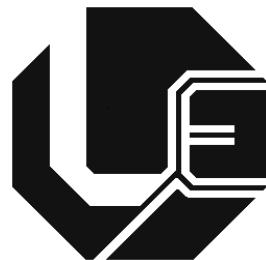

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



**Uma Contribuição para Análise do Fenômeno
das Flutuações de Tensão nos Sistemas
Elétricos de Potência**

Arnaldo José Pereira Rosentino Junior

**Uberlândia
2014**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

**Uma Contribuição para Análise do Fenômeno
das Flutuações de Tensão nos Sistemas Elétricos
de Potência**

Tese apresentada por Arnaldo José Pereira Rosentino Junior à Universidade Federal de Uberlândia para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

BANCA EXAMINADORA:

Antônio Carlos Delaiba, **Dr. – UFU (Orientador)**
José Rubens Macedo Jr, **Dr. – UFU (Coorientador)**
Selênio Rocha Silva, **Dr. – UFMG**
Domingos Sávio Lyrio Simonetti, **Dr. – UFES**
José Carlos de Oliveira, **Ph.D. – UFU**

Uma Contribuição para Análise do Fenômeno das Flutuações de Tensão nos Sistemas Elétricos de Potência

Arnaldo José Pereira Rosentino Junior

Tese apresentada por Arnaldo José Pereira Rosentino Junior à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Prof. Antônio Carlos Delaiba, Dr.
(Orientador) – UFU

Prof. Edgard Afonso Lamounier Jr., Dr.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus queridos pais, Maria Madalena e Arnaldo (Em memória), aos meus irmãos Alex e Henrique, e aos grandes amigos Diogo Carrijo, Mayra Keiko e Mariana Ribeiro Carrijo pela compreensão e incentivos dedicados a mim para realização do mesmo e pela compreensão nos momentos ausentes.

AGRADECIMENTOS

A **DEUS** pelo apoio, por jamais me abandonar perante as angústias e dificuldades, e tornando-me cada vez mais forte para prosseguir na conquista dos meus sonhos.

À pessoa mais cheia de paz, amor e simplicidade, minha mãe **Maria Madalena Soares Rosentino**, que mesmo quando se apresentou com limitações, jamais deixou de me enviar a sua bênção e o seu sorriso, e jamais reclamou de algo, mesmo quando as dificuldades eram maiores que as realizações. E mesmo quando estive tão longe, na figura de **Nossa Senhora Aparecida**, sempre esteve próxima de mim.

Ao meu saudoso pai **Arnaldo José Pereira Rosentino** pelas lembranças de seus ensinamentos, que sempre servirão como um guia à minha trajetória pessoal e profissional.

Aos meus irmãos **Alex Sander Soares Rosentino** e **Henrique Soares Rosentino**, pelo incentivo e pelo orgulho no desenvolvimento desta pesquisa.

À **Murilo Fernandes** e toda sua família, pelo suporte humano dedicado à minha família, nos momentos alegres e tristes.

Aos professores orientadores **José Rubens Macedo Jr** e **Antônio Carlos Delaiba** pelo incentivo, paciência, presteza e compreensão nas etapas desafiadoras deste trabalho, pela orientação segura, pela confiança na minha capacidade de realização, pela amizade e por compartilhar suas vastas experiências profissionais e principalmente humanas.

À **Diogo Ribeiro Carrijo**, **Mayra Keiko**, e **Mariana Ribeiro Carrijo**, que mais do que amigos, reconhecem a importância do desenvolvimento desse trabalho e jamais deixou que eu desistisse na conquista de meus sonhos.

Ao amigo **Isaque Nogueira** pela convivência durante toda minha vida acadêmica, pela contribuição de seus conhecimentos e pelo incentivo na realização deste trabalho.

Aos colegas e amigos da Pós-Graduação **João Areis Júnior**, **Alex Reis**, **Paulo Henrique**, **Afonso Junior**, **Fernanda Hein**, **Ivan Nunes**, **Loana Velasco** e **Thiago Vieira** pelo apoio e amizade.

Aos queridos amigos (as) **Maria Carolina**, **Gil**, **Direne**, **Enzo**, **Eloísa Ribeiro**, **Edésio**, **Leonardo Basílio**, **Lyssa Maeda**, **Jorge**, **Márcia**, **Denner**, **Anderson**, **Lara**, **Vinicius**, **Eduardo**, **Gabriela**, **Gustavo**, **Paulo**, **Priscilla**, **Hero**, que sempre estiveram próximos na minha trajetória pessoal e profissional.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFU, através de seus professores e funcionários, pela oportunidade de crescimento profissional e aprendizado,

especialmente, ao professor **José Carlos de Oliveira** e à secretária de pós-graduação, **Cinara Fagundes**.

À Universidade de Alberta, Edmonton - Canadá, que na pessoa do Professor **Wilsun Xu**, contribuiu de forma significativa para o desenvolvimento desta tese.

À **CAPES** pelo apoio financeiro, o qual possibilitou a realização dessa pesquisa no âmbito nacional, e internacional, através do programa PDSE – Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior.

Enfim, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a viabilização desta tese de doutorado.

RESUMO

No contexto do tema da qualidade de energia elétrica, os estudos de acesso para avaliação de cargas potencialmente perturbadoras representam um dos principais pontos de análise das concessionárias de energia. Tomando-se os principais distúrbios de qualidade de energia, verifica-se que ainda há lacunas para uma análise adequada do fenômeno da flutuação de tensão, visto que o fenômeno em questão ainda é analisado de forma isolada, sem associá-lo com a presença de componentes de frequência inter-harmônicas. Atualmente, os estudos são desenvolvidos conforme os protocolos IEC 61000-3-7 e IEC 61000-4-15. Este último, comumente conhecido como *flickermeter* IEC indica a forma de como quantificar a flutuação de tensão. Devido à inerente relação entre o fenômeno da flutuação de tensão e as frequências inter-harmônicas, constatam-se deficiências no medidor IEC. Os estudos tornam-se ainda mais críticos quando o fenômeno é relacionado com as indústrias siderúrgicas, onde encontram-se instalados os fornos elétricos a arco. Esses equipamentos são uma das principais cargas causadoras das flutuações de tensão, porém devido ao seu funcionamento bastante dinâmico e estocástico, tornam-se cargas difíceis de serem caracterizadas. Dentro deste contexto se insere a presente tese de doutorado, a qual se encontra direcionada ao avanço de estudos adequados para avaliação do fenômeno da flutuação de tensão nos sistemas elétricos de potência. O trabalho de pesquisa aqui contemplado se apresenta com duas contribuições ao presente estado da arte. Uma primeira, associada com a proposta de um modelo computacional simples, prático e preciso de fornos elétricos a arco. E, por fim, o estabelecimento de uma técnica para avaliação e quantificação adequada do fenômeno da flutuação de tensão.

Palavras-Chave: Estudos de Acesso, *Flickermeter* IEC, Flutuação de Tensão, Fornos Elétricos a Arco, Inter-harmônicas.

ABSTRACT

Regarding to power quality issue, the electrical impact assessment due to connection of disturbing installations at power system are essential for the power supply. Among the existing disturbances, the analysis of voltage fluctuation phenomenon presents some deficiencies, since such phenomenon is still evaluated by neglecting the inter-harmonic components. Nowadays, taking into account the voltage fluctuation phenomenon, the requirements for connection of fluctuating loads are performed according to IEC 61000-3-7 guidelines and by considering the IEC 61000-4-15 protocol, which is also called as IEC flickermeter, and it is responsible for quantifying the effect of voltage fluctuation. When the voltage fluctuation is correlated to inter-harmonic components, it can be noted some limitations of flickermeter IEC. The electrical impact assessment at the system becomes even more limited if the analysis is associated to steelmaking industry, employing electric arc furnaces. Such fluctuating loads are the main causes of voltage fluctuations. However, because of their dynamic and stochastic process, it is hard to characterize them. Taking into account such scenario, this research provides advances to perform a more adequate voltage fluctuation assessment than the existing ones. Therefore, it is presented two main contributions for the literature. Firstly, it is proposed a straightforward, useful, and accurate computational model of electrical arc furnace. Then, it is proposed a more accurate methodology than IEC flickermeter for evaluating and quantifying the effect of voltage fluctuation.

Key words: Connection assessment of fluctuating loads, Electrical arc furnaces, IEC flickermeter, Inter-harmonic components, Voltage fluctuation.

SUMÁRIO

Capítulo I

Introdução Geral

1.1 – Considerações iniciais	19
1.2 – Contextualização do tema.....	20
1.3 – Estado da arte.....	23
1.4 – Objetivos e contribuições oferecidas por esta tese	30
1.5 – Estrutura da tese.....	31

Capítulo II

Metodologia Atual para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

2.1 – Considerações iniciais	33
2.2 – Recomendações de acesso conforme a norma IEC 61000-3-7.....	35
2.3 – Estudos de acesso para cargas com variações rápidas de tensão.....	45
2.4 – Procedimento para avaliação da conexão de fornos elétricos a arco.....	46
2.5 – Considerações finais	49

Capítulo III

Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

3.1 – Considerações iniciais	52
3.2 – Conceitos básicos dos fornos elétricos a arco	53
3.3 – Proposta de modelagem.....	67
3.4 – Considerações Finais	87

Capítulo IV

Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

4.1 – Considerações iniciais	89
------------------------------------	----

4.2 – Relação entre o fenômeno de flutuação de tensão e a superposição de componentes inter-harmônicas nos sinais da rede	91
4.3 – Deficiências do Flickermeter IEC	100
4.4 –Análise da variação do fluxo luminoso	115
4.5 –Proposta de uma metodologia para avaliação do efeito <i>flicker</i>	123
4.6 –Considerações Finais	134

Capítulo V

Conclusões

Conclusões.....	137
-----------------	-----

Referências Bibliográficas

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143
----------------------------------	-----

Apêndice

Apêndice

4.1 – Considerações iniciais	89
4.2 – Relação entre o fenômeno de flutuação de tensão e a superposição de componentes inter-harmônicas nos sinais da rede	91
4.3 – Deficiências do Flickermeter IEC	100
4.4 –Análise da variação do fluxo luminoso	115
4.5 –Proposta de uma metodologia para avaliação do efeito <i>flicker</i>	123
4.6 –Considerações Finais	134
A.1 – Aplicação do Protocolo IEC 61000-3-7 – Estudo de caso: Avaliação da conexão de uma máquina de solda trifásica	152

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Procedimento atual utilizado para quantificação das flutuações de tensão.....	34
Figura 2- Curva de P_{st} unitário para aplicações em 230 V e 120 V.....	36
Figura 3 - Procedimento de avaliação de ligação de carga perturbadora de flicker conforme IEC 61000-3-7.....	44
Figura 4 - Exemplo de uma rápida variação de tensão associada com a partida de um motor.	45
Figura 5 - Partes constituintes de um forno a arco [34].....	54
Figura 6 - Sistema elétrico típico alimentando um forno elétrico a arco.....	56
Figura 7 - Diagrama unifilar de alimentação de um forno elétrico a arco.....	57
Figura 8- Processo de operação de um forno elétrico a arco [34].	59
Figura 9 - Comportamento do arco elétrico durante operação do forno elétrico.	61
Figura 10 – Ciclo de operação de um forno a arco [34].	63
Figura 11 - Corrente instantânea no período de perfuração.	64
Figura 12 - Corrente instantânea no período de fusão.....	65
Figura 13 - Corrente instantânea no período de refino.....	65
Figura 14- Sistema de controle de eletrodos.	67
Figura 15 - Sistema elétrico onde está instalado FEA #1.....	69
Figura 16 - Sistema elétrico onde está instalado FEA #2.....	69
Figura 17 - Forma de onda da corrente elétrica instantânea durante processo de fusão da sucata: (a) FEA #1. (b) FEA #2.....	70
Figura 18 - Espectro de frequências da forma de onda da corrente instantânea durante processo de fusão da sucata: (a) FEA #1. (b) FEA #2.....	71
Figura 19 - Corrente elétrica eficaz durante processo de fusão da sucata: (a) FEA #1. (b) FEA #2	72
Figura 20 - Espectro de frequências da corrente eficaz durante processo de fusão da sucata: (a) FEA #1. (b) FEA #2.....	72
Figura 21 – Histograma da corrente eficaz: (a) FEA #1. (b) FEA #2.	74
Figura 22 - Função de auto correlação da corrente eficaz: (a) FEA #1. (b) FEA #2.....	76
Figura 23 - Amostra de medição da corrente instantânea normalizada durante período de fusão do forno.	77
Figura 24 - Metodologia proposta para modelagem do forno a arco.	79
Figura 25 - Processo para ajustar a potência do forno a arco a ser modelado.....	80
Figura 26 - Corrente instantânea simulada durante período de fusão do forno.....	81
Figura 27 - Diagrama unifilar do sistema elétrico modelado para avaliação do fenômeno de flutuação de tensão devido à instalação de um forno a arco.	82
Figura 28 - Tensão eficaz. (a) Barramento #1. (b) Ponto de conexão.....	84
Figura 29 - Potência do forno por fase e total simulada.	85
Figura 30 - Comportamento da frequência de modulação em função da sobreposição de componentes harmônicas e inter-harmônicas.....	92
Figura 31 - Comportamento da modulação do valor eficaz em função da sobreposição de componentes harmônicas e inter-harmônicas.....	92
Figura 32 - Comportamento da modulação do valor de pico em função da sobreposição de componentes harmônicas e inter-harmônicas.....	93
Figura 33 - Circuito utilizado para ilustrar a relação entre o fenômeno da flutuação de tensão e a presença de componentes inter-harmônicas.	94

Figura 34 - Arranjo laboratorial para avaliação de um chaveamento com ciclo de 20 Hz em um circuito puramente resistivo.	94
Figura 35 - Forma de onda da corrente instantânea e corrente eficaz da carga resistiva chaveada.	96
Figura 36 - Forma de onda da tensão instantânea, tensão eficaz e espectro da tensão devido ao chaveamento em uma frequência de 20 [Hz].	97
Figura 37 - Forma de onda da corrente instantânea, corrente eficaz e espectro da corrente no conjunto de lâmpadas devido ao chaveamento em uma frequência de 20 [Hz].	97
Figura 38 - Simulação de um chaveamento com ciclo de 20 [Hz] em um circuito puramente resistivo com a presença de filtros.....	98
Figura 39 - Forma de onda e espectro da tensão devido ao chaveamento de 20 [Hz] com a presença de filtros.....	99
Figura 40 - Forma de onda e espectro da corrente na resistência de 70,6 [Ω]	99
Figura 41 - Diagrama simplificado do flickermeter IEC.....	100
Figura 42 - Variação da magnitude do P_{st} em função da frequência e amplitude da inter-harmônica.	102
Figura 43 - Diagrama elétrico da arquitetura laboratorial implementada para avaliar as limitações do flickermeter IEC.....	104
Figura 44 - Bancada de testes desenvolvida para avaliação das limitações do flickermeter IEC.	105
Figura 45 - Espectro de frequências da tensão para testes nas lâmpadas LI, LFC, e LED.	
Estudo de caso 1: $f_{fonte} = 10$ [Hz], $m = 1\%$	108
Figura 46 - Forma de onda da tensão instantânea para testes nas lâmpadas LI, LFC e LED.	
Estudo de caso 1: $f_{fonte} = 10$ [Hz], $m = 1\%$	109
Figura 47 - Forma de onda da tensão eficaz para testes nas lâmpadas LI, LFC e LED. Estudo de caso 1: $f_{fonte} = 10$ [Hz], $m = 1\%$	109
Figura 48- Espectro de frequências da tensão para testes nas lâmpadas LI, LFC, e LED.	
Estudo de caso 2: $f_{fonte} = 166,5$ [Hz], $m = 8\%$	110
Figura 49 - Forma de onda da tensão instantânea para testes nas lâmpadas LI, LFC e LED.	
Estudo de caso 2: $f_{fonte} = 166,5$ [Hz], $m = 8\%$	112
Figura 50 - Forma de onda da tensão eficaz para testes nas lâmpadas LI, LFC e LED. Estudo de caso 2: $f_{fonte} = 166,5$ [Hz], $m = 8\%$	112
Figura 51 - Espectro de frequências da tensão para testes nas lâmpadas LI, LFC, e LED.	
Estudo de caso 3: $f_{fonte} = 200$ [Hz], $m = 10\%$	113
Figura 52 - Forma de onda da tensão instantânea para testes nas lâmpadas LI, LFC e LED.	
Estudo de caso 3: $f_{fonte} = 200$ [Hz], $m = 10\%$	114
Figura 53 - Forma de onda da tensão eficaz para testes nas lâmpadas LI, LFC e LED. Estudo de caso 3: $f_{fonte} = 200$ Hz, $m = 10\%$	115
Figura 54 - Diagrama elétrico da arquitetura laboratorial para avaliar variação do fluxo luminoso das lâmpadas.....	116
Figura 55 - Bancada de testes desenvolvida para avaliação da variação do fluxo luminoso das lâmpadas.	117
Figura 56 - Curvas de sensibilidade ao efeito flicker baseadas na variação do fluxo luminoso – “Flicker lux meter”	125
Figura 57 - Curva de referência utilizada pelo “flicker lux meter”	126
Figura 58 - Curvas de sensibilidade de referência obtidas por medição e analiticamente.	127
Figura 59 - Procedimento para análise do fenômeno de flutuação de tensão através do indicador P_{lux}	131

