O STATCOM

Durante os anos 80 ocorreu um grande progresso no uso de equipamentos dependentes da eletrônica de potência no âmbito da compensação em redes de potência. Esse avanço se deu pelo desenvolvimento dos tiristores *gate turn-off* (comutável pela porta) (GTO), componentes eletrônicos que apresentam características robustas de comutação, sendo utilizados para construção de inversores de alta tensão. Devido à comutação não depender da tensão de linha eles respondem rapidamente em magnitude e fase (SCHAUDER; GYUGYI, 1995).

#### 3.7.1 Princípios de Operação

O STATCOM é um equipamento de compensação de potência reativa, instalado em paralelo, capaz de gerar ou absorver potência reativa do sistema de energia a fim de controlar parâmetros específicos do sistema elétrico, conforme ilustrado na Figura 19. Ele consiste de um inversor de corrente, componentes eletrônicos de chaveamento e um conjunto de controles de conversão (ERINMEZ, 2003).

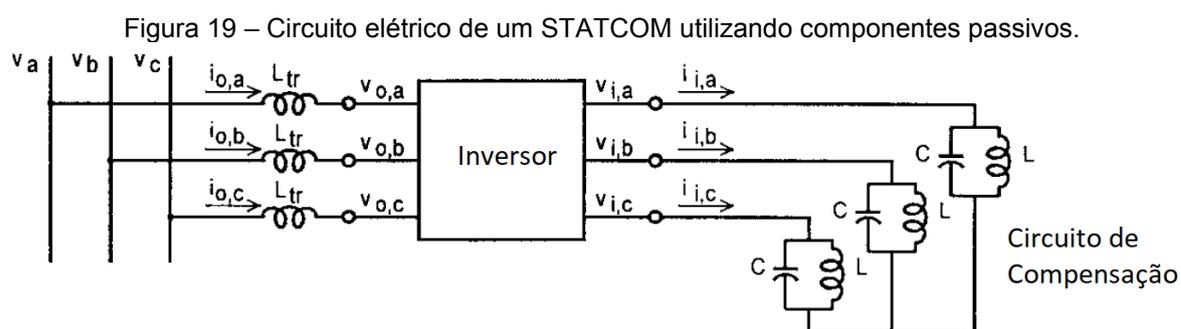
O dispositivo opera como fonte de corrente ou tensão, produzindo potência reativa através da circulação de corrente alternada entre as fases do sistema contínuo, com o

auxílio de capacitores ou indutores, que realizam o armazenamento de potência reativa e permite um controle rápido da tensão trifásica, tanto da magnitude, quanto do ângulo de fase, no ponto de conexão (ERINMEZ, 2003).

O termo estático se refere ao fato do STATCOM ser composto de componentes eletrônicos de comutação e, por isso, não apresenta movimentação. Já o termo compensador síncrono é uma analogia com as máquinas síncronas utilizadas para a compensação da tensão trifásica (ERINMEZ, 2003).

Esses inversores possuem saída senoidal de tensão e podem ser considerados como geradores síncronos de tensão. Na prática podem ser conectados em paralelo, ou em série com a carga, e apresentam certas vantagens, sendo uma das principais a geração de potência reativa nos terminais (SCHAUDER; GYUGYI, 1995).

Segundo Larsen *et al.* (1992), a capacidade do STATCOM de fornecer corrente continuamente e constantemente à linha sob diferentes quedas de tensão é o aspecto principal que faz com que o STATCOM seja semelhante com uma máquina síncrona compensadora em termos de desempenho.



Fonte: Erimez, 2003, p. 2-10.

### 3.7.2 Aplicações

O inversor que compõe o STATCOM é dotado de uma larga banda de frequência para controle que, em conjunto com um circuito de compensação, fornece correntes trifásicas de formas de onda arbitrárias e frequências variadas através de uma indutância acoplada até a rede de energia (KASHANI *et al.*, 2013).

Em casos de flutuações causadas por fornos a arco, o STATCOM pode fornecer a potência reativa faltante, além das componentes não senoidais, desbalanceadas e de variação aleatória das correntes trifásicas (SCHAUDER, 1999).

Segundo Erinmez (2003) as principais aplicações do STATCOM estão relacionadas a:

- Regulação e controle de tensão no caso de faltas de tensão ou sobre tensão;

- Aprimoramento da capacidade estática de transmissão de potência instalada na rede elétrica;
- Aprimoramento da estabilidade pós-transitório ao ocorrer sub ou sobre tensão;
- Amortecimento de oscilações no sistema de potência;
- Balanceamento de fases individuais no sistema;
- Aprimoramento da QEE;
- Mitigação da flutuação de tensão; e
- Aplicações envolvendo armazenamento de energia.

### 3.7.3 Limitações

O STATCOM não possui nenhuma fonte de corrente contínua acoplada nos terminais e, portanto, é incapaz de fornecer ou de corrigir flutuações de potência ativa (SCHAUDER, 1999). Porém, existe a possibilidade de acoplar um capacitor adequado, sendo então possível fornecer potência ativa necessária para amenizar a flutuação causada pelo forno a arco (SCHAUDER; GYUGYI, 1995).

### 3.7.4 Diferenças entre SVC e STATCOM

O modo de operação de um STATCOM é muito diferente daquele de um SVC. Enquanto o SVC opera selecionando as conexões entre os componentes passivos (capacitores ou indutores) e o sistema de potência, o STATCOM é, essencialmente, uma fonte controlada de tensão alternada que, quando conectado à rede, através de uma reatância adequada, e com controle correto, pode caracterizar qualquer forma de corrente como resposta na rede elétrica (SCHAUDER. GYUGYI, 1995). As principais diferenças são:

- O STATCOM é mais robusto e efetivo do que o SVC em questão de fornecer suporte para linhas de transmissão, e em controlar parâmetros específicos do sistema elétrico de potência a fim de aumentar a capacidade de estabilização;
- O STATCOM consegue fornecer corrente capacitiva ou indutiva. A capacidade máxima independe da tensão de linha, diferente do SVC cujo limite máximo de corrente a ser fornecida é dependente da tensão de linha;
- A potência reativa fornecida pelo STATCOM acompanha linearmente as quedas de tensão na linha, enquanto a potência reativa fornecida pelo SVC diminui pelo quadrado do parâmetro mencionado anteriormente (ERINMEZ, 2003);
- O comportamento de um STATCOM é equivalente ao de uma fonte de tensão conectada na linha, em série ou paralelo, por uma reatância de magnitude variável. Já o

SVC apresenta comportamento similar a uma susceptância controlada pela tensão de linha, conectada em paralelo com a rede;

– O STATCOM opera independentemente da tensão da rede e da impedância equivalente no ponto de conexão. Já o SVC é altamente dependente da tensão de linha e da impedância equivalente no ponto de conexão. Isto implica em um cuidado maior no projeto dos parâmetros do SVC para instalações em diferentes pontos de um mesmo sistema de potência. Assim o STATCOM tem um campo de aplicação mais amplo e pode fornecer respostas mais rápidas aos problemas.

### 3.8 Outros Métodos

Outras soluções são aquelas que podem ser aplicadas pelos próprios consumidores para diminuir a magnitude dos distúrbios que seus equipamentos, principalmente os motores elétricos de indução, causam na rede elétrica. Dispositivos que utilizam da eletrônica de potência realizam a partida de um motor com uma quantidade de corrente drenada muito menor que a observada em partidas normais. Menor variação e magnitude de corrente drenada indicam menos oscilações no sistema de potência (DUGAN *et al.*, 2003).

Modificações nas configurações dos motores industriais ligados à rede, como alterações na configuração das bobinas, ou instalar outros dispositivos mecânicos conhecidos por utilizar o método *flywheel*, que entregam a corrente necessária quando mudanças ocorrem no torque de carga, podem ajudar na solução do problema (DUGAN *et al.*, 2003).