Figura 60 - Variação do fluxo luminoso em lâmpadas LFC e LED submetidas a uma variação de 1% de tensão.....	133
Figura A.1 - Sistema elétrico utilizado para aplicação de estudo de caso da IEC 61000-3-7.	152
Figura A.2 - Variação percentual de tensão obtida da curva de Pst unitário.....	155

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites para variações relativas da potência em função do número de variações de tensão por minuto (r)	38
Tabela 2 - Níveis de planejamento para diferentes classes de tensão.	40
Tabela 3 – Valores típicos de coeficientes de transferência.....	40
Tabela 4 - Valores de α	40
Tabela 5 - Limites mínimos para emissão individual de flicker em sistemas MT	41
Tabela 6 - Níveis de planejamento recomendados para variações rápidas de tensão em função do número de variações de tensão em um dado período.	46
Tabela 7 - Comparação de parâmetros estatísticos entre os fornos FEA #1 e FEA #2.....	73
Tabela 8 - Teste de estacionariedade.....	74
Tabela 9 - Principais componentes de frequências harmônicas e inter-harmônicas da corrente no período de fusão do forno a arco.	78
Tabela 10 - Parâmetros do sistema modelado.	83
Tabela 11 - Comparação entre os valores de P_{st} simulados e medidos no Barramento #1.	85
Tabela 12 - Comparação entre os valores de P_{st} simulados e medidos no ponto de conexão..	86
Tabela 13 - Estudos de caso.	107
Tabela 14 - Resultados numéricos associados à análise do	107
Tabela 15 - Resultados numéricos associados à análise do flickermeter IEC - Estudo de caso 2.....	110
Tabela 16 - Resultados numéricos associados à análise do flickermeter IEC - Estudo de caso 3.....	113
Tabela 17 - Análise da variação do fluxo luminoso nas lâmpadas LI, LFC e LED – Estudo de caso 1: $f_{fonte} = 10$ [Hz], $m = 1\%$	118
Tabela 18 - Resultados numéricos associados à análise da variação do fluxo luminoso - Estudo de caso 1.	118
Tabela 19 - Análise da variação do fluxo luminoso nas lâmpadas LI, LFC e LED – Estudo de caso 2: $f_{fonte} = 166,5$ [Hz], $m = 8\%$	120
Tabela 20 - Resultados numéricos associados à análise da variação do fluxo luminoso - Estudo de caso 2.	120
Tabela 21 - Análise da variação do fluxo luminoso nas lâmpadas LI, LFC e LED – Estudo de caso 3: $f_{fonte} = 200$ [Hz], $m = 10\%$	122
Tabela 22 - Resultados numéricos associados à análise da variação do fluxo luminoso - Estudo de caso 2.	122
Tabela 23 - Análise da correlação entre as curvas de sensibilidade obtidas por medição e por cálculo.....	125
Tabela 24 - Análise comparativa de desempenho entre flickermeter IEC e flicker lux meter para lâmpadasa LI, LFC e LED – Estudo de caso 1: $fm = 10$ [Hz], $m = 1\%$	128
Tabela 25 - Análise comparativa de desempenho entre flickermeter IEC e flicker lux meter para lâmpadasa LI, LFC e LED – Estudo de caso 1: $fm = 166,5$ [Hz], $m = 8\%$	129
Tabela 26 - Análise comparativa de desempenho entre flickermeter IEC e flicker lux meter para lâmpadasa LI, LFC e LED – Estudo de caso 1: $fm = 200$ [Hz], $m = 10\%$	130
Tabela 27- Especificações das lâmpadas submetidas em teste para avaliar a característica da variação do fluxo luminoso.	132

Tabela A.1 - Limites para variações relativas da potência em função do número de variações de tensão por minuto (r).....	155
--	-----

LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta V/V$	- Variação relativa de tensão [%]
f_i	- Frequência de intermitência da carga [Hz]
R_s	- Resistência equivalente do ramal de suprimento até o ponto de conexão [Ω]
P	- Potência ativa da carga [W]
X_s	- Reatância equivalente do ramal de suprimento até o ponto de conexão [Ω]
Q	- Potência reativa da carga [VAr]
V_n	- Tensão nominal no ponto de conexão [V]
P_{inst}	- Sensação Instantânea de <i>flicker</i> [pu]
P_{st}	- Indicador de severidade de <i>flicker</i> de curto prazo [pu]
P_{lt}	- Indicador de severidade de <i>flicker</i> de longo prazo [pu]
K	- Relação entre a variação da potência aparente da carga e a potência de curto-circuito no ponto de conexão
ΔSi	- Variação da potência aparente da carga [MVA]
S_{sc}	- Potência de curto-círcuito no ponto de conexão [MVA]
r	- Número de variações de tensão por minuto
$GPst_{MT}$	- Contribuição total máxima de emissão de <i>flicker</i> permitida no barramento MT [pu]
Pst_{MT}	- Nível de planejamento de <i>flicker</i> no sistema de média tensão [pu]
Pst_{m-MT}	- Nível de planejamento de <i>flicker</i> do sistema a montante em média tensão [pu]
TF_{MT}	- Coeficiente de transferência (atenuação) de <i>flicker</i> entre o sistema a jusante e o sistema MT
Pst_{c-MT}	- Nível de <i>flicker</i> relacionado às cargas já existentes no sistema MT [pu]
α	- Constante para estimar nível de emissão de <i>flicker</i>
E_{Psti}	- Limite de emissão de <i>flicker</i> para instalação “ i ” perturbadora, alimentada diretamente do sistema MT [pu]
S_i	- Potência contratada do consumidor “ i ” (carga ou geração) [MVA]
S_{t-MT}	- Capacidade total do sistema MT, considerando previsão de novas cargas [MVA]
S_{t-BT}	- Potência total das instalações supridas diretamente do sistema BT, considerando previsão de novas cargas [MVA]

$GPst_{AT}$	- Contribuição total máxima de emissão de <i>flicker</i> permitida no barramento AT [pu]
Pst_{AT}	- Nível de planejamento de <i>flicker</i> no sistema de alta tensão [pu]
Pst_{m-AT}	- Nível de planejamento de <i>flicker</i> do sistema a montante em alta tensão [pu]
TF_{AT}	- Coeficiente de transferência (atenuação) de <i>flicker</i> entre o sistema a jusante e o sistema AT
Pst_{c-AT}	- Nível de <i>flicker</i> relacionado às cargas já existentes no sistema AT [pu]
S_{t-AT}	- Capacidade total do sistema AT [MVA]
n	- Número de variações de tensão em um dado período
$P_{st95\%}$	- Valor de P_{st} que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos em um período contínuo de medição [pu]
S_{EAF}	- Potência de curto-circuito do forno, supondo os eletrodos tocando a massa fundida [MVA]
K_{st}	- Fator característico de emissão de <i>flicker</i> do forno a arco
K_{120}	- Fator que leva em consideração que o olho humano é mais sensível ao efeito de cintilação luminosa para lâmpadas incandescentes 120 [V] – 60 [Hz]
X_{sc}	- Reatância de curto-circuito da rede de alimentação vista do ponto de conexão [Ω]
X_{EAF}	- Reatância do circuito interno da usina siderúrgica entre o ponto de conexão e a ponta dos eletrodos
X_{tr}	- Reatância do transformador principal da usina siderúrgica [Ω]
X_{ca}	- Reatância dos cabos de ligação, localizada entre o secundário do transformador principal e o transformador do forno [Ω]
X_r	- Reatância localizada do secundário do transformador do forno até a ponta dos eletrodos [Ω]
X_{eff}	- Reatância efetiva de operação do forno em fusão [Ω]
S_{tf}	- Potência nominal do transformador do forno, suposta igual à máxima potência de fusão [MVA]
Z_{cc}	- Impedância de curto-circuito vista do ponto de conexão [Ω]
Z_{t1}	- Impedância do transformador abaixador de tensão da subestação principal [Ω]
Z_L	- Impedância da linha de transmissão entre a subestação principal e a subestação de alimentação do forno a arco [Ω]

Z_R	- Impedância do reator série destinado a completar a reatância total do sistema para uma operação estável do forno (opcional) [Ω]
Z_{t2}	- Impedância do transformador abaixador de tensão de alimentação do forno a arco [Ω]
Z_c	- Impedância de todos os condutores que vão desde o secundário do transformador de alimentação do forno até os eletrodos [Ω]
Z_{tf}	- Impedância dos eletrodos de grafite [Ω]
R_{arc}	- Resistência variável do arco do forno [Ω]
r_j	- Autocorrelação
s_t	- Série temporal
j	- <i>Lag</i> ou atraso
\bar{s}	- Média da série temporal original de n elementos, admitida estacionária
I_{sist}	- Corrente do sistema [A]
I_{FEA}	- Corrente solicitada pela carga [A]
V	- Potencial na carga [V]
U_s	- Fonte de tensão controlada [V]
R	- Resistência de valor constante [Ω]
M	- Controle para variar a corrente da carga
MW_FEA	- Potência do forno a arco a ser modelado [MW]
Sim_FEA	- Potência do forno a arco simulada [MW]
f_m	- Frequência de modulação da tensão [Hz]
f_{IH}	- Frequência da inter-harmônica sobreposta ao sinal da rede [Hz]
f_1	- Frequência fundamental [Hz]
h	- Ordem harmônica mais próxima da componente inter-harmônica
n_{on}	- Número de ciclos “on”
n_{off}	- Número de ciclos “off”
f_{IH1}	- Frequência da inter-harmônica 1 [Hz]
h_{IH1}	- Ordem harmônica mais próxima de f_{IH1}
f_{IH2}	- Frequência da inter-harmônica 2 [Hz]
h_{IH2}	- Ordem harmônica mais próxima de f_{IH2}
f_{fonte}	- Frequência de modulação aplicada pela fonte [Hz]
m	- Amplitude da modulação [%]

$lux_{[c]pu}(f_m)$	- Amplitude da variação do fluxo luminoso [mlx]
c	- Valor que indica a curva de sensibilidade a ser estimada [pu]
$lux_{1,0pu}(f_m)$	- Amplitude da variação do fluxo luminoso, associado a curva de 1,0 pu [mlx]
$lux_{1,0pu}(flux)$	- Amplitude da variação do fluxo luminoso associado à curva de 1,0 pu do <i>flicker lux meter</i> [%]
$flux$	- Frequência da variação do fluxo luminoso [Hz]
a_i	- Coeficiente do polinômio da equação de referência do <i>flicker lux meter</i>
P_{lux}	- Indicador de severidade da variação do fluxo luminoso [pu]
$lux_{med}(flux)$	- Amplitude da variação do fluxo luminoso obtida em medição [%]

CAPÍTULO I

Introdução Geral

1.1 – Considerações iniciais

O termo qualidade da energia elétrica é geralmente usado para descrever a conformidade da onda de tensão em um determinado barramento em relação às necessidades e características das cargas e equipamentos a ele conectadas. Portanto, a compatibilidade elétrica entre acessante e supridor representa um importante aspecto nas análises relacionadas com a qualidade da energia elétrica.

Assim sendo, torna-se fundamental a realização de estudos específicos para avaliação inicial do impacto da conexão de novos acessantes potencialmente perturbadores, de forma a garantir que a conformidade da onda da tensão permaneça dentro dos limites indicados por normas ou demais recomendações no âmbito da qualidade da energia elétrica.

Para o caso específico das flutuações de tensão, as análises do fenômeno em condições reais de operação resumem-se atualmente na realização de medições baseadas no protocolo de medição da severidade de *flicker* definido pela IEC 61000-4-15 [1], tradicionalmente conhecido como *flickermeter* IEC. Contudo, diversos trabalhos recentes [2-10] demonstram as deficiências da utilização desse protocolo nos sistemas elétricos modernos em função, notadamente, das diferentes tecnologias de lâmpadas atualmente utilizadas. Dessa

forma, torna-se necessário o desenvolvimento de uma nova metodologia para quantificação do fenômeno, a qual não esteja fundamentalmente associada à necessidade de quantificação da variação do valor eficaz das tensões de suprimento.

Finalmente, com base nessas premissas, este trabalho tem como objetivo principal a proposição de novas metodologias para avaliação do fenômeno das flutuações de tensão no âmbito dos sistemas elétricos de potência, seja na avaliação preliminar do impacto de novos acessantes ou na avaliação do fenômeno em condições reais de operação.

1.2 – Contextualização do tema

Ao contrário dos estudos associados às distorções harmônicas de tensão e corrente, os quais podem ser realizados através de metodologias simples e bastante difundidas como, por exemplo, estudos de fluxo harmônico, uma análise mais precisa acerca das flutuações de tensão nos sistemas elétricos de potência ainda carece do desenvolvimento de metodologias mais precisas, de forma a representar ou avaliar com mais fidelidade as diversas nuances deste fenômeno. Nesse sentido, as técnicas atualmente disponíveis para análise das flutuações de tensão [11-16], seja a nível de acesso ou operação, apresentam duas deficiências importantes: (i) necessidade de uma melhor caracterização das principais cargas geradoras do fenômeno, com destaque especial para os fornos elétricos a arco e (ii) necessidade de desenvolvimento de uma metodologia mais precisa para quantificação do fenômeno, seja a nível de acesso ou operação.

No que tange às cargas geradoras do fenômeno, os fornos elétricos a arco são os equipamentos mais importantes utilizados pelas siderúrgicas na produção de aço. Todavia, tais equipamentos, especialmente os de corrente alternada,

provocam grandes impactos no sistema elétrico. Nesse contexto, verifica-se a necessidade de desenvolvimento de modelos computacionais simples e práticos para avaliações específicas relacionadas com o fenômeno das flutuações de tensão associado à conexão de fornos elétricos a arco. As características dinâmicas e aleatórias de operação dessas cargas requerem modelos computacionais bastante robustos, dificultando sua utilização prática em sistemas de potência. Em relação aos estudos de acesso, os poucos modelos de fornos a arco existentes na literatura não são muito práticos sob ponto de vista de aplicação.

Conforme já mencionado, no que se refere à quantificação da flutuação de tensão, utiliza-se atualmente a metodologia internacional recomendada e publicada pela IEC, a qual compõe o protocolo IEC 61000-4-15, comumente conhecido como *flickermeter* IEC [1]. Em linhas gerais, a metodologia proposta pela IEC leva em conta a interação da tensão flutuante com o sistema lâmpada/olho/cérebro, resultando em um sinal denominado de Sensação Instantânea de *flicker* (P_{inst}). Esse sinal, armazenado por um tempo determinado (tipicamente 10 minutos), é submetido a um tratamento estatístico, do qual se obtém um valor numérico denominado de Indicador de Severidade de *flicker* de Curto Prazo (P_{st}), também conhecido como nível de *flicker* emitido. De uma sequência de doze valores consecutivos de P_{st} , calcula-se o chamado Indicador de Severidade de *flicker* de Longo Prazo (P_{lt}). Não obstante, nota-se em muitos casos que os valores de P_{st} e P_{lt} excedem os valores de referência sem que haja qualquer incômodo ao consumidor final, conectados às redes elétricas de baixa tensão (BT) [17]. Existem algumas explicações para essa baixa correlação entre os níveis de *flicker* medidos e o incômodo percebido pelo consumidor final conectado em baixa tensão:

- Há uma atenuação significativa do índice P_{st} entre os barramentos EAT/AT, onde instala-se o medidor, e o barramento BT, onde há a percepção direta do fenômeno através dos sistemas de iluminação;
- As lâmpadas de tecnologias mais modernas, já disseminadas na maioria das residências, podem ser significantemente menos sensíveis às flutuações de tensão do que as convencionais lâmpadas incandescentes, nas quais se baseiam o protocolo IEC [17] [18].

Há ainda casos em que os valores de P_{st} e P_{lt} estejam abaixo dos valores de referência e, ainda assim, constata-se algum tipo de impacto relevante [4]. Este cenário é justificado pelo fato do fenômeno da flutuação de tensão ser analisado de forma isolado, sem associá-lo com a presença das componentes inter-harmônicas. Vale ressaltar que há uma inerente relação entre estas duas perturbações [2-6, 8]. Assim, surgem duas novas questões quanto à atual metodologia de quantificação do fenômeno:

- Verifica-se que há deficiências no *flickermeter* IEC quando da presença de elevadas componentes de frequências inter-harmônicas de tensão;
- Uma vez que esses fenômenos são inter-relacionados, além do efeito de cintilação luminosa, outros mais relevantes devem ser investigados, como por exemplo, redução da rigidez dielétrica dos capacitores, utilizados em fontes chaveadas de inúmeros dispositivos eletrônicos, vibração em máquinas rotativas, etc [19-21].

À luz desses esclarecimentos, verifica-se a necessidade de se buscar novas técnicas para quantificação do fenômeno das flutuações de tensão.

1.3 – Estado da arte

Após pesquisas e estudos da bibliografia atual encontrada pelos meios tradicionais de acesso, obteve-se um conjunto de informações sobre os mais distintos trabalhos de pesquisa e avanços do conhecimento no âmbito do fenômeno das flutuações de tensão.

De um modo geral, os documentos atrelados com a bibliografia consultada sobre o tema em pauta podem ser reunidos nas seguintes grandes áreas:

a) Requisitos dos estudos de acesso para avaliação do fenômeno das flutuações de tensão

De uma forma geral, os estudos de acesso necessários para avaliar os indicadores de desempenho de qualidade da energia elétrica são dispostos através de contratos entre os diversos acessantes e as concessionárias de distribuição ou transmissão. No âmbito do fenômeno das flutuações de tensão, a maioria desses estudos são fundamentados nas recomendações indicadas pela 61000-3-7 [11]. As análises em sistemas elétricos mais complexos devem ser baseadas em simulações computacionais, incluindo o protocolo IEC e modelos adequados das cargas perturbadoras [16]. No que se refere particularmente aos estudos de acesso para parques eólicos, muito embora algumas situações práticas revelem que esse tipo de acessante não promove um impacto relevante em relação ao fenômeno das flutuações de tensão [22-27], os critérios específicos para estudo podem ser encontrados na IEC 61400-21 [28]. No que tange à regulamentação nacional, o

acesso ao sistema de transmissão brasileiro é regulamentado pelos documentos que constituem o Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Transmissão dos Procedimentos de Rede [14]. A definição de critérios para a realização de diversos tipos de estudos que envolvem o acesso, ampliações ou reforços, planejamento e operação de instalações à rede básica é realizada no Módulo 23 – Critérios para estudos dos Procedimentos de Rede [15]. Nesse contexto, destaca-se o submódulo 23.3 – Diretrizes e Critérios para estudos elétricos, o qual apresenta os requisitos a serem considerados para a avaliação das flutuações de tensão [13]. Por fim, cita-se também o documento [12], o qual detalha os estudos para acesso de fornos elétricos a arco e centrais eólicas.

b) Características elétricas e propostas de modelagem dos fornos elétricos a arco

Antes de propor qualquer modelo de forno elétrico a arco, bem como indicar as desvantagens das modelagens já existentes, há necessidade de uma pesquisa direcionada às definições e conceitos básicos desse tipo específico de carga. Os trabalhos que nortearam esse conhecimento podem ser encontrados em [29-34].

No que se refere à caracterização computacional desse equipamento, verifica-se que há diferentes técnicas para este fim, as quais, de uma forma geral, podem ser classificadas em:

- **Método analítico:** Em [11, 35] pode ser encontrada uma equação empírica para calcular o indicador de P_{st} em decorrência da conexão de fornos a arco, a qual foi desenvolvida através de medições de *flicker* realizadas no passado. As desvantagens desse método analítico é que

o mesmo introduz constantes numéricas que são muito conservativas e podem levar a significantes diferenças entre os valores calculados e medidos. Assim, tem-se buscado desenvolver modelos mais precisos para estudos de planejamento envolvendo fornos elétricos a arco;

- **Aproximações determinísticas:** Em [36-38] o forno elétrico a arco é modelado sob uma base determinística, a qual se sustenta no fato de que o efeito *flicker* causa uma variação na tensão eficaz em uma faixa de frequência entre 0,5 e 25 Hz. Dessa forma, considera-se que o arco elétrico varia periodicamente de forma senoidal, com frequência próxima de 8,8 Hz (ponto de maior sensibilidade do olho humano ao efeito *flicker*). Nota-se que as aproximações determinísticas não representam fielmente a operação dinâmica do forno, ou seja, os modelos são caracterizados apenas por modulações senoidais, com amplitude e frequência fixa. Assim, com o objetivo de descrever o comportamento variável no tempo, não periódico e não linear do forno a arco, os modelos mais atuais têm se baseado em teoria estocástica ou caótica;
- **Aproximações estocásticas:** No que tange os modelos definidos sob uma base estocástica, em [39] os autores desenvolveram um modelo prático, porém limitado, visto que o foco do trabalho se encontra fundamentado na mitigação do fenômeno de flutuação de tensão, e não na modelagem fiel da carga. Dessa forma, o modelo possui um resistor e um reator variando aleatoriamente, objetivando simular a variação dinâmica da potência ativa e reativa causada pelo forno a arco. As variações de amplitude da tensão produzidas por tal modelo são da

ordem de 0,3 a 1% com uma frequência fixa de aproximadamente 5 Hz. Em [40-43], o arco elétrico é modelado de acordo com a característica V-I simplificada do forno a arco. Em seguida, o comprimento do arco é sujeito a uma variação senoidal, com frequência dentro da faixa típica do efeito *flicker*, ou seja, entre 0,5 e 25 Hz e considera-se que a variação no tempo do comprimento do arco seja aleatória. Para tanto, utiliza-se um sinal aleatório com média igual a zero e com uma faixa de frequência entre 4 a 14 Hz. Em [44], além das premissas definidas em [40-43], o efeito do controle dos eletrodos do forno a arco também é levado em conta. Já em [45], a modelagem do forno a arco é realizada através de uma resistência, a qual varia de forma cíclica e aleatória no tempo. Para tanto, utiliza-se um gerador de números aleatórios distribuídos de forma uniforme. O valor resultante é então modulado com uma forma de onda senoidal de amplitude e frequência fixa. Muito embora os modelos supracitados são dinâmicos, verifica-se que eles ainda utilizam uma base determinística para definir as modulações resultantes;

- **Métodos com uso de sistemas caóticos:** A teoria do caos passou a ser utilizada como uma ferramenta de modelagem para fornos a arco, assim que ficou provado que as flutuações de tensão promovidas pelos fornos a arco são caóticas por natureza. Em [46, 47] o modelo de forno a arco é desenvolvido através de elementos caóticos e determinísticos. Inicialmente, as características V-I da carga são obtidas utilizando um modelo na forma de equações diferenciais. Adicionalmente, um sinal caótico de baixa-frequência é gerado por simulação do circuito caótico de Chua. A modulação desses dois sinais produz a tensão final do arco.

Dessa forma, o modelo proposto se comporta como uma fonte controlada. O trabalho [48] propõe um modelo similar a esta última proposta, porém com a diferença que neste trabalho o modelo estático do arco fundamenta-se na curva característica V-I do forno a arco. Em [49, 50] a proposta se baseia em uma variação caótica da resistência equivalente do arco. A variação caótica de acordo com o circuito caótico de Chua também é implementada no modelo apresentado em [51], o qual também fundamenta-se nas aproximações determinísticas e estocásticas. A desvantagem dos modelos caóticos descritos é que tratam-se de propostas complexas, dificultando a sua implementação para estudos de planejamento. Além disso, não há uma definição dos parâmetros necessários para a modelagem de outros fornos a arcos;

- **Modelos baseados em medições de campo:** Diferente das metodologias discutidas até aqui, algumas propostas utilizam-se de medições de campo para avaliar o fenômeno de flutuação de tensão. Em [52] utiliza-se o modelo caótico de Lorenz para representar a alta variação da corrente causada pelo forno a arco. Assim, o sistema caótico de Lorenz é sintonizado de forma a gerar uma série temporal similar a uma medição real. Em resumo, ao final da simulação, uma corrente é produzida para um determinado intervalo de tempo, sendo injetada no barramento, onde o forno está ligado. Em [53] adota-se a técnica de espaço de estados, a qual permite o uso de cálculos dos chamados expoentes de Lyapunov. Não obstante, tal proposta não é utilizada para desenvolver um modelo próprio de forno a arco, o qual forneça uma forma de onda de tensão e/ou corrente típica da carga. A metodologia, de fato, é baseada em medições do índice de P_{st} e realiza

a predição de novos valores. A desvantagem desses modelos é que eles ficam limitados a estudos de mitigação.

À luz dessas ilustrações, verifica-se que os atuais modelos de fornos a arco não demonstram serem práticos para estudos de planejamento.

c) *Quantificação das flutuações de tensão - Flickermeter IEC*

Além da própria norma IEC 61000-4-15 [1], a qual descreve as características do *flickermeter* IEC, os modelos computacionais desenvolvidos em [54-63] constituem ferramentas de grande utilidade nas simulações e estudos associados com a qualidade da energia elétrica, notadamente relacionados com o fenômeno das flutuações de tensão nos sistemas de potência. Todas estas pesquisas foram fundamentais para o desenvolvimento de um modelo computacional do *flickermeter* IEC, possibilitando detectar as deficiências do protocolo.

d) *Conceitos gerais associados com flutuação de tensão e inter-harmônicas*

Os principais conceitos e definições básicas relacionados com as componentes inter-harmônicas podem ser encontrados em [8, 64, 65]. Os trabalhos associados às referências [2-7] foram fundamentais para nortear um bom entendimento da correlação existente entre a presença de inter-harmônicas e o fenômeno de flutuação de tensão, bem como compreender as deficiências do *flickermeter* IEC. Adicionalmente, pesquisas realizadas em diferentes tipos de lâmpadas, [9, 10, 18, 66-68], reforçam as limitações do protocolo IEC devido à presença de componentes inter-harmônicas nos sinais de tensão.

e) *Propostas de novas técnicas para quantificação do fenômeno das flutuações de tensão diretamente baseadas no efeito de cintilação luminosa*

A fim de obter uma melhor correlação entre um índice que quantifica a cintilação luminosa e o incômodo percebido pelo consumidor final, diversos trabalhos têm proposto novas técnicas de avaliação.

Algumas alterações têm sido sugeridas ao *flickermeter* IEC [69-71], porém, as metodologias mais promissoras destacam que a avaliação do impacto devido à cintilação luminosa pode ser medida fielmente apenas através da análise da luz emitida. Diante deste cenário, algumas pesquisas têm sido direcionadas na proposta de modelos dinâmicos do sistema olho-cérebro para avaliar sua resposta ao efeito de cintilação luminosa [72-75]. Em [75], por exemplo, essa resposta é analisada através da relação entre a luz emitida e o fluxo sanguíneo do nervo ótico, enquanto que em [73] sugere-se a medição do diâmetro da pupila sob condições de *flicker*. Entretanto, verifica-se que os modelos utilizados são representações simplificadas de um fenômeno bastante complexo e os resultados experimentais até o momento são preliminares. Em [76] os autores utilizam a resposta da iluminância apenas para evidenciar as deficiências do *flickermeter* IEC, mas não é proposta qualquer metodologia para avaliar o fenômeno. Em [77] apresenta-se um *flickermeter* modificado, medindo-se a resposta direta da luz emitida por uma lâmpada, através de um luxímetro. A desvantagem dessa técnica é que a avaliação do efeito pode ser realizada apenas com o uso de um luxímetro e de uma lâmpada específica, podendo ser de difícil aplicação.

1.4 – Objetivos e contribuições oferecidas por esta tese

A partir dos fundamentos apresentados, reconhecendo-se as áreas de carência apontadas quanto aos estudos de acesso, no âmbito do fenômeno das flutuações de tensão, esta tese de doutorado avança no contexto da sistematização dos procedimentos trazendo melhorias quanto aos seguintes aspectos:

- Proposta de um modelo simples e prático do forno elétrico a arco para avaliação dos impactos decorrentes ainda no âmbito dos estudos de acesso;
- Verificação das deficiências do *flickermeter* IEC e proposição de uma nova metodologia para quantificação do fenômeno das flutuações de tensão, tomando-se como referência o efeito da cintilação luminosa.

No que se refere à primeira contribuição, a mesma encontra-se fundamentada nas desvantagens dos atuais modelos de fornos elétricos a arco disponíveis na literatura, uma vez que os mesmos não são suficientes para avaliar de forma precisa e prática o problema da flutuação de tensão antes da conexão da carga na rede elétrica. Dessa forma, propõe-se um modelo computacional baseado no espectro de frequências de um forno a arco, obtido de medições de formas de onda reais.

No que tange à segunda contribuição, este trabalho propõe uma técnica para quantificação da flutuação de tensão baseada na resposta direta do fluxo luminoso das lâmpadas através de um indicador de desempenho que possa contribuir na avaliação do efeito *flicker*.

Portanto, diante das contribuições pontuais supracitadas, este trabalho conduz a uma contribuição maior, a qual está associada à melhoria dos estudos de

acesso e da quantificação do fenômeno das flutuações de tensão no âmbito da operação do sistema em tempo real.

1.5 – Estrutura da tese

Diante do exposto, além do presente capítulo introdutório, esta pesquisa será desenvolvida dentro da estrutura organizacional que se segue:

Capítulo II – Metodologia Atual para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

Este capítulo resume os procedimentos atuais para avaliar o fenômeno de flutuação antes da conexão de cargas potencialmente perturbadoras na rede elétrica, especialmente, os fornos elétricos a arco.

Capítulo III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

Este capítulo apresenta um modelo simples e prático de forno elétrico a arco, no domínio do tempo, cujo foco principal é para avaliação do fenômeno de flutuação de tensão em estudos de acesso.

Capítulo IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

Esta unidade da pesquisa encontra-se voltada em destacar a relação inerente entre a presença de inter-harmônicas e flutuações de tensão, apresentar as limitações do *flickermeter* IEC e, finalmente, propor uma nova técnica para quantificação do

fenômeno da flutuação de tensão com base na análise da variação do fluxo luminoso.

Capítulo V – Conclusões

Por fim, apresenta-se uma síntese dos principais pontos e conclusões relacionados com o trabalho como um todo. Além disso, serão ressaltadas questões vinculadas às principais contribuições deste trabalho, bem como sugestões para futuros desenvolvimentos.

CAPÍTULO II

Metodologia Atual para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

2.1 – Considerações iniciais

O desenvolvimento de estudos específicos para avaliação do fenômeno das flutuações de tensão, quando da conexão de cargas potencialmente perturbadoras, é uma responsabilidade inerente às áreas de planejamento do sistema elétrico. Geralmente, tais estudos fundamentam-se nas recomendações da norma IEC 61000-3-7. Muito embora existam metodologias mais simplificadas, recomenda-se que as análises em sistemas elétricos mais complexos sejam baseadas em simulações computacionais, através do uso de programas voltados para este propósito. Assim, nos estudos associados com as flutuações de tensão, conforme ilustra a Figura 1, as simulações devem incluir modelos adequados das cargas perturbadoras, bem como a modelagem do *flickermeter* IEC, o qual representa o protocolo atual para avaliação do impacto do fenômeno em questão.

CAPITULO II – Metodologia Atual para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

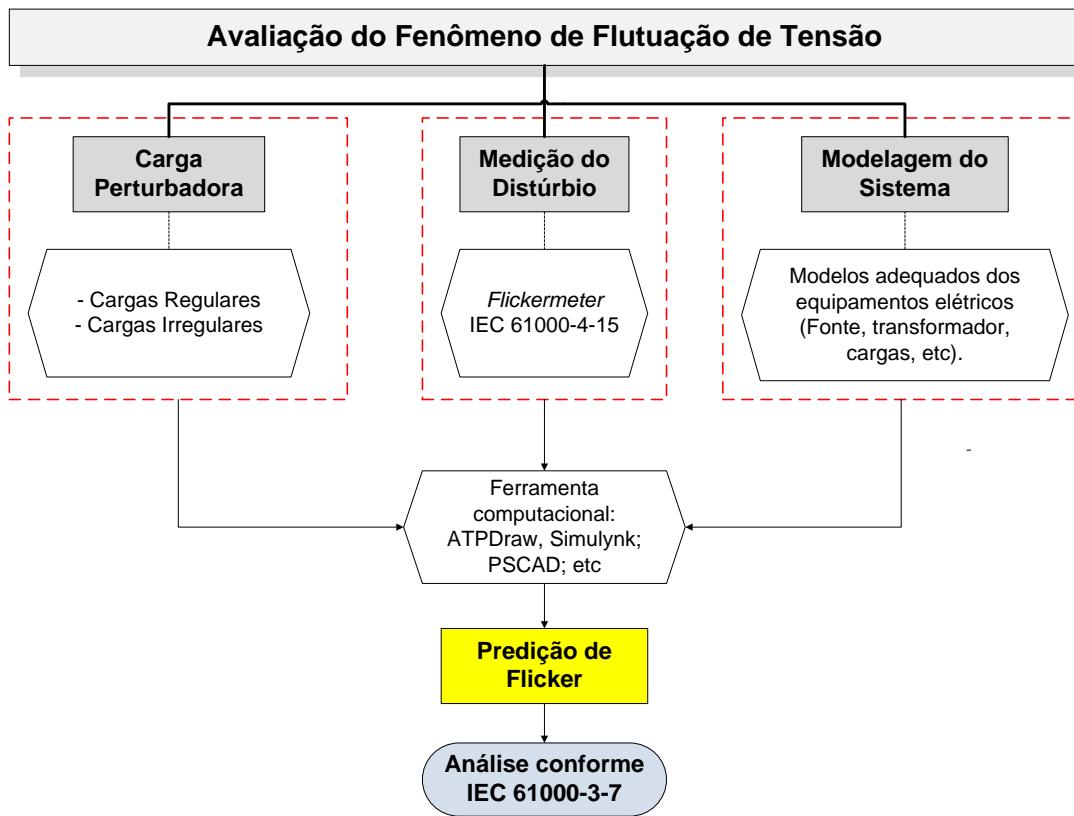


Figura 1 - Procedimento atual utilizado para quantificação das flutuações de tensão.