## 4 SIMULAÇÃO E RESULTADOS

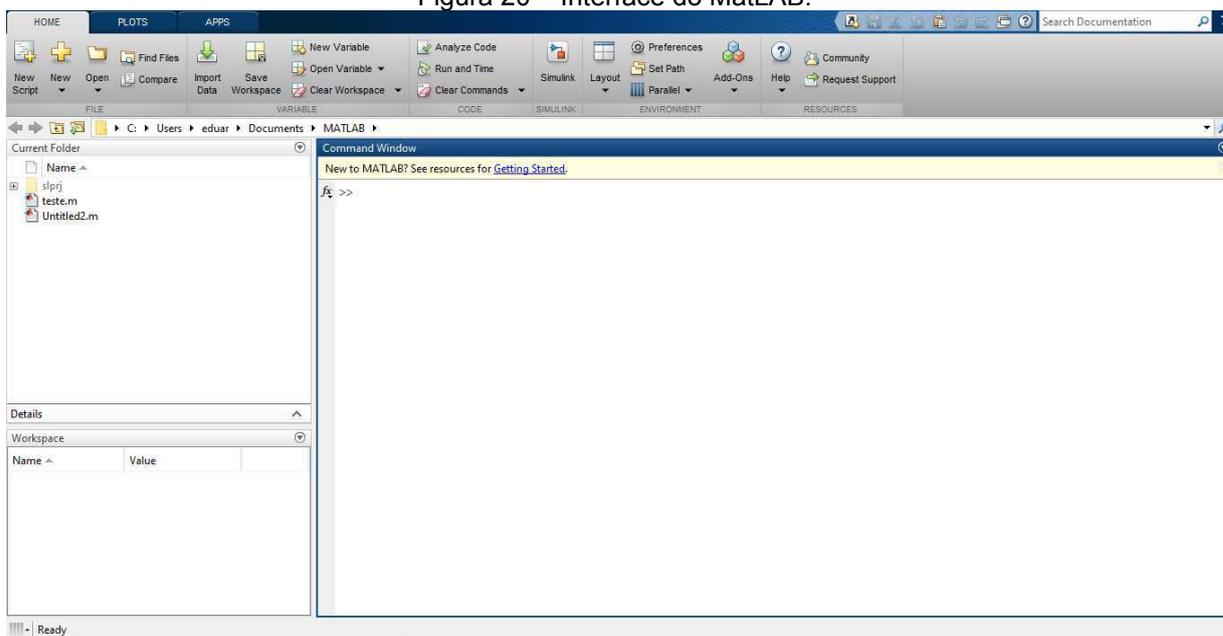
A simulação computacional vem conquistando um espaço de importância relevante em relação às ferramentas de aquisição de conhecimento. Como o aumento da complexidade, surgiu-se a necessidade de utilizar uma abordagem de maior grau sistêmico e generalista. Devido ao rápido aprimoramento da capacidade e velocidade dos recursos eletrônicos e computacionais, está sendo possível a criação de softwares de carácter cada vez mais específico e abstrato. Com o alto nível de desenvolvimento tecnológico, esses softwares estão cada vez mais acessíveis, tanto em relação ao custo quanto em relação à facilidade de uso e, portanto, a simulação tem se popularizado, auxiliando com o fornecimento de resultados importantes (GARCIA, 2010).

A modelagem é um meio de estudar fenômenos complexos e de difícil acesso e visualização. O principal valor provém da melhoria da compreensão humana sobre as características de comportamento de um sistema real. Compreensão esta, que se torna mais efetiva do que a utilizada historicamente através da observação de um sistema em si. Graças ao surgimento destes softwares cada vez mais acessíveis, tanto em termos de custo quanto em facilidade de uso, a simulação tem se popularizado e fornecido importantes resultados.

### 4.1 MatLAB e Simulink

O MatLAB é um *software*, produzido pela MathWorks, que realiza análise iterativa e design de processos a partir de uma linguagem de programação própria que permite expressar e manipular matrizes diretamente. O campo de aplicação é muito amplo, incluindo análise de dados, aprendizado de máquina, visão computacional, processamento de sinal, robótica e sistemas de controle. Na Figura 20 é possível visualizar o ambiente de trabalho (*workspace*) apresentado pelo *software*.

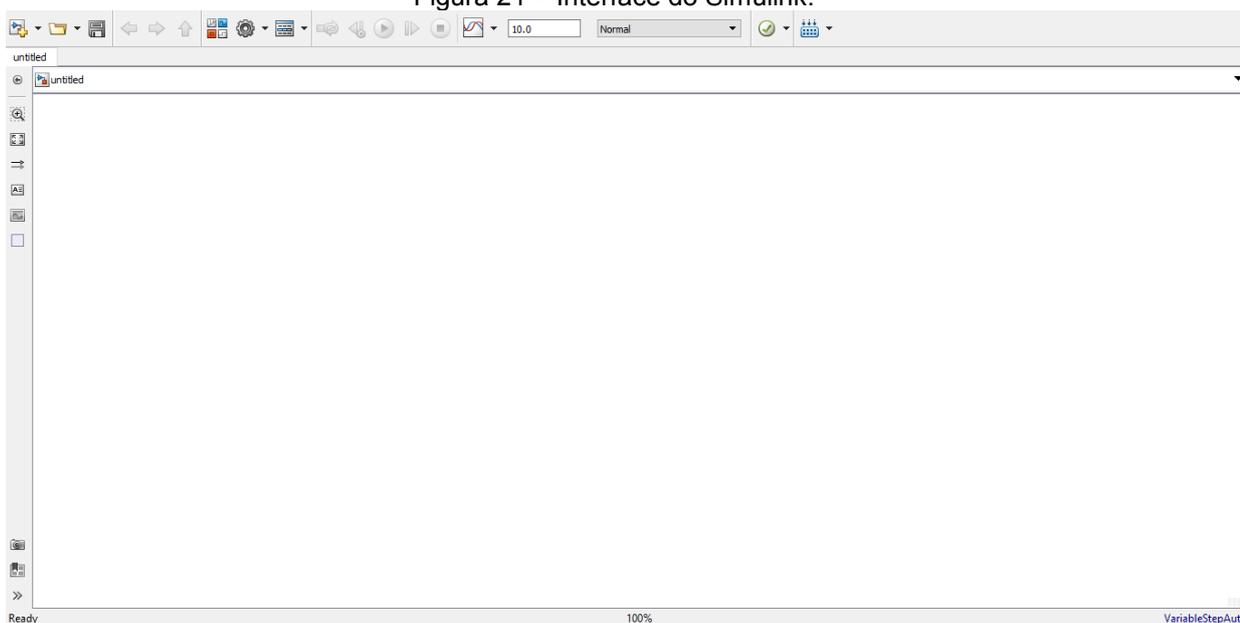
Figura 20 – Interface do MatLAB.



Fonte: MatLAB versão R2016a

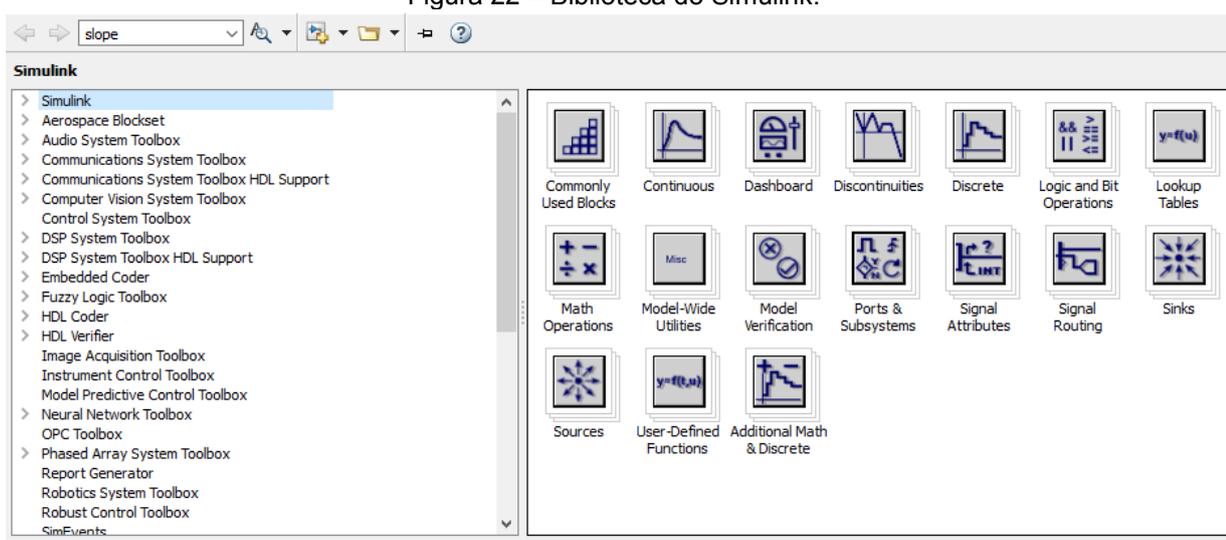
O Simulink é uma ferramenta integrada ao MatLAB que disponibiliza ao usuário um ambiente baseado em diagrama de blocos no qual é possível realizar o design e a simulação de diversos sistemas de engenharia. A ferramenta é composta por um editor gráfico, uma ampla biblioteca customizável e métodos de resolução matemática, os quais permitem a simulação de sistemas dinâmicos. Por ser integrado com o MatLAB, é possível incorporar algoritmos e exportar dados para o ambiente de programação para análises adicionais. Na Figura 21 é possível visualizar o ambiente de trabalho do Simulink e na Figura 22 a biblioteca de blocos pré-definidos disponível.