As causas das flutuações de tensão podem estar vinculadas à instalação de cargas que promovam variações regulares ou irregulares na tensão junto ao ponto de conexão. No que tange às cargas que promovem variações regulares na tensão, os resultados de avaliação do impacto de sua operação no sistema são mais precisos. Por outro lado, nota-se que a grande dificuldade para análise do fenômeno das flutuações de tensão deve-se à presença de cargas que promovem solicitações irregulares de potência, a exemplo dos fornos elétricos a arco. Diante da importante funcionalidade que esses equipamentos representam no setor industrial, os mesmos manifestam-se como a principal fonte perturbadora no âmbito do fenômeno das flutuações de tensão. Geralmente, a avaliação do impacto devido à conexão desse tipo de carga fundamenta-se na aplicação de uma

CAPITULO II – Metodologia Atual para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

metodologia analítica simplificada, ou através de modelagens computacionais baseadas na aplicação direta do *flickermeter* IEC.

Diante desse contexto, este capítulo tem como objetivo contribuir nos seguintes pontos:

- Destacar as principais recomendações da IEC 61000-3-7 para avaliação do fenômeno das flutuações de tensão;
- Descrever os atuais procedimentos utilizados para avaliação da flutuação de tensão devido à conexão de fornos elétricos a arco.

2.2 – Recomendações de acesso conforme a norma IEC 61000-3-7

2.2.1 – Considerações básicas

O principal objetivo da norma IEC 61000-3-7 é fornecer os procedimentos a serem aplicados como base para determinação dos requisitos necessários para a conexão de acessantes potencialmente geradores de flutuações de tensão em redes de média, alta e extra alta tensão. Para tanto, define-se o ponto de avaliação das flutuações de tensão como sendo o ponto de análise dos níveis de *flicker* emitidos por uma determinada instalação.

A avaliação dos níveis de *flicker* da instalação perturbadora deve considerar a pior situação da condição de operação, incluindo contingências para as quais o sistema ou a instalação do consumidor sejam projetadas a operar. Adicionalmente, para grandes instalações, comparadas ao tamanho do sistema, recomenda-se a avaliação dos níveis de emissão para condições de operação

eventuais. Entretanto, níveis maiores de emissão podem ser permitidos sob tais situações.

2.2.2 – Critério 1: Avaliação simplificada de emissão de *flicker*

Antes de aplicar estudos mais complexos de conexão da carga, a concessionária de energia elétrica solicita ao acessante informações técnicas sobre seus equipamentos, tais como, variações de potência, tipo de partida dos motores, etc. Assim, com uma pré-análise simplificada das informações, a concessionária de energia elétrica decidirá se há necessidade de estudos mais específicos a serem desenvolvidos.

- Conexão de cargas com solicitações regulares de potência**

Para flutuações de tensão bem definidas (variações do tipo degrau, periódicas e repetitivas), a análise pode ser baseada na curva de P_{st} unitário, resultante do protocolo definido pela IEC, conforme ilustra a Figura 2.

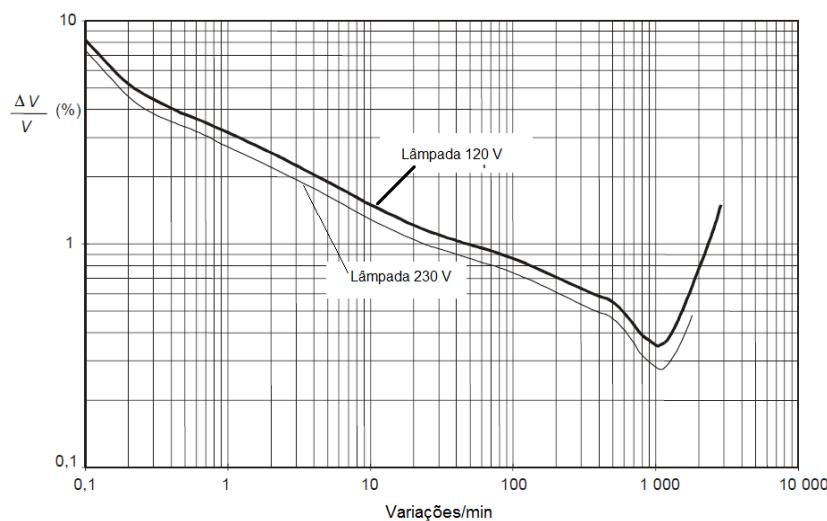


Figura 2- Curva de P_{st} unitário para aplicações em 230 V e 120 V.

CAPITULO II – Metodologia Atual para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

Este procedimento pode ser aplicado da seguinte maneira:

- **Passo 1:** Determina-se o ponto de operação da carga, ($\Delta V/V\%$, f_i). Onde a variação relativa de tensão, $\Delta V/V\%$, é calculada conforme (1), e a respectiva frequência de intermitência da carga, f_i , em variações por minuto, é estimada com base nas características operativas da mesma;

$$\Delta V/V \% = \frac{R_s \cdot P + X_s \cdot Q}{V_N^2} \cdot 100\% \quad (1)$$

Onde:

- R_s : Resistência equivalente do ramal de suprimento até o ponto de conexão;
 - P : Potência ativa da carga;
 - X_s : Reatância equivalente do ramal de suprimento até o ponto de conexão;
 - Q : Potência reativa da carga;
 - V_n : Tensão nominal no ponto de conexão.
-
- **Passo 2:** Verifica-se se o ponto estimado, ($\Delta V/V\%$, f_i), está abaixo ou acima da curva de P_{st} unitário. A conexão da carga pode ser aprovada, caso o ponto esteja abaixo da mesma.

Vale ressaltar que em estudos de acesso, o valor limite de P_{st} provocado individualmente pelo acessante deve ser inferior a 0,35 [pu]. Todavia, quando não houver fonte emissora de *flicker* nas adjacências das instalações do acessante, a

CAPITULO II – Metodologia Atual para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

concessionária poderá aprovar a conexão da instalação caso os valores estimados de P_{st} forem inferiores a 1,0 [pu].

- **Conexão de cargas na baixa tensão (BT)**

A conexão de cargas com baixas variações de potência pode ser aprovada sem a necessidade de avaliações específicas. Por exemplo, a concessionária aprova a conexão de um equipamento BT, caso o mesmo se encontre de acordo com as recomendações da norma IEC 61000-3-3 (corrente de entrada $\leq 16\text{A/fase}$) ou da norma IEC 61000-3-11 (corrente de entrada $\leq 75\text{A/fase}$) [16].

- **Conexão de cargas na média (MT) ou alta tensão (AT)**

A conexão de uma carga perturbadora em média ou alta tensão pode ser aprovada sem necessidade de estudos específicos, caso a relação, K , entre a variação da potência aparente da carga, ΔS_i , e a potência de curto-circuito no ponto de conexão, S_{sc} , esteja dentro dos limites dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 - Limites para variações relativas da potência em função do número de variações de tensão por minuto (r).

r	$K = (\Delta S_i/S_{sc}) \%$	Valor de P_{st} correspondente
$r > 200$	0,1	0,35 (para $r = 1000$)
$10 \leq r \leq 200$	0,2	0,32 (para $r = 200$)
$r < 10$	0,4	0,31 (para $r = 10$)

Nota: Uma queda de tensão seguida de um restabelecimento traduz em duas variações de tensão.

2.2.3 – Critério 2: Limites de emissão associados às características do sistema

Caso a instalação perturbadora não se adeque ao critério 1 ($P_{st} < 0,35$ [pu]), deve-se analisar a capacidade de absorção de *flicker* do sistema para carga acessante em MT ou AT.

- **Conexão de cargas em sistemas de média tensão (MT)**

Inicialmente, deve-se calcular, através da expressão (2), a contribuição total máxima de emissão de *flicker* permitida, considerando todas as cargas a serem instaladas no sistema MT.

$$GPst_{MT} = \sqrt[\alpha]{Pst_{MT}^\alpha - (Pst_m \cdot TF_{MT})^\alpha - Pst_{c-MT}^\alpha} \quad (2)$$

Onde:

- $GPst_{MT}$: Contribuição total máxima de emissão de *flicker* permitida no barramento MT;
- Pst_{MT} : Nível de planejamento de *flicker* no sistema de média tensão. Valores típicos de nível de planejamento para as diferentes classes de tensão são apresentados na Tabela 2;
- Pst_{m-MT} : Nível de planejamento de *flicker* do sistema a montante em média tensão;
- TF_{MT} : Coeficiente de transferência (atenuação) de *flicker* entre o sistema a jusante e o sistema MT. Valores típicos do coeficiente de transferência são apresentados na Tabela 3;

CAPITULO II – Metodologia Atual para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

- P_{stc-MT} : Nível de *flicker* relacionado às cargas já existentes no sistema MT. A contribuição das cargas conectadas no sistema BT pode ser desprezada;
- α : Constante, cujos valores são definidos na Tabela 4. Geralmente, utiliza-se $\alpha = 3$.

Tabela 2 - Níveis de planejamento para diferentes classes de tensão.

Indicador	Classe de Tensão		
	BT	MT	AT/EAT
$P_{st}(pu)$	1,0	0,9	0,9
$P_{lt}(pu)$	0,8	0,7	0,6

Tabela 3 – Valores típicos de coeficientes de transferência.

Classe de Tensão	Coeficiente de Transferência
EAT para AT	0,8
AT para MT	0,9
MT para BT	1,0

Tabela 4 - Valores de α .

Valor de α	Critério
4	Quando flutuações simultâneas são bastante improváveis de ocorrer.
3	Quando ocorrência de flutuações simultâneas é pequena.
2	Quando flutuações simultâneas são prováveis de ocorrer (Ex.: período de fusão coincidentes em fornos a arco).
1	Quando flutuações simultâneas são bastante prováveis de ocorrer (Ex.: Partida de vários motores ao mesmo tempo).

Uma vez obtida a contribuição total máxima de emissão de *flicker* em um dado barramento, recomenda-se que apenas uma fração desse total seja permitido para cada consumidor a ser instalado. Para tanto, uma aproximação razoável é considerar a relação entre a potência contratada, S_i , e a capacidade total do sistema de média tensão, S_{t-MT} , a qual pode ser definida como sendo a capacidade do transformador AT-MT, ou como sendo a carga total à jusante, considerando a

CAPITULO II – Metodologia Atual para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

previsão de cargas futuras. Essa fração da contribuição total, é comumente denominada de emissão individual de *flicker*, E_{Psti} , e pode ser calculada conforme (3).

$$E_{Psti} = G_{PstMT} \cdot \sqrt{\frac{S_i}{S_{t-MT} - S_{t-BT}}} \quad (3)$$

Onde:

- E_{Psti} : Limite de emissão de *flicker* para instalação “ i ” perturbadora, alimentada diretamente do sistema MT;
- S_i : Potência contratada do consumidor “ i ” (carga ou geração);
- S_{t-MT} : Capacidade total do sistema MT, considerando previsão de novas cargas;
- S_{t-BT} : Potência total das instalações supridas diretamente do sistema BT, considerando previsão de novas cargas.

Assim, quando da conexão de cargas perturbadoras em sistemas MT, o nível de emissão individual de *flicker* da carga acessante, P_{st-i} , não deve exceder o nível de emissão individual permitido, E_{Psti} , cujos valores mínimos são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Limites mínimos para emissão individual de flicker em sistemas MT.

E_{Psti} [pu]	E_{Plti} [pu]
0,35	0,25

Vale ressaltar que as aproximações (1) e (2) são idênticas para o indicador P_{lt} .

CAPITULO II – Metodologia Atual para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

- **Conexão de cargas em sistemas de alta tensão (AT)**

Quando da conexão de cargas perturbadoras em sistemas AT, o procedimento é similar ao aplicado para sistemas MT. As expressões (4) e (5) apresentam, respectivamente, a contribuição total máxima de emissão de *flicker* permitida, e o limite de emissão individual de *flicker*, considerando sistema AT.

$$GPst_{AT} = \sqrt[\alpha]{Pst_{AT}^{\alpha} - (Pst_{m-AT} \cdot TF_{AT})^{\alpha} - Pst_{c-AT}^{\alpha}} \quad (4)$$

Onde:

- $GPst_{AT}$: Contribuição total máxima de emissão de *flicker* permitida no barramento AT;
- Pst_{AT} : Nível de planejamento de *flicker* no sistema de alta tensão, cujo valor é definido na Tabela 2;
- Pst_{m-AT} : Nível de planejamento de *flicker* do sistema a montante em alta tensão;
- TF_{AT} : Coeficiente de transferência (atenuação) de *flicker* entre o sistema a jusante e o sistema AT;
- Pst_{c-AT} : Nível de *flicker* relacionado às cargas já existentes no sistema AT. A contribuição das cargas conectadas no sistema MT e/ou BT pode ser desprezada.

$$E_{Psti} = G_{PstAT} \cdot \sqrt[\alpha]{\frac{S_i}{S_{t-AT}}} \quad (5)$$

Onde:

- S_{t-AT} : Capacidade total do sistema AT.

CAPITULO II – Metodologia Atual para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

2.2.4 – Critério 3: Condições para aprovação de maiores níveis de emissão de *flicker*

Caso as condições de conexão não se adequem aos estudos desenvolvidos pelo critério 2, verifica-se a possibilidade de permitir maiores níveis de emissão de *flicker* da carga acessante. Dessa forma, deve-se desenvolver estudos específicos para analisar a capacidade de todo o sistema no que se refere à absorção de *flicker*, objetivando decidir se o operador do sistema pode permitir a emissão de maiores níveis de *flicker* sob uma operação condicional. Assim, deve existir um acordo entre o operador do sistema e o consumidor. Caso não haja autorização ou acordo, o consumidor deve prover soluções mitigadoras para reduzir os níveis de emissão de *flicker*.

A Figura 3 ilustra um fluxograma, o qual resume os critérios de avaliação recomendados pela norma IEC 61000-3-7. O Apêndice A.1 destaca um estudo de caso ilustrando a aplicação da IEC 61000-3-7 para análise do estudo de acesso de uma máquina de solda trifásica.

CAPITULO II – Metodologia Atual para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

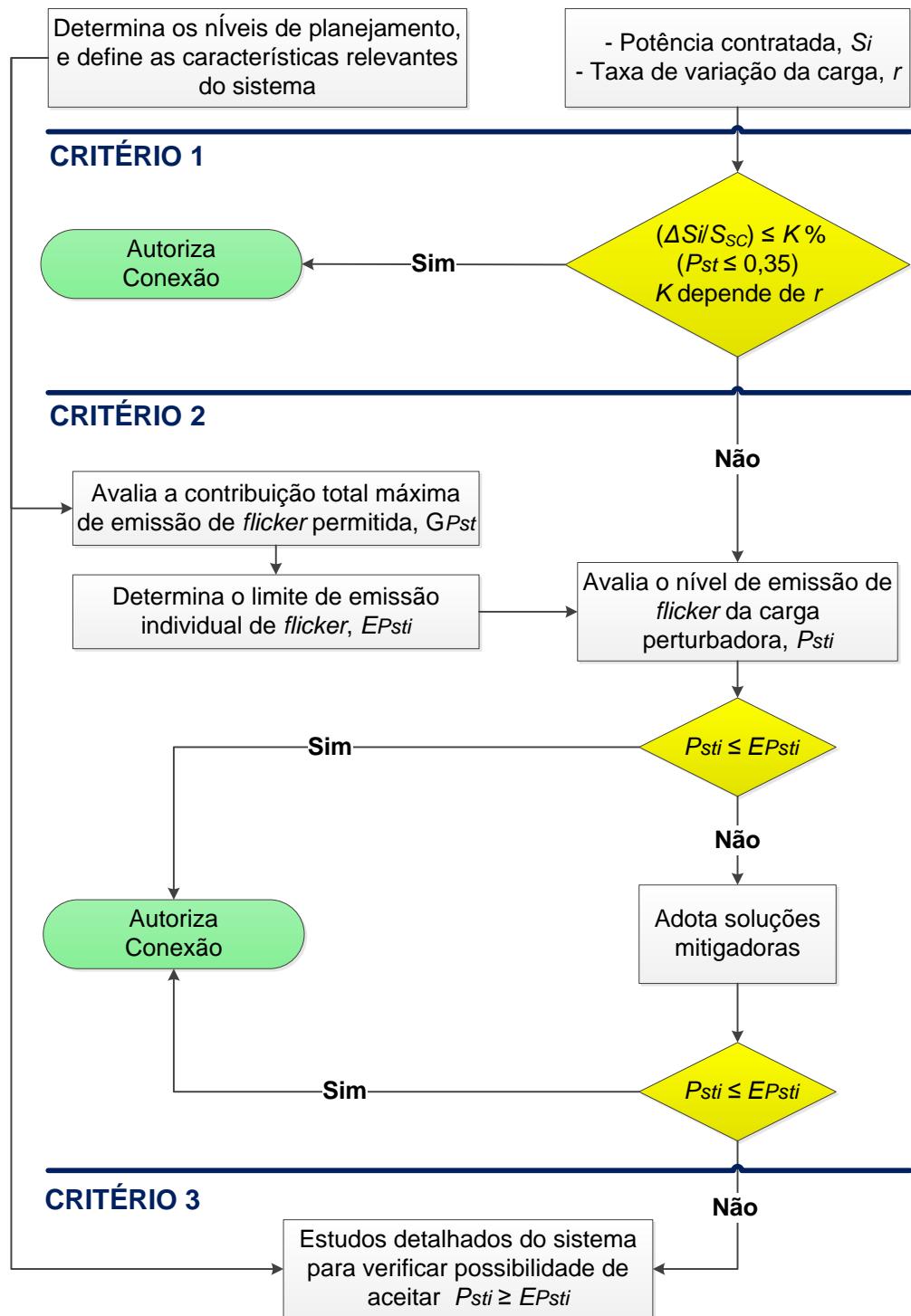


Figura 3 - Procedimento de avaliação de ligação de carga perturbadora de flicker conforme IEC 61000-3-7.

2.3 – Estudos de acesso para cargas com variações rápidas de tensão

Neste trabalho, entende-se por variações rápidas de tensão, as variações de tensão eficaz que ocorrem na frequência fundamental ao longo de vários ciclos. A título de ilustração, a Figura 4 ilustra um exemplo de variação rápida de tensão causada pela partida de um motor. Diante desse contexto, deve-se manter a amplitude da tensão dentro de limites adequados, mesmo em casos que as variações não sejam suficientes de produzir *flicker*. Para tanto, os operadores do sistema definem níveis de planejamento para as cargas potencialmente perturbadoras. A Tabela 6 apresenta alguns valores indicativos de variações rápidas de tensão, $\Delta V/V$ (expressos em porcentagem da tensão nominal), para fenômenos que ocorrem de forma infrequente. Verifica-se que estes limites dependem do número de variações em um dado período de tempo.

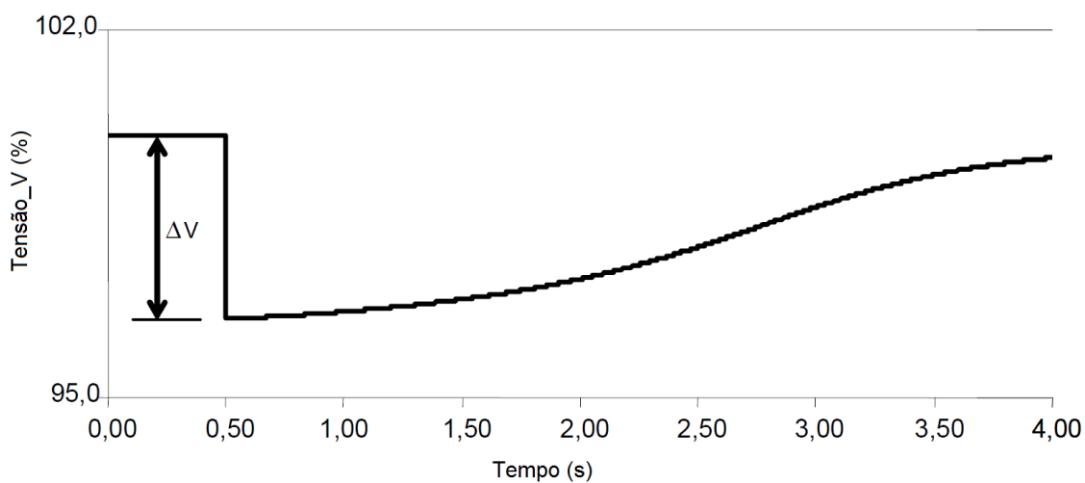


Figura 4 - Exemplo de uma rápida variação de tensão associada com a partida de um motor.

CAPITULO II – Metodologia Atual para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

Tabela 6 - Níveis de planejamento recomendados para variações rápidas de tensão em função do número de variações de tensão em um dado período.

Número de variações de tensão <i>n</i>	$\Delta V/V\%$	
	MT	AT/EAT
$n \leq 4/\text{dia}$	5 - 6	3 - 5
$n \leq 2/\text{hora} \text{ e } n > 4/\text{dia}$	4	3
$2 < n \leq 10/\text{hora}$	3	2,5

2.4 – Procedimento para avaliação da conexão de fornos elétricos a arco

Os procedimentos para avaliação da conexão de fornos a arco seguem os critérios definidos pela norma IEC 61000-3-7, conforme já descrito no tópico 2.2 deste trabalho. Diante deste contexto, inicialmente, aplica-se o critério 1 (item 2.2.2). Nota-se que a curva de P_{st} unitário não pode ser utilizada para estimação dos níveis de flutuações de tensão produzidos pelo forno, já que as variações de tensão produzidas por este tipo de carga são bastante irregulares, não sendo possível a correta identificação da frequência de variação relativa da tensão. Assim, calcula-se a relação entre a variação da potência aparente do forno e a potência de curto-círcuito no ponto de conexão. Caso o resultado obtido esteja acima dos limites dispostos na Tabela 1, verifica-se o critério 2 (item 2.2.3). Para tanto, inicialmente, deve-se calcular o valor do P_{st} produzido pelo forno a arco. Geralmente, utiliza-se uma avaliação simplificada para esse propósito, a qual se baseia na equação empírica definida em (6).

$$P_{st95\%} = K_{st} \cdot K_{120} \cdot \frac{S_{EAF}}{S_{sc}} = K_{st} \cdot K_{120} \cdot \frac{X_{sc}}{(X_{sc} + X_{EAF})} \quad (6)$$

Onde:

CAPITULO II – Metodologia Atual para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

- $P_{st95\%}$: Valor de P_{st} que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos em um período contínuo de medição;
- S_{EAF} : Potência de curto-circuito do forno, supondo os eletrodos tocando a massa fundida;
- S_{sc} : Potência de curto-circuito no ponto de conexão. Deve-se incluir um número mínimo de unidades geradoras despachadas, de forma a minimizar a potência de curto-circuito no ponto de conexão;
- K_{st} : Fator característico de emissão de *flicker* do forno a arco, variando entre 48 a 85. Geralmente utiliza-se um valor igual a 75;
- K_{I20} : Fator que leva em consideração que o olho humano é mais sensível ao efeito de cintilação luminosa para lâmpadas incandescentes 120 [V] – 60 [Hz]. Um valor típico para esse fator é igual a 0,8. Adicionalmente, recomenda-se o uso de uma constante de multiplicação igual a 0,5 quando há ligação de SVC e entre 0,25 e 0,33 quando da conexão de STATCOMs;
- X_{sc} : Reatância de curto-circuito da rede de alimentação vista do ponto de conexão;
- X_{EAF} : Reatância do circuito interno da usina siderúrgica entre o ponto de conexão e a ponta dos eletrodos.

Da formulação (6) verifica-se que quando a potência de curto-circuito do sistema é aumentada, o efeito *flicker* é reduzido na mesma proporção. Todavia, o contrário não é verdadeiro. Quando a potência de curto-circuito é baixa, o efeito pode ser maior do que o previsto, já que nessa condição não há mais uma relação linear devido à uma maior instabilidade do arco em sistemas mais fracos.

CAPITULO II – Metodologia Atual para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

O cálculo do nível de curto-circuito do forno, S_{EAF} , ou da reatância do circuito interno, X_{EAF} , pode ser obtido, conhecendo-se os seguintes dados:

- Reatância do transformador principal da usina siderúrgica (X_{tr});
- Reatância dos cabos de ligação (X_{ca}), localizada entre o secundário do transformador principal e o transformador do forno;
- Reatância do circuito restante (X_r), ou seja, do secundário do transformador do forno até a ponta dos eletrodos.

O valor da reatância X_r pode ser obtida de forma simplificada, através de uma relação empírica (conhecida na indústria siderúrgica) com a reatância efetiva de operação do forno em fusão. Esta última é calculada a partir da potência máxima de fusão e do correspondente fator de potência (FP) visto do primário do transformador do forno, conforme definido em (7). Tipicamente, o fator de potência (FP) é próximo de 0,7.

$$X_{eff} = \frac{\operatorname{sen}(\arccos(FP))}{S_{tf}} \quad (7)$$

Onde:

- X_{eff} : Reatância efetiva de operação do forno em fusão;
- S_{tf} : Potência nominal do transformador do forno, suposta igual à máxima potência de fusão.

Assim, uma vez obtido o valor de X_{eff} , calcula-se a reatância X_r utilizando a equação (8).

$$X_r = \frac{X_{eff}}{1,15} \quad (8)$$

Por fim, através da relação (9), estima-se o valor da reatância do circuito interno da usina siderúrgica, X_{EAF} .

$$X_{EAF} = X_{tr} + X_{ca} + X_r \quad (9)$$

Uma vez conhecida a reatância X_{EAF} , o valor de P_{st} emitido pelo forno é facilmente calculado através da formulação (6), e consequentemente o critério 2 pode ser analisado. Para tanto, o nível de *flicker* emitido é comparado com o máximo valor de P_{st} que a carga acessante no ponto de conexão pode assumir. Caso o valor de P_{st} do forno seja maior que o máximo valor de P_{st} permitido, adota-se o critério 3 (item 2.2.4). No que tange este último critério, se o operador do sistema não autorizar o nível de *flicker* emitido pelo forno a arco, deve-se adotar soluções mitigadoras.

A grande desvantagem em utilizar a equação (6), se deve ao uso dos valores recomendados para a constante de emissão de *flicker*, K_{st} , visto que são muito conservativos, podendo levar a elevados erros na predição de *flicker*, e consequentemente a um mal planejamento das soluções mitigadoras [45]. Diante deste cenário, em estudos mais complexos, o valor de P_{st} pode ser obtido através de simulações computacionais, com o uso do *flickermeter IEC* e de um modelo da carga que reproduza fielmente sua característica elétrica.

2.5 – Considerações finais

O presente capítulo sintetizou os procedimentos para estudos de acesso, no âmbito do fenômeno da flutuação de tensão. A maioria dos contratos estabelecidos entre o operador do sistema e o acessante são baseados nas

CAPITULO II – Metodologia Atual para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

recomendações da IEC 61000-3-7. De uma forma geral, para adotar os critérios estabelecidos nessa norma, deve-se prever o valor de P_{st} emitido pela carga potencialmente perturbadora. Para cargas que possuem variações regulares, este indicador pode ser facilmente estimado com baixo erro. Todavia, para equipamentos, cuja operação é bastante irregular, a aplicação de estratégias simplificadas pode conduzir a resultados e ações incorretos.

Dentre as instalações perturbadoras de flutuação de tensão, o forno a arco é uma das cargas que causa maior impacto na rede, e consequentemente a predição dos níveis de *flicker* é de grande importância para as indústrias siderúrgicas. Porém, devido ao seu complexo processo de operação, torna-se uma tarefa árdua obter os valores de P_{st} emitidos. Dessa forma, recomenda-se análises mais sofisticadas, através de simulações computacionais. Para tanto, torna-se necessário o uso do *flickermeter* IEC e de um modelo de forno a arco que reproduza fielmente sua característica elétrica. Não obstante, diante deste cenário, surgem duas questões:

- 1) Como modelar de forma adequada um forno elétrico a arco, cuja operação possui um comportamento tão irregular e estocástico?
- 2) Como calcular corretamente o nível de flutuação de tensão, sabendo que o atual protocolo IEC apresenta deficiências na quantificação do fenômeno em determinadas condições?

No que se refere à primeira questão, diversas propostas de modelos de fornos a arco têm sido sugeridas por pesquisadores. Porém, as mesmas ainda não apresentam bons resultados, ou são utilizadas para avaliação apenas da condição

CAPITULO II – Metodologia Atual para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

de operação da carga. Adicionalmente, modelagens desenvolvidas para estudos de acesso se mostram muito complexas para serem aplicadas.

No que tange à segunda questão, a comunidade científica tem se preocupado em propor novas formas para avaliação do fenômeno. Todavia, as metodologias mais promissoras, as quais se baseiam na medição da cintilação luminosa através da análise da luz emitida, apresentam resultados apenas preliminares ou apresentam limitações práticas importantes.

Em resumo, verifica-se que ainda há uma carência tanto de um modelo de forno a arco elétrico que seja simples, prático e fiel às suas características reais de operação, quanto de uma metodologia capaz de quantificar corretamente o fenômeno das flutuações de tensão.

CAPÍTULO III

Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

3.1 – Considerações iniciais

O forno elétrico a arco é o equipamento mais versátil na produção de aço. A incidência de instalações cada vez maiores é uma clara evidência de sua importância no desenvolvimento mundial da siderurgia [33]. No que se refere às características elétricas, muito embora os fornos elétricos estejam cada vez mais eficientes, eles são classificados como cargas potencialmente perturbadoras no âmbito da qualidade da energia elétrica. Devido ao comportamento não-linear e estocástico da operação desses equipamentos, vários fenômenos de perturbação da onda de tensão podem ser observados, sendo que três destes fenômenos merecem destaque: desequilíbrios de tensão, distorções harmônicas de tensão e corrente e flutuações de tensão [46]. Desta forma, antes da instalação desses equipamentos, devem ser desenvolvidos estudos específicos para avaliação dos impactos ocasionados na rede elétrica.

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

Dentre os distúrbios produzidos, verifica-se que a grande dificuldade da comunidade científica resume-se no desenvolvimento de modelos computacionais de fornos elétricos a arco para avaliação do fenômeno das flutuações de tensão antes da conexão dos equipamentos. A pré-avaliação das flutuações de tensão é de extrema importância para as indústrias siderúrgicas, a fim de otimizar as técnicas de mitigação do fenômeno. Diante deste cenário, um dos objetivos deste trabalho é apresentar uma proposta de modelagem de forno elétrico a arco para avaliação específica do fenômeno das flutuações de tensão.

Para tanto, este capítulo tem como objetivo contribuir nos seguintes pontos:

- Apresentar os conceitos básicos do forno elétrico a arco, caracterizando o comportamento do arco elétrico ao longo do ciclo de operação;
- Apresentar a proposta de um modelo de forno a arco para análise específica do fenômeno de flutuação de tensão. Tal proposta se baseia na caracterização do forno elétrico a arco através de análises estatísticas em medições de campo obtidas em duas diferentes instalações de fornos a arco.

3.2 – Conceitos básicos dos fornos elétricos a arco

Antes que se proponha qualquer modelo de forno a arco, é essencial que se conheça as suas características básicas de operação.

Os fornos a arco são responsáveis por aproximadamente 33% da produção de aço mundial. O seu desenvolvimento inicial foi motivado pelo uso da sucata ferrosa como carga fria. O ferro reciclado constitui uma matéria-prima com custo relativamente baixo em comparação com os produtos que derivam diretamente do

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

minério de ferro, como o ferro gusa e o ferro esponja. Ademais, o forno a arco permitiu a instalação competitiva de aciarias de pequeno e médio porte, as chamadas mini aciarias. Uma siderúrgica com um alto forno a carvão mineral que opera com minério de ferro, começa a ser competitiva a partir de uma capacidade ao redor de um milhão de toneladas por ano. O forno a arco pode ser competitivo a partir de 50 a 100 mil toneladas por ano, podendo atingir 500 a 800 mil toneladas por ano com um único forno. A aciaria elétrica se adapta muito bem a um mercado regional que tem limitações de demanda e que deve ser atendido com preços competitivos. Em termos energéticos, a produção de uma tonelada de aço líquido a partir do minério de ferro consome cerca de 2.500 [kWh] de energia, ao passo que, a partir da sucata, este consumo se reduz a cerca de 600 [kWh]. Esta diferença de consumo energético constitui um dos principais incentivos ao uso da sucata como matéria-prima na siderurgia [33].

A Figura 5 fornece uma visão das principais partes que compõem um forno a arco.