Figura 21 – Interface do Simulink.



Fonte: MatLAB versão R2016a.

Figura 22 – Biblioteca do Simulink.



Fonte: MatLAB versão R2016a.

Em relação a sistemas de potência, o MatLAB possui uma variada biblioteca composta por diversos componentes elétricos e eletrônicos como: máquinas trifásicas, dispositivos elétricos, transmissores de energia e sistemas de energia renováveis, além de ferramentas de análise de harmônicos, fluxo de carga, entre outras, que auxiliam na análise profunda do sistema projetado.

A escolha deste *software* se deu pela grande aderência, pelo grande número de recursos disponibilizados, assim como pela facilidade de uso e interação com outras plataformas.

## 4.2 Simulação do FEA

A escolha para a solução mais conveniente de compensação da flutuação de tensão causada por um FEA requer a disponibilidade de modelos precisos deste tipo de carga (MONTANARI, 1994). Porém, é de relativa dificuldade obter um modelo matemático que represente a operação exata de um FEA. O motivo para a dificuldade decorre das características estocásticas e caóticas que o processo de fundição apresenta (KASHANI *et al.*, 2013). Em respeito a isso, existe uma variedade de modelos disponíveis no universo acadêmico, como, por exemplo, os apresentados em Bournert (2003), Beites (1998), Bliss (1995) e Burch (2008), cada um com o intuito de simular o comportamento do FAE, tanto operando em condições específicas, quanto em condições generalizadas.

O motivo para o desenvolvimento de um modelo computacional para um FAE é obter um estimador para as características do arco elétrico formado entre os eletrodos e o material metálico durante operação. Com isso em mãos é possível simular em software as diferentes correntes e tensões envolvidas durante o processo de acionamento, fundição e desligamento (WHITE; BHATTACHARYA, 2012).

São necessárias informações fidedignas para que seja possível otimizar os compensadores dentro do projeto. Porém, obter os dados diretamente de um forno a arco em operação é uma tarefa difícil devido as condições extremas presentes nos arredores dos eletrodos, de alta temperatura e de alta tensão (WHITE; BHATTACHARYA, 2012).

Desenvolver um modelo determinístico para um forno a arco é uma tarefa difícil dada a característica estocástica de operação. A corrente drenada pela máquina durante o processo de fundição depende da constituição e da composição física do fragmento metálico a ser derretido, e tais parâmetros serão aleatórios para cada ciclo de descarga (GÖL *et al.*, 2010).

Além disso, o ajuste do *tap* do transformador conectado ao forno pelos cabos de alimentação podem alterar seus valores durante a operação dos eletrodos devido ao ajuste realizado em passos. Portanto não é fácil representar a operação de um FAE através de um modelo matemático estático. Visto que estes modelos não levam em consideração nem mudanças no circuito secundário do forno a arco, nem mudanças específicas durante a operação do equipamento. Demostram apenas aspectos gerais da operação do forno (GÖL *et al.*, 2010).

## 4.3 Modelo

O modelo utilizado para a simulação do comportamento do forno a arco elétrico foi proposto originalmente por Montanari *et al.* (1994), no qual o arco elétrico é representado

por uma resistência não linear e variante no tempo. Também é conhecido como modelo hiperbólico devido a semelhança entre a equação utilizada e a equação hiperbólica, sendo representado pela seguinte relação:

$$v(i) = \left( V_{at} + \frac{C}{D + |i|} \right) \text{sign}(i) \quad (8)$$

Na qual  $v$  representa a tensão dos eletrodos do forno a arco,  $i$  representa a corrente que circula no forno a arco,  $V_{at}$  é o limite de tensão no eletrodo antes do arco elétrico ser formado,  $C$  representa a potência do arco elétrico,  $D$  representa a corrente do arco elétrico e  $\text{sign}(x)$  é uma função do MatLAB que retorna um (1) caso o parâmetro de entrada seja maior que zero, e menos um (-1) caso seja menor que zero.

Este modelo permite a simulação da relação entre a linha de alimentação e do forno a arco, assim como a realização de estudos para instalação de equipamentos de compensação de *flicker*, distorção harmônica, fator de potência e da potência ativa e reativa (MONTANARI, 1994).

As rápidas variações de corrente absorvida pelo FEA durante o ciclo de operação estão relacionadas com as variações do comprimento do arco elétrico, que são formadas basicamente pela mudança de forma do material que está sendo derretido, por forças eletrodinâmicas e pelo deslocamento do eletrodo (MONTANARI, 1994).

A equação matemática hiperbólica adotada, porém, possui duas limitações. A primeira é que a equação considera a simetria entre as características de tensão e corrente, isto leva o modelo a gerar apenas harmônicos ímpares, porém é conhecido que fornos a arco emitem harmônicos pares também. A segunda está relacionada a ao tempo de alternância da tensão dos eletrodos que é negligenciado pelo modelo, resultando em mudanças bruscas na tensão do arco quando a corrente do arco cruza o valor zero.

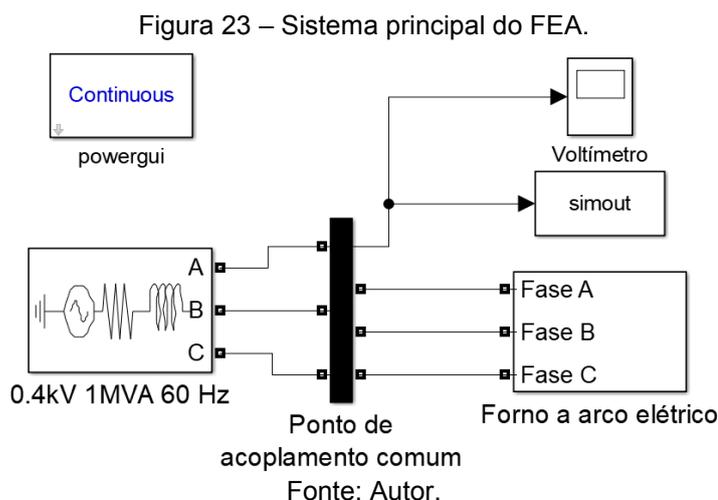
Para o estudo do *flicker* foi utilizado um modelo determinístico para a seleção da frequência de oscilação, nesta abordagem considera-se que o comprimento do arco varia senoidalmente e com frequência constante, determinada anteriormente a simulação. Esta modelagem não representa claramente um forno a arco operando em condições normais, porém tem a vantagem de ser facilmente controlável em uma simulação por computador e necessita de pouco tempo para gerar os resultados (MONTANARI, 1994). O limiar da tensão de disparo será definido como uma fórmula senoidal, representando as oscilações presentes durante a operação, a partir da seguinte equação:

$$V_{at}(t) = V_{at0} [1 + m \cdot \sin(\omega_f t)] \quad (9)$$

Sendo  $V_{at0}$  a tensão no eletrodo quando não há atividade,  $m$  representa a intensidade da perturbação e  $\omega_f$  a frequência da flutuação de tensão.