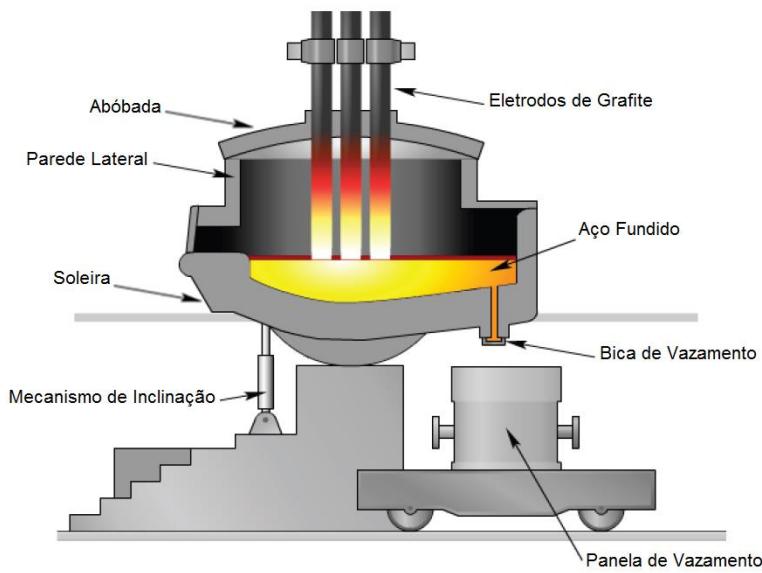


Figura 5 - Partes constituintes de um forno a arco [34].

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

Os eletrodos de grafite são em número de três nos fornos trifásicos de corrente alternada. Normalmente, tais dispositivos são movimentados por meio de um sistema utilizando cilindros hidráulicos. Um fator importante na movimentação dos eletrodos é a velocidade, para que seja possível ajustar o comprimento do arco no menor tempo possível. Como se trata de movimentação de massas muito elevadas (eletrodos, braços dos eletrodos, pistão hidráulico, totalizando algumas toneladas de peso) as forças necessárias para acelerar e desacelerar tendem a ser os elementos limitantes na resposta do sistema às variações de comprimento do arco [33].

A soleira do forno e a bica de vazamento são construídas com materiais refratários. As paredes laterais e a abóbada são construídas com painéis de aço refrigerados com água. Todo o forno tem a possibilidade de se inclinar para frente, na direção da bica de vazamento onde, ao se abrir o orifício de vazamento, o aço líquido flui para a panela de vazamento [33].

A carga metálica é fundida, principalmente, pela energia irradiante do arco. É comum se imaginar que a fusão se realiza pela passagem da corrente elétrica pela carga. Realmente, a passagem da corrente elétrica pela carga condutora (sucata de ferro, gusa, etc.) produz algum efeito joule de aquecimento, mas é insignificante em presença da energia irradiante do arco sobre a carga [33].

Os fornos elétricos a arco operam em regime de carga muito variável. Portanto, é comum que se tenha uma alimentação exclusiva para um ou vários fornos a arco, desde o ponto de conexão, onde deverá existir uma potência de curto-circuito compatível com as potências instaladas de modo a não perturbar outros consumidores. A Figura 6 ilustra uma típica estrutura de um sistema, onde um forno a arco é instalado [33].

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

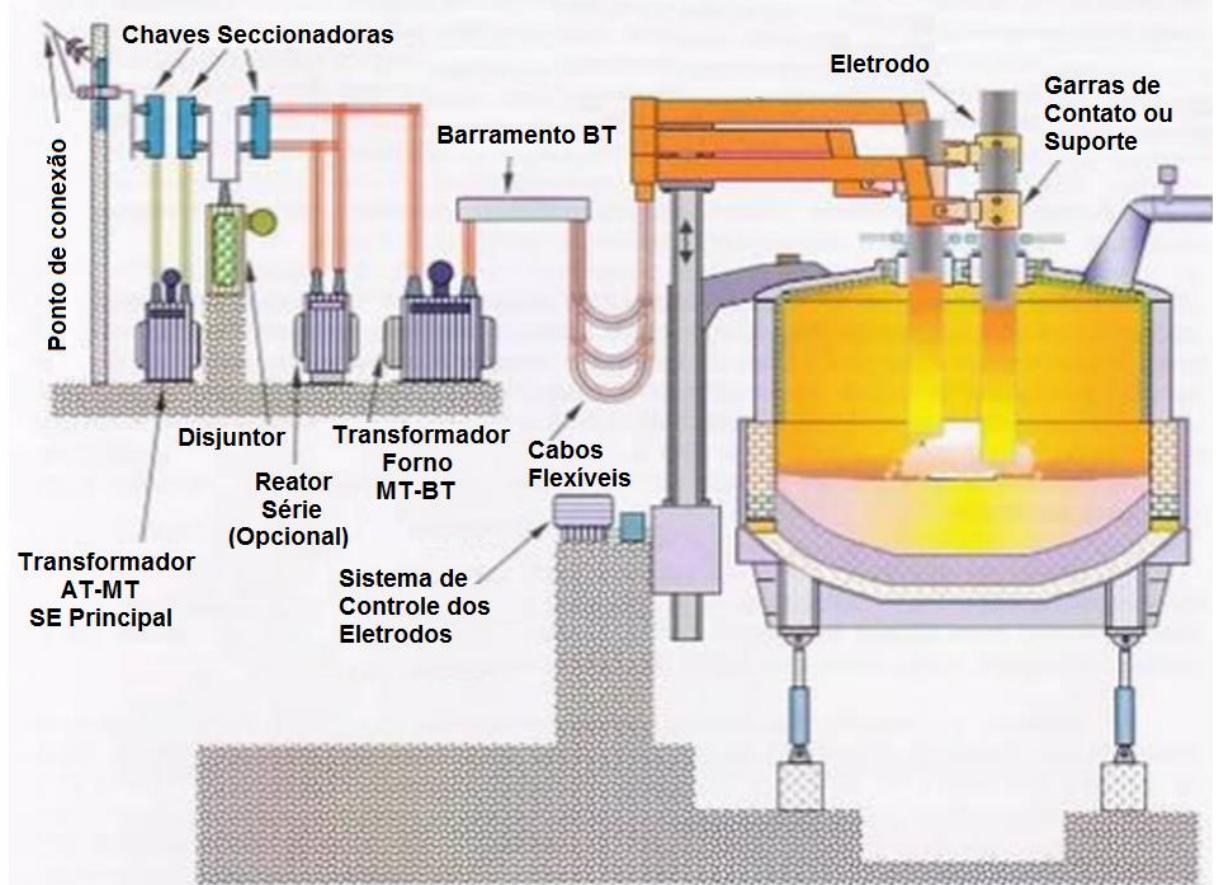


Figura 6 - Sistema elétrico típico alimentando um forno elétrico a arco.

Geralmente, os fornos são instalados em pontos de conexão com o sistema supridor em tensões iguais ou maiores do que 138 [kV]. As tensões para alimentação dos eletrodos dos fornos, no entanto, chegam a no máximo 1.200 [V], entre fases, sendo normalmente encontrados valores entre 400 e 1.000 [V]. Teoricamente, é possível instalar entre o ponto de conexão com o sistema supridor e o barramento de alimentação do arco, um único transformador, a fim de adaptar as tensões do ponto de conexão à tensão do arco. Isto, no entanto, não seria uma solução econômica e segura para a instalação dos disjuntores de operação do forno, e dos possíveis reatores intermediários e bancos de capacitores, com ou sem filtros. Assim, o uso de tensões intermediárias para montar estes equipamentos é a solução normalmente usada. No Brasil, as tensões mais

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

utilizadas para este fim são: 13,8 [kV], 23 [kV] e 33 [kV]. Assim sendo, é necessário instalar dois transformadores abaixadores de tensão, entre o ponto de conexão e os eletrodos do forno. A Figura 7 representa o diagrama unifilar de um típico sistema alimentando um forno [33].

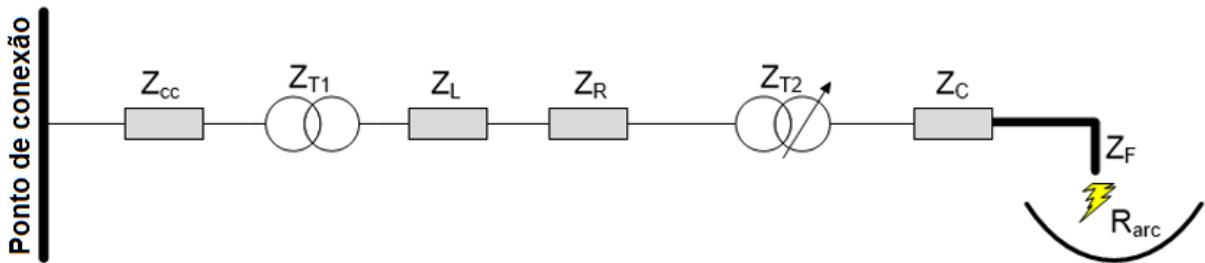


Figura 7 - Diagrama unifilar de alimentação de um forno elétrico a arco.

Na Figura 7, pode-se reconhecer os seguintes componentes:

- Z_{cc} : Impedância de curto-circuito vista do ponto de conexão;
- Z_{T1} : Impedância do transformador abaixador de tensão da subestação principal;
- Z_L : Impedância da linha de transmissão entre a subestação principal e a subestação de alimentação do forno a arco;
- Z_R : Impedância do reator série destinado a completar a reatância total do sistema para uma operação estável do forno (opcional);
- Z_{T2} : Impedância do transformador abaixador de tensão de alimentação do forno a arco;
- Z_c : Impedância de todos os condutores que vão desde o secundário do transformador de alimentação do forno até os eletrodos;
- Z_F : Impedância dos eletrodos de grafite;
- R_{arc} : Resistência variável do arco do forno.

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

Ressalta-se que podem ocorrer alternativas na alimentação do forno. Por exemplo, reatores com núcleo de ar, cujas dimensões não permitem sua instalação junto ao transformador de alimentação do forno, são montados na subestação principal.

3.2.1– Princípio de operação de um forno elétrico a arco

A operação de um forno elétrico a arco pode ser resumida através dos seguintes pontos [34]:

- A. Com a abóbada aberta, o forno é carregado com um conjunto de sucata reciclada;
- B. A abóbada é fechada e os três eletrodos são acionados em direção à carga metálica. Conforme a sucata é fundida, uma região líquida de aço é formada no fundo do forno;
- C. Ao atingir um determinado volume de líquido de aço, o forno é desligado. Assim, abre-se a abóbada e realiza-se um segundo carregamento de sucata;
- D. Repete-se o processo de fusão;
- E. Ao término de fusão de todos os conjuntos de sucata (2 a 3 carregamentos), o aço é superaquecido por um determinado período até atingir a temperatura ideal para realizar o vazamento do aço líquido. Esse processo é denominado de período de refino;
- F. Ao final do período de refino, o forno é desligado e realiza-se a transferência do aço líquido para a panela de vazamento (*Tapping*), o

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

qual deve ser realizado o mais rápido possível para otimizar a produção.

A Figura 8 ilustra o processo de operação do forno elétrico, de acordo com os pontos supracitados [34].

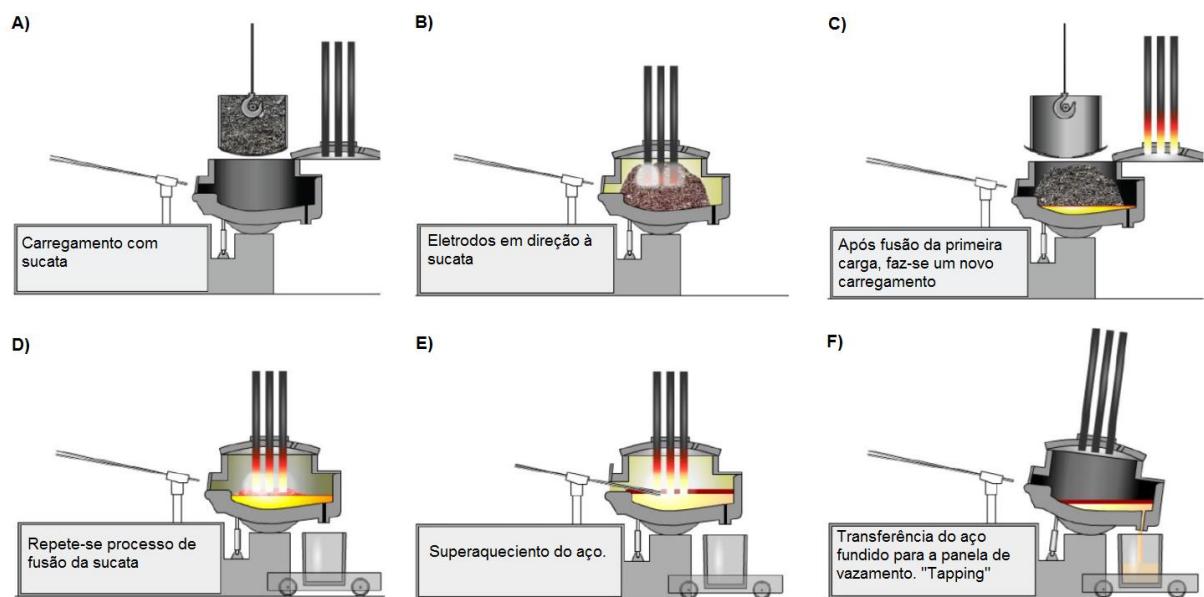


Figura 8- Processo de operação de um forno elétrico a arco [34].

3.2.2– Características elétricas de operação do forno a arco

As características elétricas de operação de um forno a arco são associadas especialmente com o comportamento do arco elétrico formado entre a ponta dos eletrodos e a carga metálica.

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

• Comportamento do arco elétrico durante operação do forno

Para compreender a operação de um forno a arco é necessário entender bem a natureza do arco. O arco é uma descarga elétrica na mistura de gases e vapores metálicos, em forma de plasma, que compõem a atmosfera do forno e forma uma coluna plasmática de grande intensidade luminosa entre dois “pontos quentes”, um na extremidade do eletrodo e outro na superfície de incidência do arco no metal fundido ou em fusão. A temperatura da coluna plasmática pode atingir valores superiores a 10.000 [K] e a concentração de energia é tal que corresponde a cerca de 30 [kW/cm³] [33].

Quando os eletrodos de grafite estão em contato com a carga metálica, a corrente elétrica atinge seu valor máximo operacional, já que essa situação corresponde a realizar um curto circuito no sistema. Quando os eletrodos são afastados da carga, estabelecem-se os arcos nas três fases. Afastando os eletrodos, a tensão de arco aumenta e a corrente diminui, e vice versa. Tal fato mostra que a resistência do arco opera como uma “resistência negativa”. Adicionalmente, como a queda de tensão no arco é proporcional à distância entre os eletrodos e a carga, verifica-se que a forma de onda de tensão do arco se aproxima ao de uma onda quadrada. Portanto, a tensão em vazio no secundário do transformador do forno, com forma de onda senoidal, se transforma, no arco, em uma onda que se assemelha à uma onda quadrada [33].

Tomando-se essas premissas, durante a operação do forno, inicialmente, constata-se uma elevada corrente e baixa tensão elétrica. Baixos valores de tensão (arco de comprimento curto) são selecionados a fim de proteger a abóbada e as paredes laterais do forno das elevadas temperaturas causadas pelo arco. Nesse processo inicial de fusão da sucata, verifica-se que a corrente elétrica é bastante

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

instável. Todavia, esse período é curto e não causa tanto prejuízo ao sistema elétrico. Uma vez que o arco penetra na sucata, a tensão é elevada (arco de comprimento longo) para fundir a carga. Esse é o principal período de fusão, constatando-se que a corrente permanece instável, mas com variações menores que no início. Ao final da fusão, quando forma-se todo o líquido de aço, as variações são menores, e o arco é novamente reduzido. A Figura 9 ilustra o comportamento do arco durante os principais estágios de operação.

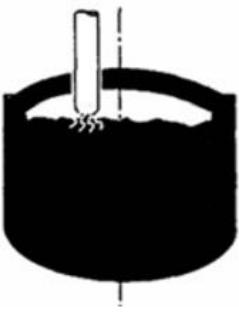
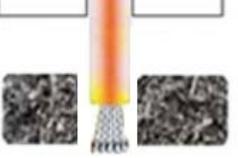
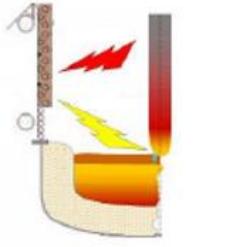
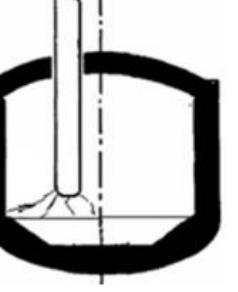
Estágio de Operação	I	II	III
Característica	 	 	 
Comprimento do arco	Curto	Longo	Curto
Característica V-I			

Figura 9 - Comportamento do arco elétrico durante operação do forno elétrico.