#### 4.4 Implementação

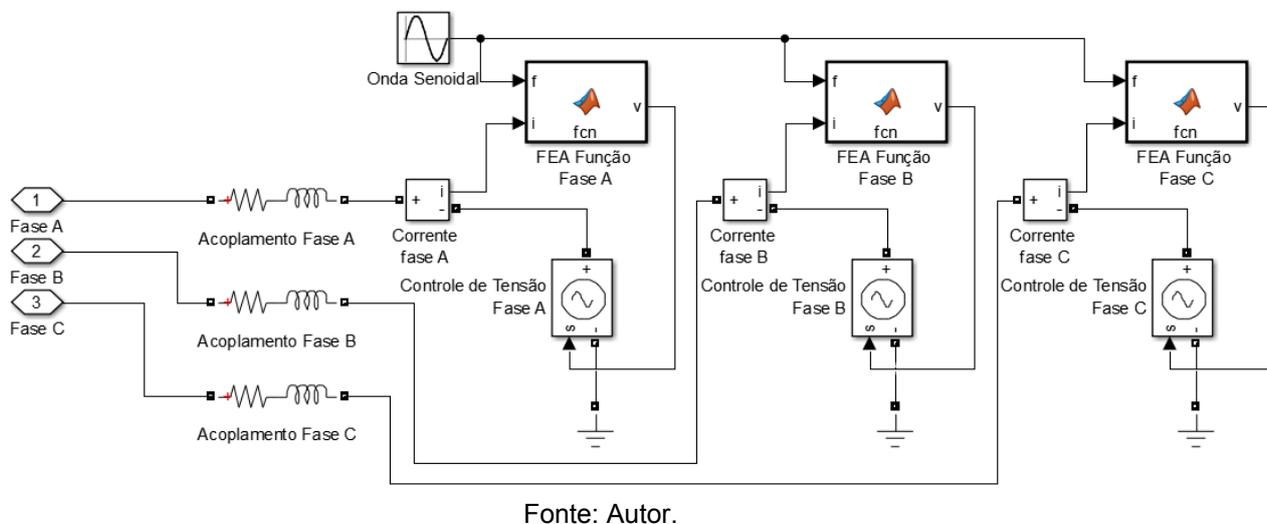
A simulação do forno a arco elétrico foi desenvolvida no ambiente Simulink do software MatLAB (versão R2016a), o diagrama de blocos do sistema principal pode ser verificado na Figura 23. Este esquema promete reproduzir de maneira simples e eficaz as flutuações de tensão causadas por forno a arco em uma rede de distribuição (TAN *et al.*, 2015).



O conceito utilizado para o modelo proposto foi baseado na simulação de Tan *et al.* (2015) e representa o FEA como uma fonte de tensão controlada não linear e variante no tempo. O modelo apresentado consiste de um bloco gerador trifásico de 0,4 kV, 1 MVA operando a 60 Hz que representa a linha de distribuição que alimenta diretamente um forno a arco elétrico. Uma barra realiza a conexão entre o modelo do forno e o gerador trifásico, assim como a conexão de um medidor de tensão, com a finalidade de realizar o monitoramento das tensões instantâneas na barra para futura visualização gráfica, e do bloco *simout* que retornará os valores numéricos instantâneos de tensão para a área de trabalho (*workspace*) do MatLAB em forma de vetores.

A biblioteca disponível no Simulink não possui um bloco pré-definido que simula as características de operação de um forno a arco e, por isso, será necessário construir um modelo utilizando as ferramentas fornecidas pelo ambiente digital. Para isso, foi utilizado um bloco de subsistema (*subsystem*) que possui três variáveis de entrada, sendo elas “Fase A”, “Fase B” e “Fase C”, conforme indicado na Figura 24. O subsistema permite a criação de um modelo hierárquico, adicionando uma segunda camada que irá interagir com os parâmetros selecionados no sistema principal.

Figura 24 – Subsistema do FEA.



No caso do modelo desenvolvido para o FAE, que pode ser verificado na figura 24, cada fase é composta por: um bloco *MatLAB Function*, que permite a manipulação de parâmetros de entrada (corrente e frequência) através de fórmulas matemáticas programadas utilizando a interface e a linguagem de programação do MatLAB e gera um valor de saída (tensão não linear); um amperímetro, que mede os valores instantâneos de corrente e envia para o bloco mencionado anteriormente; e uma fonte de tensão controlada por corrente, que realizará a união do efeito simulado do *flicker* com a onda de tensão da respectiva fase, composta por um indutor de 1mH e um resistor de 0,01 Ohms, que representam a impedância da linha de transmissão. Para o caso em que a frequência da flutuação de tensão é determinada de forma determinística, utiliza-se um bloco gerador de onda senoidal, que está conectado diretamente na entrada dos blocos *MatLAB Function* de cada fase. Nele, será colocado os valores que estabelecem a frequência de oscilação do *flicker*.

Ambas as equações, do modelo hiperbólico e da simulação do *flicker*, demonstradas no item anterior (Equações 8 e 9, respectivamente) estão implementadas dentro dos *Matlab Function*, pode-se verificar as fórmulas em linguagem de programação na Figura 25. Como o bloco senoidal do MatLAB envia os valores do seno com a frequência selecionada para o bloco de função, esta variável é representada pela letra “f” no algoritmo.

Figura 25 – Algoritmos de simulação do FEA.

```
function v = fcn(f,i)
C = 19000;
D = 5000;
m = 0.2;
Vat0 = 200;
vt=Vat0*(1 + (m*f));
v=sign(i)*(vt + (C / (D + abs(i))));
```

Fonte: Autor.

Os parâmetros de controle das características do FEA devem ser baseados em medidas realizadas durante a operação da máquina em uma planta industrial. Porém, consultando pesquisas que utilizaram este modelo sugerem que os valores indicados a seguir simulam as características de tensão e corrente do forno a arco com precisão, são eles:

$$V_{at0} = 200$$

$$C = 19000$$

$$D = 5000$$

$$m = 0,2$$

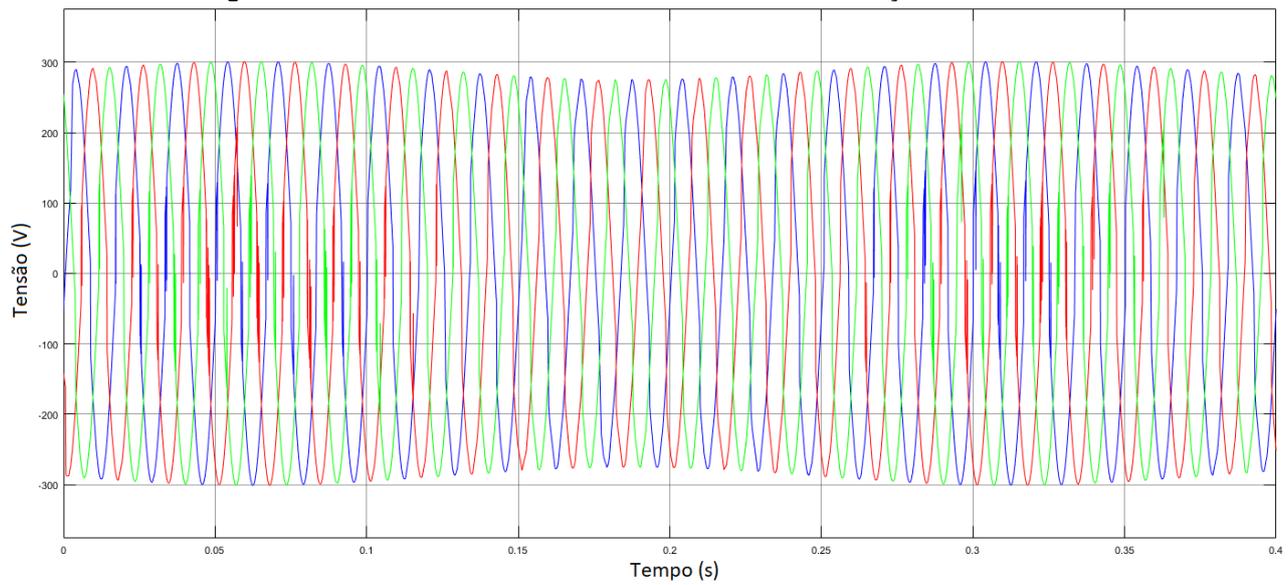
#### 4.5 Resultados

Para a simulação foram utilizados seis valores de frequência, são eles: 25,133 rad/s; 37,699 rad/s; 50,265 rad/s; 62,832 rad/s; 75,398 rad/s; 87,965 rad/s, os quais representam oscilação luminosas de: 4 Hz; 6 Hz; 8 Hz; 10 Hz; 12 Hz; e 14 Hz, respectivamente. Esta faixa foi escolhida pois é a faixa de frequência na qual as oscilações luminosas que causam mal-estar no olho humano (TAN *et al.*, 2015).

A simulação ocorrerá por 0,04 segundos e utilizará como método de solução presente no MatLAB *ode23tb*, que soluciona equações diferenciais de matrizes constantes, conforme demonstrado por Tan *et al.* (2015), este método é responsável por solucionar equações diferenciais ordinárias. No bloco *powergui* é selecionado o método de resolução de circuitos elétricos, para este caso foi escolhido o modo *continuous*, que apresenta resultados com maior precisão.

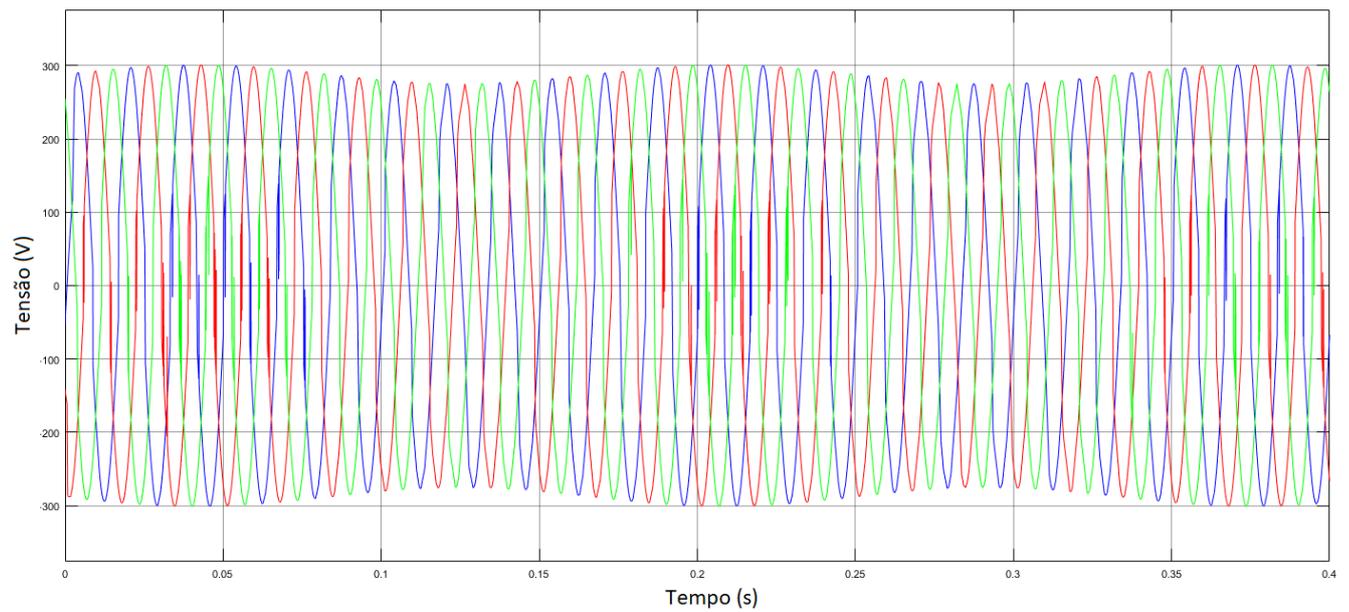
As formas de onda de tensão foram coletadas no PAC da Figura 23. Da Figura 26 a Figura 31 está demonstrado os resultados obtidos para cada frequência de perturbação respectiva escolhida. Pode-se notar os efeitos da flutuação de tensão causadas pelo forno a arco sobre as ondas de tensão fornecidas pela fonte de alimentação.

Figura 26 – Forma de onda de tensão sob efeito de flutuação a 4 Hz.



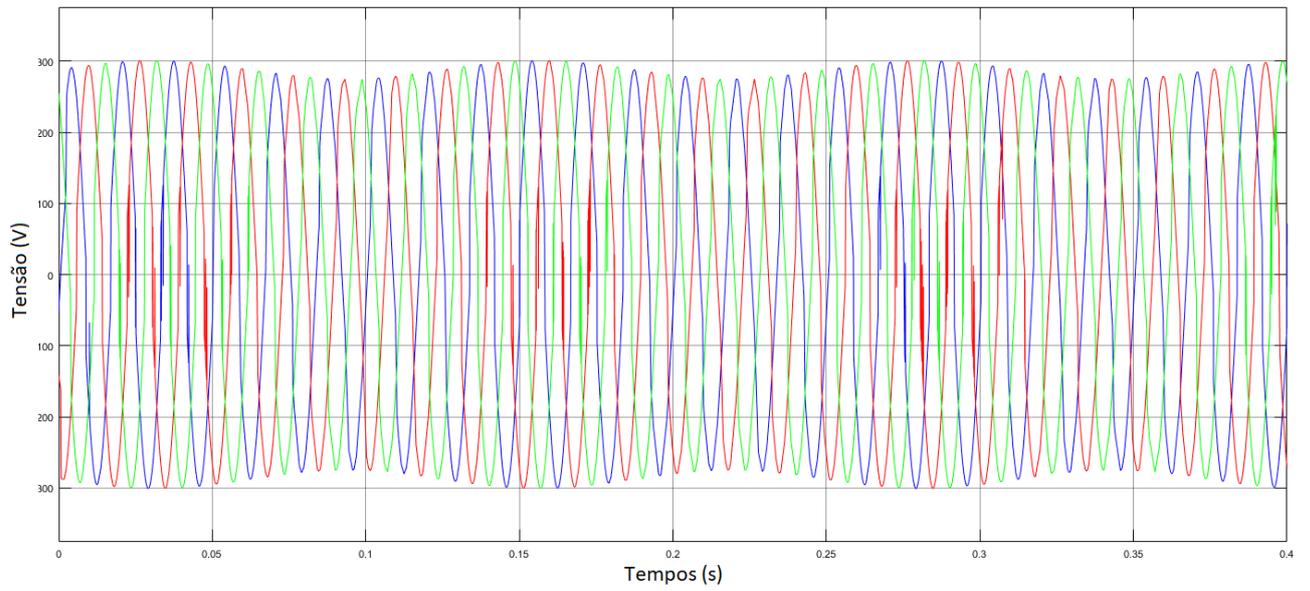
Fonte: Autor.

Figura 27 – Forma de onda de tensão sob efeito de flutuação a 6 Hz.



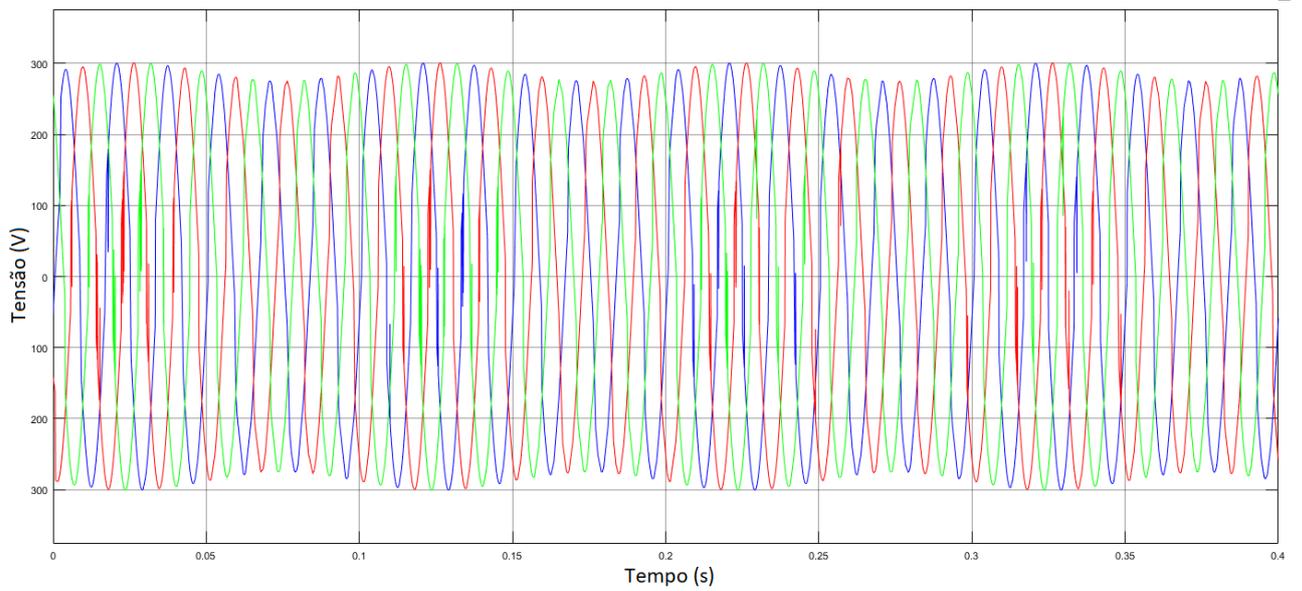
Fonte: Autor.