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

• Estágios de operação do forno a arco

Tomando-se o comportamento do arco elétrico, a operação do forno a arco pode ser dividida em três principais estágios:

- Perfuração;
- Fusão;
- Refino.

O processo de refino em alguns casos é realizado no chamado “forno panela”. Esta denominação se origina do fato de ser usada a própria panela de vazamento do forno de fusão como forno de refino. Para tanto, a panela de vazamento é colocada em baixo de três eletrodos alimentados por um transformador trifásico com potência adequada. A potência do forno panela é, aproximadamente, quatro vezes menor do que a do forno de fusão. Com este arranjo tem-se um melhor controle na operação de refino (composição química do aço) e uma maior capacidade de produção do conjunto forno e forno panela [33].

A Figura 10 mostra um ciclo do processo de fusão com forno a arco usando dois carregamentos de sucata. Um ciclo do processo corresponde ao que se denomina de “corrida”. Neste ciclo pode-se visualizar como varia a potência consumida com o tempo [34].

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

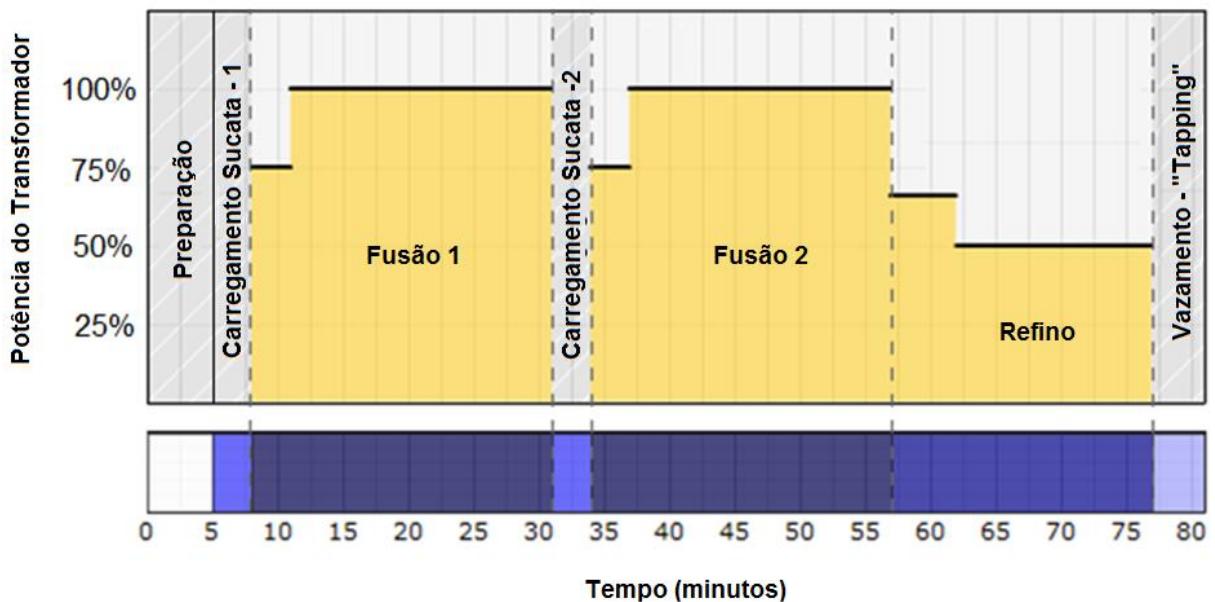


Figura 10 – Ciclo de operação de um forno a arco [34].

Percebe-se que, em um ciclo do processo ou em uma corrida, existem períodos de tempos em que o forno está solicitando energia da fonte (*power on*) e outros em que está desligado (*power off*). O tempo total de uma corrida é conhecido como “*tap to tap*” (TTT).

O período de perfuração da sucata é realizado com potência muito reduzida, a fim de diminuir o impacto do arco à abóbada e melhorar a estabilidade do arco que nesta fase é muito ruim. Durante este processo, os três arcos mudam constantemente de comprimento e direção, gerando elevadas flutuações de tensão e um conteúdo harmônico muito grande. Assim, a redução da potência durante este estágio minimiza estes efeitos. Além disso, o tempo de perfuração normalmente é muito curto [33].

Nos períodos de fusão utiliza-se a potência máxima de projeto do forno. Com a perfuração da sucata forma-se um pequeno banho líquido de aço no fundo do forno e o arco adquire uma melhor estabilidade. No final da fusão do último

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

carregamento é iniciada a formação de escoria espumante, a qual minimiza a radiação do arco sobre as paredes laterais do forno [33].

O final da fusão pode estar acompanhado de uma redução da tensão e potência do arco. Inicia-se, portanto, a primeira fase do refino com potência e comprimento do arco menores. Terminada esta fase o aço é vazado na panela de vazamento, a qual é dirigida ao forno panela para realizar a segunda fase de refino. Quando não existe o forno panela, as duas fases de refino são realizadas no próprio forno de fusão, adaptando as tensões e potências do arco às condições necessárias para evitar elevados consumos de refratários por exposição do arco [33].

As Figuras 11 a 13 destacam as formas de onda da corrente elétrica, em uma fase, para os três períodos de operação de um forno elétrico real, obtidas em uma medição de campo.

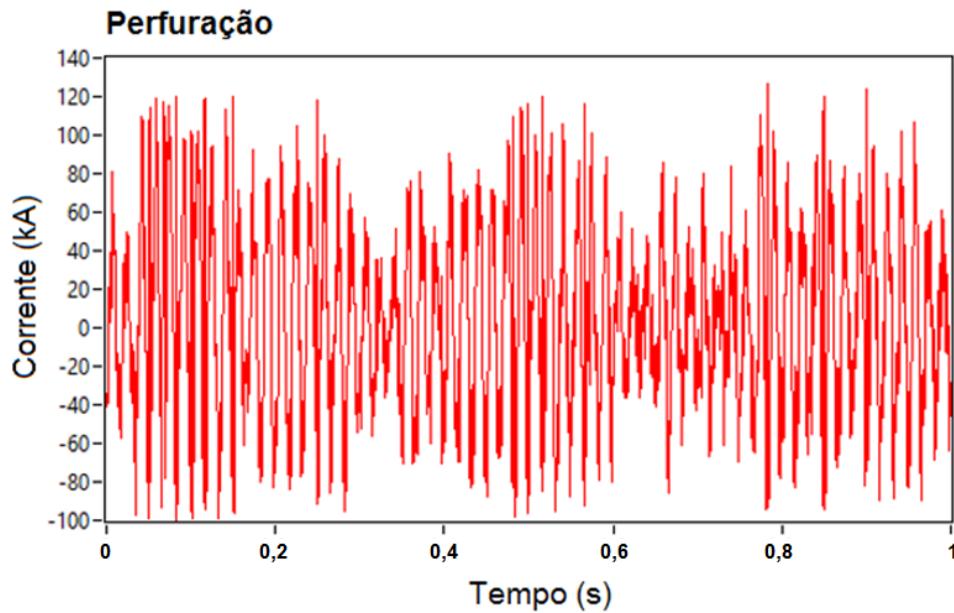


Figura 11 - Corrente instantânea no período de perfuração.

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

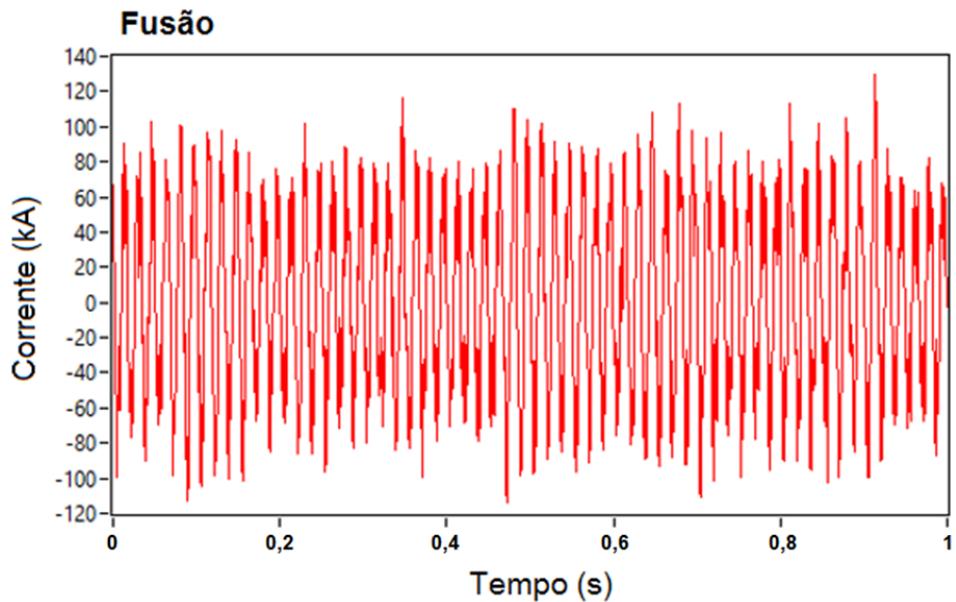


Figura 12 - Corrente instantânea no período de fusão.

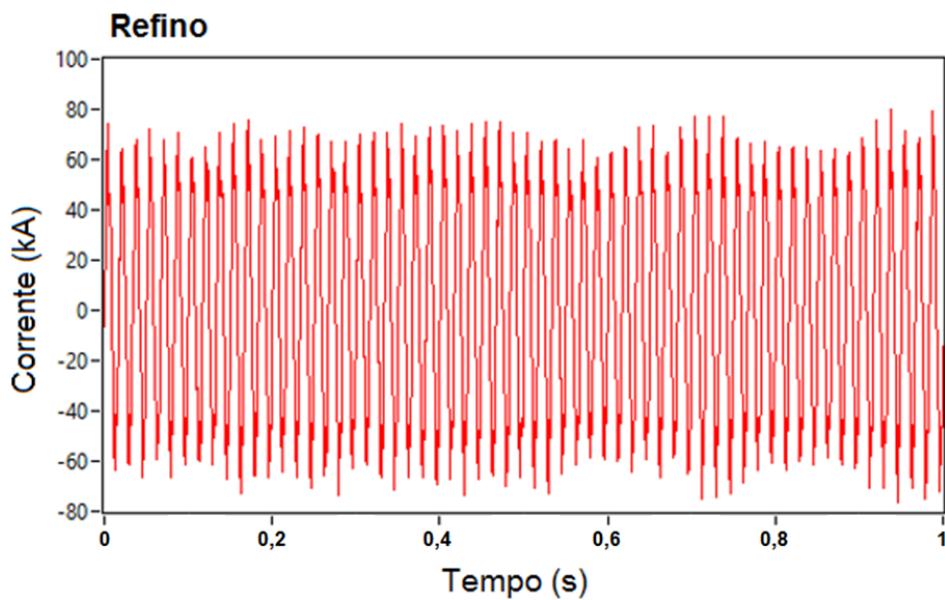


Figura 13 - Corrente instantânea no período de refino.

Conforme esperado, através das formas de onda, verifica-se que as variações de corrente são bem maiores na fase de perfuração da sucata, e são atenuadas na fase de refino.

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

Através da descrição sucinta de cada estágio de operação fica claro que o transformador do forno deve ter a possibilidade de operar com diversas tensões secundárias para ajustá-las às necessidades do processo. Muito embora o diagrama da Figura 10 apresente valores constantes de potência, na realidade, ela é bem variável devido à instabilidade maior ou menor do arco. O operador do forno deve controlar a relação entre a tensão (V) e a corrente (I) do arco, através da descida ou subida dos eletrodos e através do ajuste de tapes do transformador do forno, objetivando manter uma potência média constante e um elevado rendimento de operação. Este controle é realizado através dos reguladores de cada um dos eletrodos. Assim, durante o período de fusão, os reguladores constantemente ajustam a posição dos eletrodos em resposta a flutuações na corrente e na tensão. Por outro lado, no período de refino, somente pequenos ajustes da posição dos eletrodos são necessários para manter uma potência média constante. A Figura 14 ilustra o sistema de regulação de um típico forno a arco industrial [29].

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

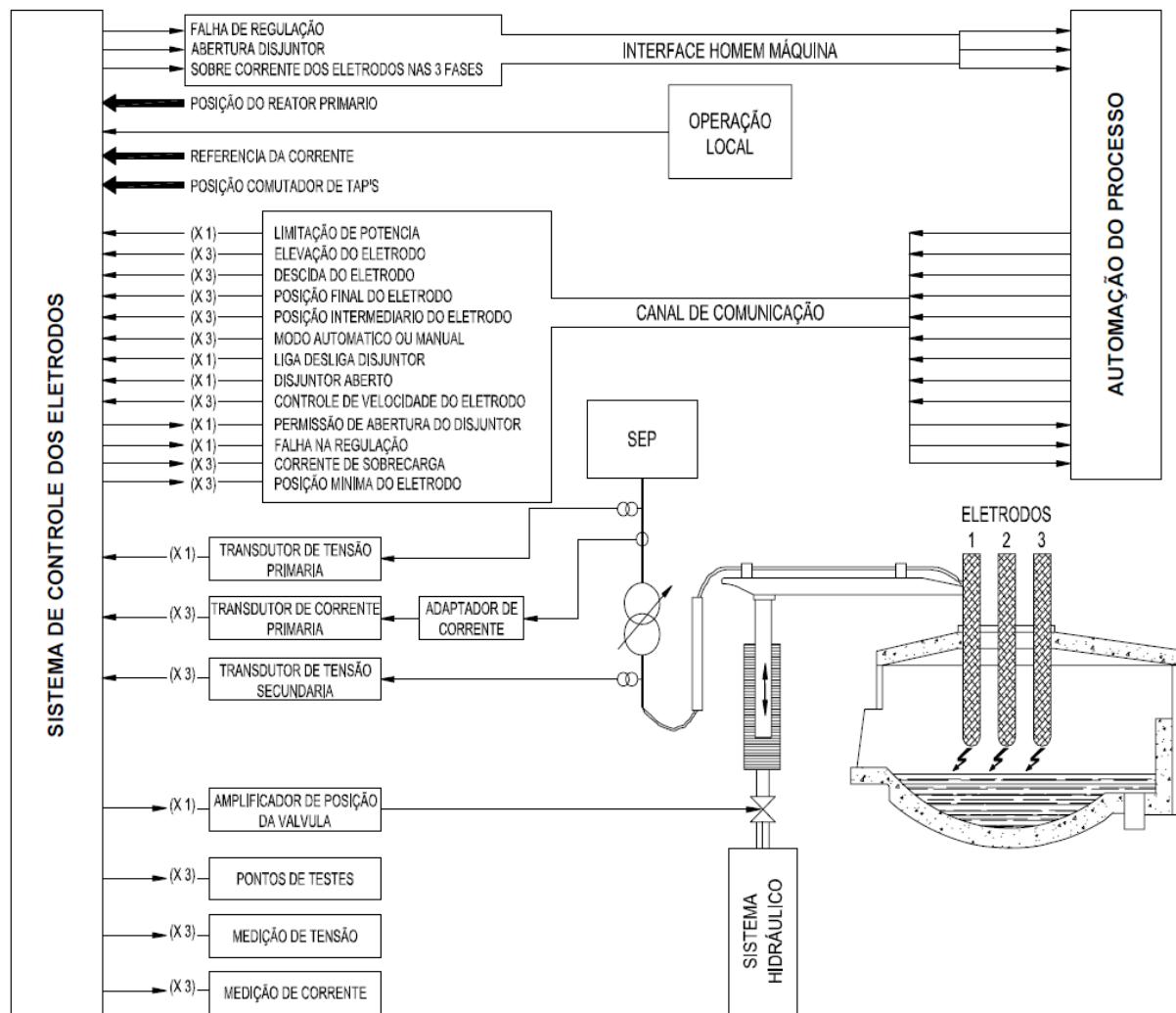


Figura 14- Sistema de controle de eletrodos.

3.3 – Proposta de modelagem

Dentre as discussões reportadas nesse documento, nota-se que a resposta elétrica do forno elétrico está diretamente associada ao comportamento do arco elétrico durante, principalmente, o processo de fusão da sucata. Diante da complexidade do fenômeno, já que o arco é caracterizado por uma variação randômica, verifica-se que grande parte dos modelos existentes para estudar as perturbações no sistema elétrico, são imprecisos ou muito complexos, tornando-

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

se portanto, impraticáveis. Diante deste cenário, apresenta-se a seguir, a técnica utilizada para propor um modelo de forno a arco que seja simples e preciso.

3.3.1–Análise estatística da característica elétrica de operação do forno a arco

Os fundamentos do modelo proposto nesse trabalho foram pautados em uma análise estatística do comportamento da corrente elétrica do forno durante o processo de fusão da sucata, objetivando extrair, caso exista, características comuns entre fornos a arco, com diferentes capacidades, e instalados em diferentes sistemas. Para tanto, foi disponibilizada a característica da corrente elétrica em dois fornos arco, obtidas em medições de campo.