Figura 28 – Forma de onda de tensão sob efeito de flutuação a 8 Hz.



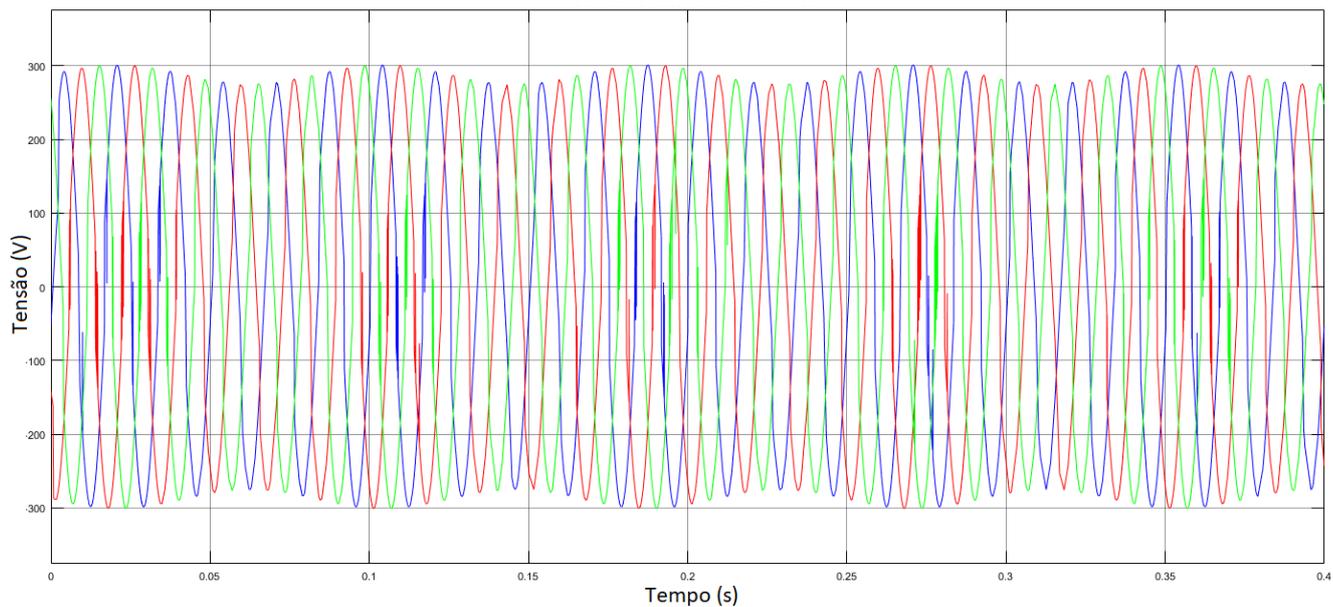
Fonte: Autor.

Figura 29 – Forma de onda de tensão sob efeito de flutuação a 10 Hz.



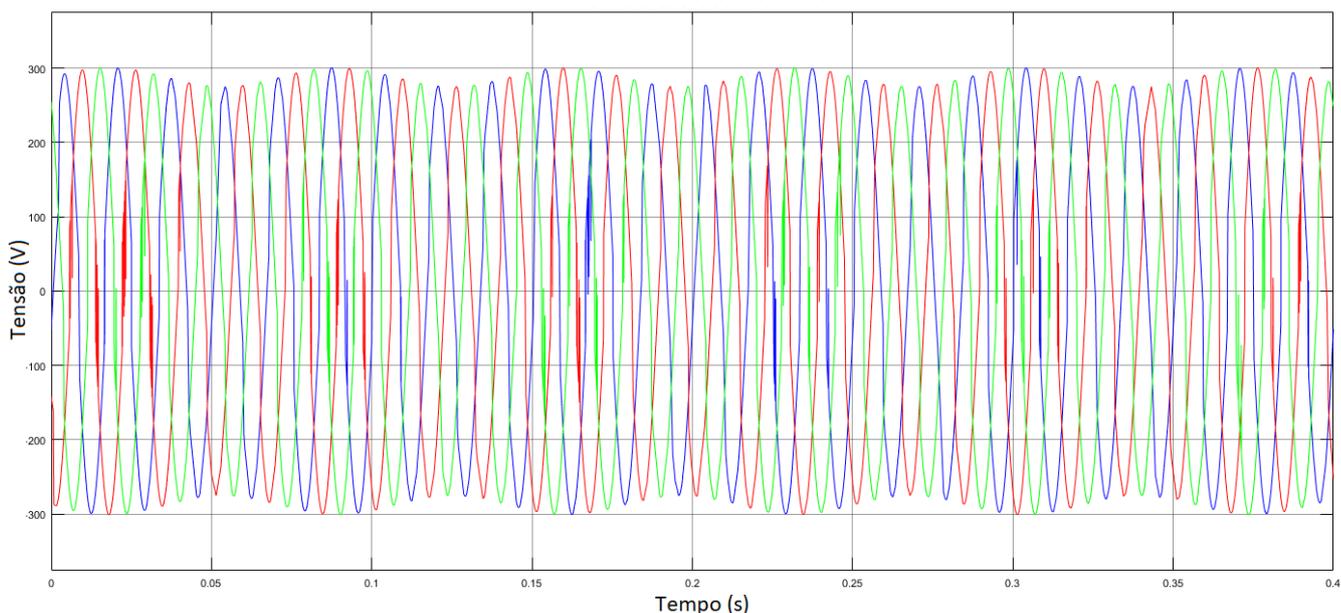
Fonte: Autor.

Figura 30 – Forma de onda de tensão sob efeito de flutuação a 12 Hz.



Fonte: Autor.

Figura 31 – Forma de onda de tensão sob efeito de flutuação a 14 Hz.



Fonte: Autor.

De acordo com a ANEEL (2016), para se traduzir o efeito de cintilação luminosa para o indicador de  $P_{st}$ , deve ser realizado a análise dos sinais de onda de tensão, para isso foi utilizado os valores contidos nos vetores criados pelo *simout* no *workspace* do MatLAB após a simulação.

As tensões passaram pelo algoritmo indicado em Garcia (2010), também para o software MatLAB, que tem como função quantificar o nível de  $P_{st}$ . Este algoritmo segue o diagrama de blocos indicado no índice 2.3.1 e respeita o processo de estimação de  $P_{st}$

proposto pela IEC 61000-4-15. A taxa de amostragem do sinal selecionada é de 8.192 amostras por ciclo, valor indicado por Garcia (2010) como apropriado. A descrição do algoritmo completo pode ser verificada no Anexo I disponível no final do trabalho junto de comentários ao longo que explicam a operação e os métodos contidos.

Os resultados do cálculo do índice  $P_{st}$  no PAC do FEA são calculados individualmente para cada fase e estão demonstrados na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Indicadores  $P_{st}$  (em pu).

Frequência	$P_{st1}$	$P_{st2}$	$P_{st3}$
4Hz	16,966	14,982	12,322
6 Hz	21,982	15,007	14,253
8 Hz	16,159	13,717	14,917
10 Hz	15,109	18,466	12,931
12Hz	14,981	13,899	10,404
14Hz	17,253	10,411	15,626

Os valores obtidos estão muito acima do limite especificado pela ANEEL (2017) para cintilação luminosa (Tabela 1) no que se refere à avaliação do desempenho do forno a arco em relação a qualidade de energia. Porém, como se trata do ponto de acoplamento no qual o FEA está diretamente conectado, estes valores já eram esperados. Sendo assim, a instalação do FEA em uma rede de distribuição, com os parâmetros utilizados neste trabalho, comprometeria as cargas próximas conectadas ao mesmo barramento com níveis críticos de  $P_{st}$ .

## 5 CONCLUSÃO

Este TCC se propôs a estudar especificamente as questões de regulação e flutuação de tensão na barra de alimentação do sistema CA no qual o FAE está conectado. Além disso, estudou as limitações da capacidade dos dispositivos em compensar a flutuação de potência ativa e reativa.

Primeiramente foi exposto o tema da flutuação de tensão no contexto da qualidade da energia elétrica, em que foram exploradas as características, as causas, os efeitos, o método de medição, sempre com ênfase no efeito *flicker* (devido à sua maior popularidade), frente ao distúrbio de flutuação de tensão nas redes do sistema de potência. Assim como foi apresentado os diversos métodos para correção de flutuação da tensão, desde os mais primitivos, utilizando apenas capacitores, até os mais atuais que fazem uso da eletrônica de potência. Notou-se que este tema ainda recebe atenção da comunidade científica devido à ausência de equipamentos que possuam a capacidade de mitigar por completo os distúrbios de tensão que prejudicam as redes elétricas e os usuários finais da energia.

Apresentou-se, também, o forno a arco elétrico, carga industrial de alta potência que, nos dias de hoje, é a principal causadora dos diversos problemas no âmbito de qualidade de energia elétrica devido às características desbalanceadas e não lineares apresentadas. As oscilações rápidas, estocásticas e aleatórias de potência ativa e reativa derivadas da operação durante o processo de fundição causam quedas e flutuação de tensão na barra de alimentação e distorções na forma de onda. Isto afeta o próprio FAE e qualquer carga conectada na rede nas proximidades da planta industrial, reduzindo a eficiência e a vida útil dos equipamentos.

Para a análise, foi realizada uma simulação no ambiente Simulink do MatLAB de um circuito elétrico composto por uma fonte de alimentação e um modelo hiperbólico de um forno a arco elétrico. O método utilizado proporciona a flexibilidade para o usuário criar sistemas de potência mais complexos, compostos por diversos blocos, com um ou mais fornos a arco. O resultado da simulação permite o estudo dos distúrbios que afetam o âmbito da qualidade de energia elétrica, demonstrando o comportamento do fenômeno e as formas de onda de tensão no PCC.

Em seguida tratou-se o sinal de tensão adquirido através de um algoritmo que simula a medição do indicador  $P_{st}$  conforme o método proposto pela IEC 61000-4-15. Tal algoritmo permite a avaliação do  $P_{st}$  para qualquer forma de onda desde que os valores estejam vetorizados no ambiente de trabalho do MatLAB. Ao aplica-lo na forma de onda obtida pela

simulação foi possível verificar que de fato o forno elétrico gera efeito oscilações de tensão críticas, de valores muito acima daqueles estabelecidos pela ANEEL.

Acredita-se que o objetivo deste trabalho de conclusão de curso foi alcançado, uma vez que a simulação proposta foi executada com sucesso. De forma geral, o processo investigativo e os resultados obtidos no desenvolver deste trabalho contribuíram de forma positiva, pois se desenvolveu habilidades analíticas e interpretativas que contribuem para a formação acadêmica e profissional, além de uma exposição mais aprofundada ao tema de qualidade da energia elétrica e aos desafios de flutuação de tensão atualmente correntes nessa área.

## Referências Bibliográficas

ACHA, E.; "A harmonic domain computational package for nonlinear problems and its application to electric arcs", *Transactions on Power Delivery*, IEEE, 1990.

ANEEL; "Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – Módulo 8", disponível em: [www.aneel.gov.br/modulo-8](http://www.aneel.gov.br/modulo-8), acesso em: outubro de 2017.

BAURNETT, J. C.; "Dynamic modeling of the electric arc furnace process using artificial neural networks", *La Revue de Metallurgie, CIT*, 2002

BEITES, L. F.; "Harmonics, interharmonics and unbalances of arc furnaces: a new frequency domain approach", *Harmonics and Quality of Power 8<sup>th</sup> International Conference*, 1998.

BLISS, N. G.; "Neural networks for the high voltage EAF", *5th European Electric Steel Congress*, 1995.

BURCH, R. F.; "Thoughts on improving the electric arc furnace model", *Power and Energy Society General Meeting Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, IEEE, 2008.

*The Electric Power Research Institute (EPRI)*; "Improved Static Var Compensator Control", Preparado por: *General Electric Company (GE)*, 1992.

DUGAN, R. C. *et al.*; "Electrical Power Systems Quality" McGraw - Hill. 2<sup>a</sup> Edição, 2003.

ERINMEZ, I.A.; "Static Var Compensators", publicado por *Working Group 38-10, Task Force No. 2 on SVC*, CIGRE, 1986.

ERINMEZ, I.A.; "Static Synchronous Compensator (STATCOM)" publicado por CIGRE, *Working Group 14, Technical Brochure No 144*, 2003.

GARCIA, M. A.; "A modelagem de cargas especiais (não-lineares) para estudos relacionados à qualidade de energia elétrica via software ATP", EESC-USP, 2010.

GÖL, M.; "A New Field-Data-Based EAF Model for Power Quality Studies", *Transactions on Industry Applications*, vol. 46, IEEE, 2010.

GYUGYI, L.; "Fundamentals of Thyristor-Controlled Static Var Compensators in Electric Power System Applications", *Special Publication Application of Static Var Systems for System Dynamic Performance*, IEEE, 1987.

- GYUGYI, L.; "Dynamic Compensation of AC Transmission Lines by Solid-state Synchronous Voltage Sources", *PES Summer Power Meeting*, IEEE, 1993.
- HANZELKA, Z.; "Application Note Voltage Fluctuations in Power Networks(Flicker)" ECI *Publication*, N. Cu0208, disponível online em: [www.leonardo-energy.org](http://www.leonardo-energy.org), 2014.
- HEYDT, G.T.; "Electric Power Quality", *Stars in a Circle Publication*, 1991.
- KASHANI, M. G.; BABAEI, S.; BHATTACHARYA, S. "SVC and STATCOM Application in Electric Arc Furnace Efficiency Improvement" *4<sup>th</sup> International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*, IEEE, 2013.
- KUNDUR, P.; "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1993.
- LARSEN, E. *et al.*; "Benefits of GTO-based Compensation Systems for Electric Utility Applications", *Transactions on Power Delivery*, IEEE, 1992.
- MATHUR, R. M.; "Static Compensators for Reactive Power Control", *Canadian Electric Association (CEA)*, 1984.
- MATHUR, R. M. E VARMA, R. K.; "Thyristor-Based FACTS Controllers For Electrical Transmission Systems", *IEEE Press*, 2002.
- MONTANARI, G.C. *et al.*; "Arc furnace model for the study of flicker compensation in electrical networks", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1994.
- OLWEGARD, A. *et al.*; "Improvement of Transmission Capacity by Thyristor Controlled Reactive Power", *Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 100, IEEE, 1981.
- SCHAUDER, C. e GYUGYI, L.; "STATCOM for Electric Arc Furnace Compensation", *EPRI Workshop – Providing Quality Power to Steel Producers*, 1995.
- SCHAUDER, C.; "STATCOM for Compensation of Large Electric Arc Furnace Installation", *Power Engineering Society Summer Meeting*, IEEE, 1999.
- TAN, R.H.G. e RAMACHANDARAMURTHY, V.K.; "A Comprehensive Modeling and Simulation of Power Quality Disturbances Using MATLAB/SIMULINK", 2015.
- WHITE, L. W. e BHATTACHARYA, S.; "A single phase PSCAD electric arc furnace model", *Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, IEEE, 2012.

## Anexo I

Algoritmo para o MatLAB que realiza o processo de medição de flutuação de tensão apresentando os índices de Percepção de Severidade de Curta Duração. Disponível em: [fr.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/24423-flickermeter-simulator](http://fr.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/24423-flickermeter-simulator), acesso em: Outubro de 2017.

```
function [P_st, s] = flicker_sim(u, fs, f_line)
% flicker_sim - Flickermeter Simulator according IEC 61000-4-15
%
% [P_st, s, cpf] = flicker_sim(u, fs, f_line)

% This function implements a flickermeter according [1] and [2].
% Requires MATLAB with Signal Processing Toolbox installed or Octave.
% For more information refer to [3].

% Inputs:
% u:    vector of voltage samples
% fs:   sampling frequency of u in Hz (should be >= 2000)
% f_line: line frequency in Hz (must be 50 or 60 Hz)

% Outputs:
% P_st: short term flicker
% s:    instantaneous flicker severity

% References:
% [1] IEC 61000-4-15, Electromagnetic compatibility (EMC), Testing and
%     measurement techniques, Flickermeter, Edition 1.1, 2003-02
% [2] Wilhelm Mombauer: "Messung von Spannungsschwankungen und Flickern mit
%     dem IEC-Flickermeter", ISBN 3-8007-2525-8, VDE-Verlag
% [3] http://www.solcept.ch/en/FlickerSim

% (c) Copyright 2009 Solcept AG
% Distributed under the Boost Software License, Version 1.0. (See accompanying
% file LICENSE_1_0.txt or copy at http://www.boost.org/LICENSE\_1\_0.txt)

%% Configuration
```

```

SHOW_TIME_SIGNALS      = 0; % enable to plot internal signals of flickermeter
SHOW_CUMULATIVE_PROBABILITY = 0; % enable to plot the statistical evaluation of the
instantaneous flicker severity
SHOW_FILTER_RESPONSES  = 0; % enable to plot the filter responses of all internal
filter stages (for model verification)

IS_OCTAVE = exist('OCTAVE_VERSION') ~= 0;

%% Check inputs

if (nargin ~= 3)
    error('Invalid number of arguments');
end

if (~isvector(u))
    error('First input argument must be a vector');
end

% convert to row vector if needed
u = reshape(u, 1, length(u));

if ((f_line ~= 50) && (f_line ~= 60))
    error('Line frequency must be 50 or 60 Hz');
end

if (fs < 2000)
    warning('Sampling frequency should be >= 2000 Hz');
end

%% Block 1: Input voltage adaptor

% remove DC component
u = u - mean(u);

% normalize input (scale with peak-amplitude value)
u_rms = sqrt(mean(u.^2));
u = u / (u_rms * sqrt(2));

```

```
%% Block 2: Quadratic demodulator
```

```
u_0 = u .^ 2;
```

```
%% Block 3: Bandpass and weighting filter
```

```
% bandpass filter
```

```
HIGHPASS_ORDER = 1;
```

```
HIGHPASS_CUTOFF = 0.05;
```

```
LOWPASS_ORDER = 6;
```

```
if (f_line == 50)
```

```
    LOWPASS_CUTOFF = 35;
```

```
end
```

```
if (f_line == 60)
```

```
    LOWPASS_CUTOFF = 42;
```

```
end
```

```
% subtract DC component to limit filter transients at start of simulation
```

```
u_0_ac = u_0 - mean(u_0);
```

```
[b_hp, a_hp] = butter(HIGHPASS_ORDER, HIGHPASS_CUTOFF / (fs / 2), 'high');
```

```
u_hp = filter(b_hp, a_hp, u_0_ac);
```

```
% smooth start of signal to avoid filter transient at start of simulation
```

```
smooth_limit = min(round(fs / 10), length(u_hp));
```

```
u_hp(1 : smooth_limit) = u_hp(1 : smooth_limit) .* linspace(0, 1, smooth_limit);
```

```
[b_bw, a_bw] = butter(LOWPASS_ORDER, LOWPASS_CUTOFF / (fs / 2), 'low');
```

```
u_bw = filter(b_bw, a_bw, u_hp);
```

```
% weighting filter
```

```
if (f_line == 50)
```

```
    K = 1.74802;
```

```

LAMBDA = 2 * pi * 4.05981;
OMEGA1 = 2 * pi * 9.15494;
OMEGA2 = 2 * pi * 2.27979;
OMEGA3 = 2 * pi * 1.22535;
OMEGA4 = 2 * pi * 21.9;
end
if (f_line == 60)
    K = 1.6357;
    LAMBDA = 2 * pi * 4.167375;
    OMEGA1 = 2 * pi * 9.077169;
    OMEGA2 = 2 * pi * 2.939902;
    OMEGA3 = 2 * pi * 1.394468;
    OMEGA4 = 2 * pi * 17.31512;
end

num1 = [K * OMEGA1, 0];
den1 = [1, 2 * LAMBDA, OMEGA1.^2];
num2 = [1 / OMEGA2, 1];
den2 = [1 / (OMEGA3 * OMEGA4), 1 / OMEGA3 + 1 / OMEGA4, 1];
if (IS_OCTAVE)
    [b_w, a_w] = bilinear(conv(num1, num2), conv(den1, den2), 1 / fs);
else
    [b_w, a_w] = bilinear(conv(num1, num2), conv(den1, den2), fs);
end

u_w = filter(b_w, a_w, u_bw);

%% Block 4: Squaring and smoothing

LOWPASS_2_ORDER = 1;
LOWPASS_2_CUTOFF = 1 / (2 * pi * 300e-3); % time constant 300 msec
SCALING_FACTOR = 1238400; % scaling of output to perceptibility scale (according [2])

u_q = u_w .^ 2;

[b_lp, a_lp] = butter(LOWPASS_2_ORDER, LOWPASS_2_CUTOFF / (fs / 2), 'low');
s = SCALING_FACTOR * filter(b_lp, a_lp, u_q);

```

```
%% Block 5: Statistical evaluation
```

```
NUMOF_CLASSES = 10000;
```

```
[bin_cnt, cpf.magnitude] = hist(s, NUMOF_CLASSES);
```

```
cpf.cum_probability = 100 * (1 - cumsum(bin_cnt) / sum(bin_cnt));
```

```
p_50s = mean([get_percentile(cpf, 30), get_percentile(cpf, 50), get_percentile(cpf, 80)]);
```

```
p_10s = mean([get_percentile(cpf, 6), get_percentile(cpf, 8), ...
```

```
    get_percentile(cpf, 10), get_percentile(cpf, 13), get_percentile(cpf, 17)]);
```

```
p_3s = mean([get_percentile(cpf, 2.2), get_percentile(cpf, 3), get_percentile(cpf, 4)]);
```

```
p_1s = mean([get_percentile(cpf, 0.7), get_percentile(cpf, 1), get_percentile(cpf, 1.5)]);
```

```
p_0_1 = get_percentile(cpf, 0.1);
```

```
P_st = sqrt(0.0314 * p_0_1 + 0.0525 * p_1s + 0.0657 * p_3s + ...
```

```
    0.28 * p_10s + 0.08 * p_50s);
```

```
%% Optional graphical output
```

```
% time signals
```

```
if (SHOW_TIME_SIGNALS)
```

```
    t = 0 : 1 / fs : (length(u) - 1) / fs;
```

```
    filter_len = round(10 / 1000 * fs);
```

```
    u_0_m = filter(ones(1, filter_len) / filter_len * 2, 1, u_0);
```

```
figure
```

```
clf
```

```
subplot(2, 2, 1)
```

```
hold on
```

```
plot(t, u, 'b');
```

```
plot(t, u_0, 'm');
```

```
plot(t, u_hp, 'r');
```

```
plot(t, u_0_m, 'c');
```

```
hold off
```

```
legend('u', 'u_0', 'u_h_p');
```

```
grid on
```

```
subplot(2, 2, 2)
hold on
plot(t, u_bw, 'b');
plot(t, u_w, 'm');
legend('u_b_w', 'u_w');
hold off
grid on
subplot(2, 2, 3)
plot(t, u_q, 'b');
legend('u_q');
grid on
subplot(2, 2, 4)
plot(t, s, 'b');
legend('s');
grid on
end

% cumulative probability function
if (SHOW_CUMULATIVE_PROBABILITY)
figure
clf
plot(cpf.magnitude, cpf.cum_probability);
grid
end

% frequency responses of filters
if (SHOW_FILTER_RESPONSES)
[h_hp, f] = freqz(b_hp, a_hp, 4096, fs);
[h_bw, f] = freqz(b_bw, a_bw, 4096, fs);
[h_w, f] = freqz(b_w, a_w, 4096, fs);
[h_lp, f] = freqz(b_lp, a_lp, 4096, fs);

figure
clf
subplot(2, 1, 1)
hold on
plot(f, abs(h_hp), 'b')
```

```
plot(f, abs(h_bw), 'r')
plot(f, abs(h_w), 'g')
plot(f, abs(h_lp), 'm')
hold off
grid
axis([0, 35, 0, 1]);

subplot(2, 1, 2)
hold on
plot(f, 180 / pi * unwrap(angle(h_hp)), 'b')
plot(f, 180 / pi * unwrap(angle(h_bw)), 'r')
plot(f, 180 / pi * unwrap(angle(h_w)), 'g')
plot(f, 180 / pi * unwrap(angle(h_lp)), 'm')
hold off
grid
axis([0, 35, -200, 300]);
end

end % end of function flicker_sim

%% Subfunction: get_percentile
function val = get_percentile(cpf, limit)
    [dummy, idx] = min(abs(cpf.cum_probability - limit));
    val = cpf.magnitude(idx);
end
```