- **Medições de Campo**

A Figura 15 ilustra o sistema elétrico, onde encontra-se instalado um forno a arco de 50 toneladas (FEA #1), o qual está conectado em um transformador de 33 [MVA]. Vale lembrar que a potência de um forno equivale à potência elétrica do transformador conectado ao mesmo.

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

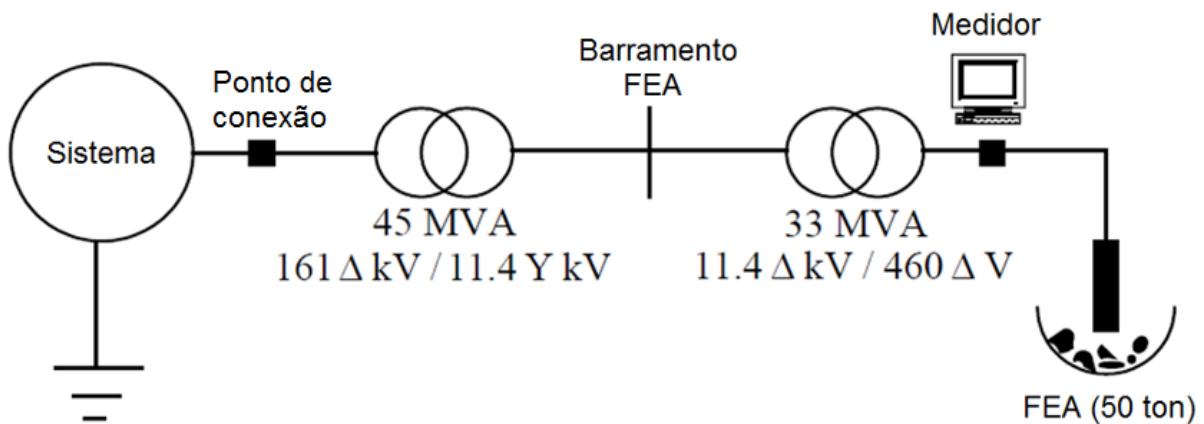


Figura 15 - Sistema elétrico onde está instalado FEA #1.

A Figura 16 apresenta o segundo sistema, onde encontra-se instalado um forno de 44 [MW] (FEA #2).

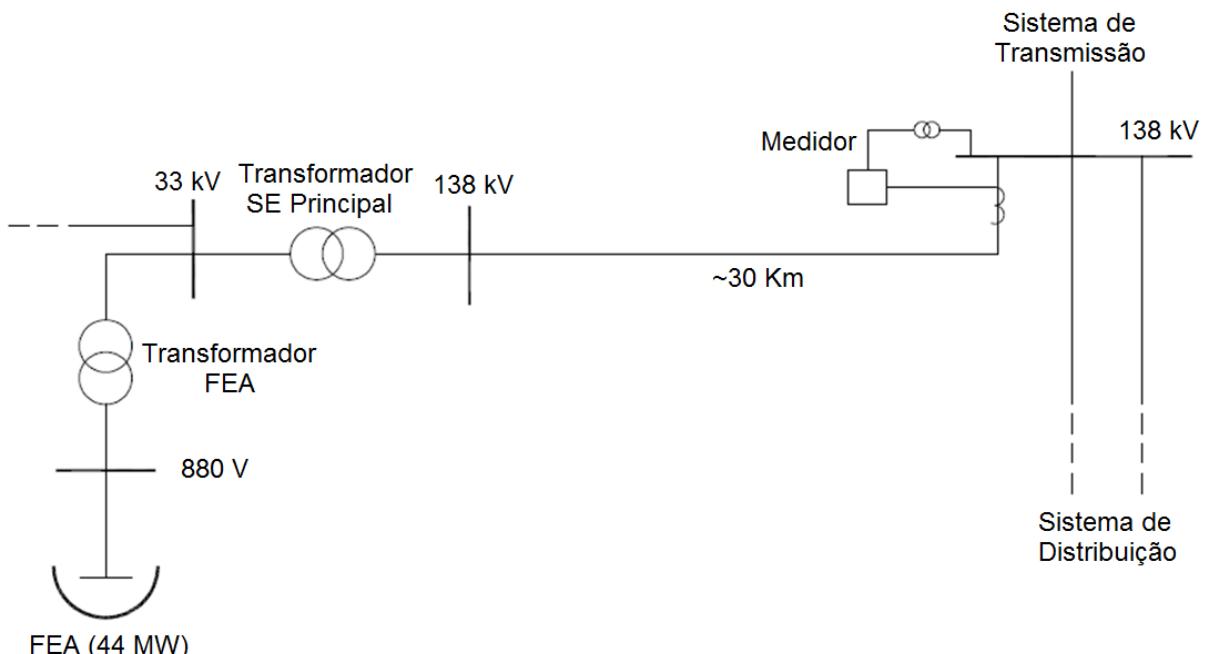


Figura 16 - Sistema elétrico onde está instalado FEA #2.

Observa-se que as medições em ambos os sistemas foram obtidas em diferentes pontos de conexão. Para o forno FEA #1, um medidor com taxa de amostragem de 3840 [Hz] (64 amostras/ciclo) foi instalado no secundário do

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

transformador de alimentação do forno. Por outro lado, no que se refere ao forno FEA #2, um medidor com taxa de amostragem de 6000 [Hz] (100 amostras/ciclo) foi instalado no ponto de acoplamento comum do sistema, ou seja no primário do transformador da subestação principal.

A Figura 17 apresenta a forma de onda da corrente elétrica dos fornos a arco FEA #1 e FEA #2 durante dez segundos do processo de fusão da sucata. Conforme esperado, devido aos diferentes pontos de conexão dos medidores, observa-se que há uma diferença da ordem de grandeza das magnitudes de corrente. Contudo, nesse momento, não há uma preocupação com valores quantitativos. As atenções estão direcionadas à característica da variação da corrente. E dessa forma, visualmente, nota-se que há um comportamento similar entre os dois fornos sob análise.

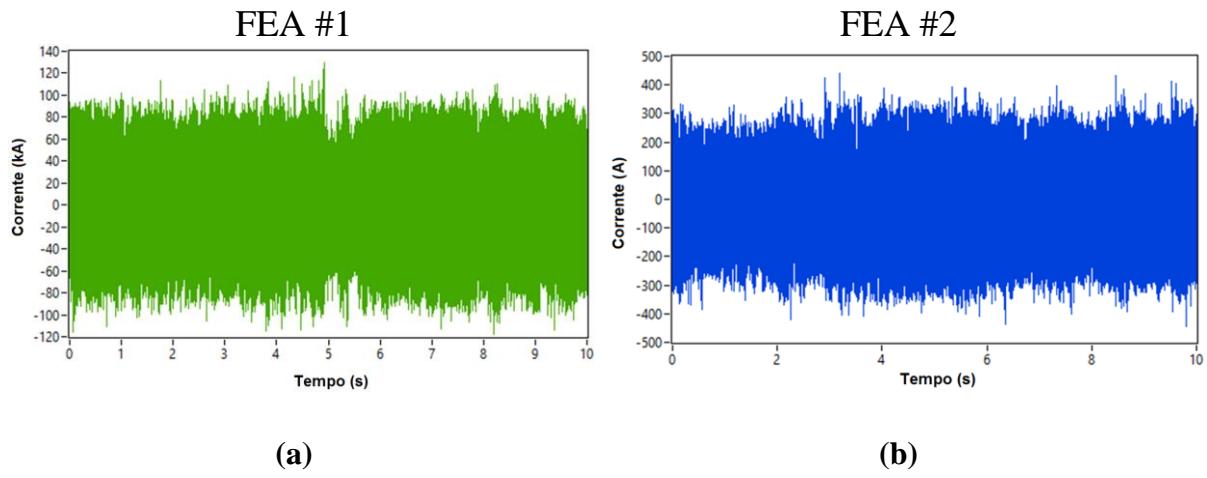


Figura 17 - Forma de onda da corrente elétrica instantânea durante processo de fusão da sucata: (a) FEA #1. (b) FEA #2.

A Figura 18 apresenta o espectro de frequências da corrente elétrica, tomando-se uma janela de um segundo da forma de onda instantânea de corrente dos fornos a arco FEA #1 e FEA #2. Verifica-se que as amplitudes das frequências harmônicas são maiores no FEA #1 que FEA #2. Tal fato justifica-se novamente

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

pelos diferentes pontos de conexão dos medidores. Por fim, nota-se que há um elevado conteúdo de componentes inter-harmônicas em ambos os espectros. Vale ressaltar que o fenômeno de flutuação de tensão está diretamente associado à presença dessas componentes.

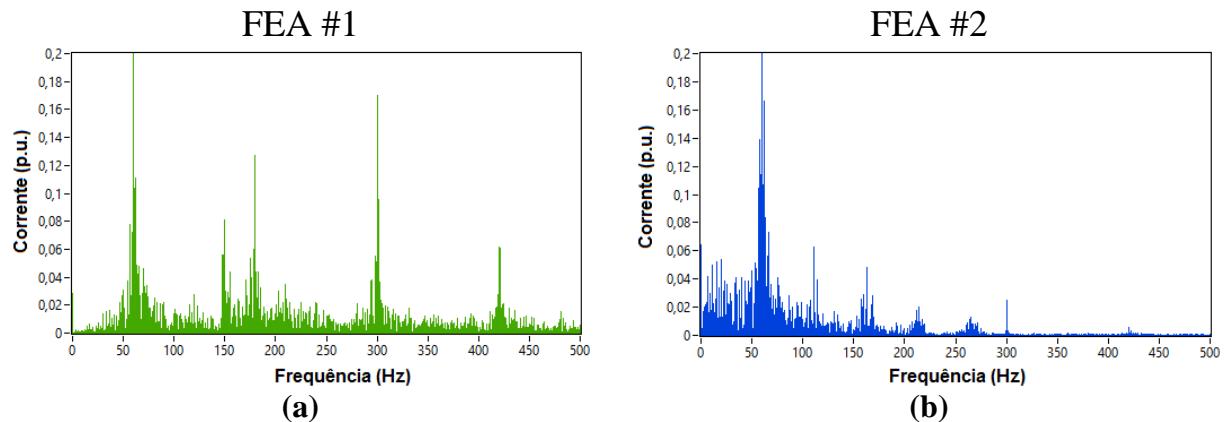


Figura 18 - Espectro de frequências da forma de onda da corrente instantânea durante processo de fusão da sucata: (a) FEA #1. (b) FEA #2.

• Análise Estatística

A análise estatística das medições de campo foram realizadas a partir da característica das formas de onda eficaz das correntes elétricas de ambos os fornos, as quais podem ser visualizadas através da Figura 19. Para fins comparativos, as formas de onda foram normalizadas pelos seus respectivos valores nominais de corrente eficaz.

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

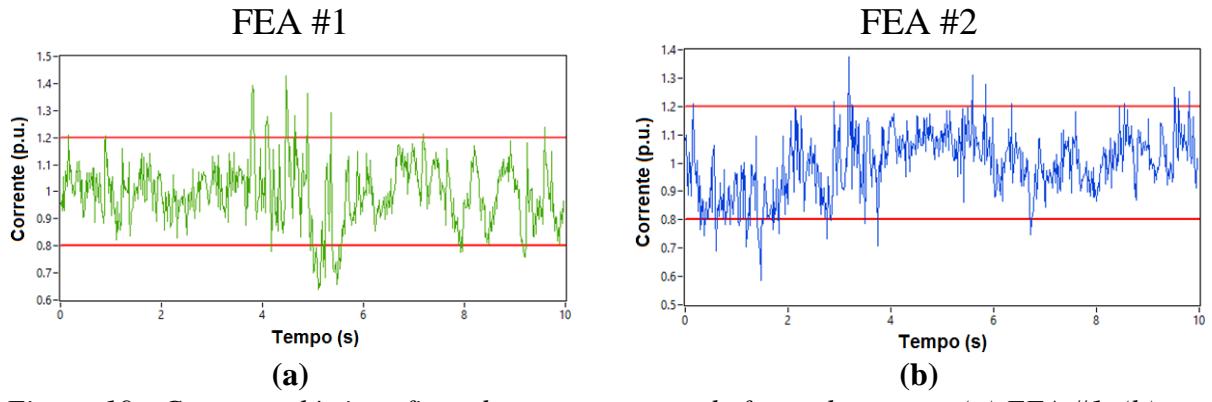


Figura 19 - Corrente elétrica eficaz durante processo de fusão da sucata: (a) FEA #1. (b) FEA #2.

As características da corrente eficaz de ambos os fornos podem ser consideradas como sendo uma série temporal. Uma série temporal é um conjunto de observações ordenadas no tempo, não necessariamente igualmente espaçadas, que apresentam dependência serial, isto é, dependência entre instantes de tempo.

A Figura 20 destaca o espectro de frequências da corrente eficaz dos dois fornos.

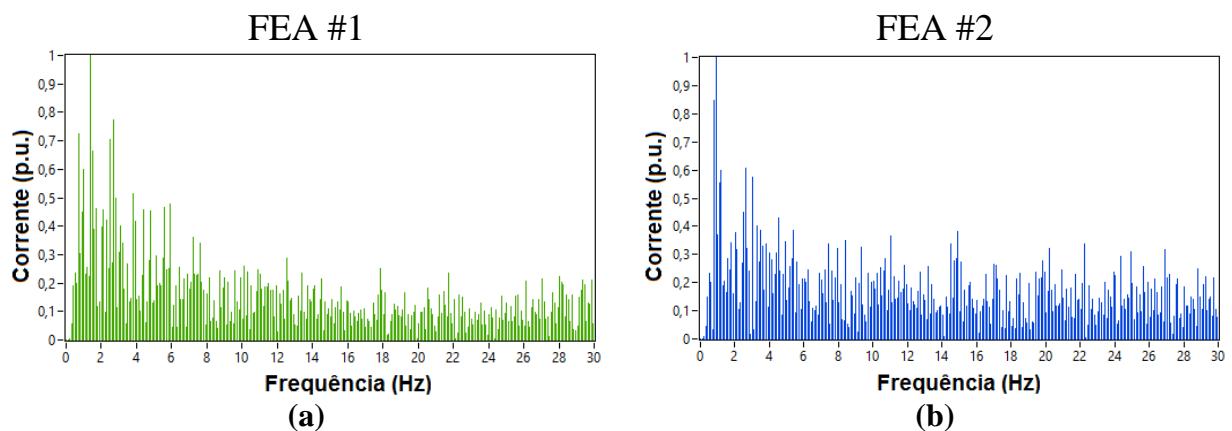


Figura 20 - Espectro de frequências da corrente eficaz durante processo de fusão da sucata:
 (a) FEA #1. (b) FEA #2.

Da corrente eficaz, constata-se que o processo de operação de um forno a arco tem um comportamento estocástico e dinâmico. Adicionalmente, verifica-se

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

que tanto a forma de onda quanto o espectro de frequências da corrente eficaz apresentam características similares em ambos os fornos.

A fim de detectar uma característica padrão, de ordem numérica, entre os dois fornos, alguns parâmetros estatísticos foram extraídos da corrente eficaz e comparados entre os dois fornos. Através da Tabela 7, verifica-se que para a maioria dos parâmetros analisados, as diferenças percentuais entre os valores são pequenas. Ressalta-se que o coeficiente de *Kurtosis* e de *Skewness* são associados à característica de distribuição normal de dados, ou seja, caso tenha-se um valor próximo de 3 para o coeficiente de *Kurtosis*, tem-se que a distribuição dos dados comporta-se como uma distribuição normal, e caso tenha-se um valor próximo de 0 para o coeficiente de *Skewness*, tem-se que há uma simetria dos dados. Dessa forma, muito embora as diferenças percentuais para tais parâmetros foram elevadas, a análise individual dos mesmos leva a concluir que a distribuição de dados de ambos os fornos se aproxima de uma distribuição normal.

Tabela 7 - Comparaçāo de parāmetros estatísticos entre os fornos FEA #1 e FEA #2.

Parāmetro	FEA #1	FEA #2	Diferença [%]
Média	0,9937	0,9931	0,06
Valor eficaz	1	1	0
Variância	0,01247	0,01374	9,7
Mediana	1	0,9941	0,6
Moda	1,0633	1,0463	1,6
Desvio Padrão	0,1117	0,1172	4,8
Coeficiente de <i>Kurtosis</i>	3,078	3,9519	24,86
Coeficiente de <i>Skewness</i>	-0,2041	-0,02458	57,0
Soma	595,258	594,879	0,063

Complementarmente, para confirmar os resultados obtidos dos coeficientes de *Kurtosis* e *Skewness*, plotou-se um histograma da corrente eficaz dos dois fornos. Através da Figura 21, nota-se que ambas formas de onda seguem de fato

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

uma distribuição normal. O coeficiente de correlação (aproximadamente 0,88) entre os dois histogramas destaca a similaridade entre as duas distribuições.

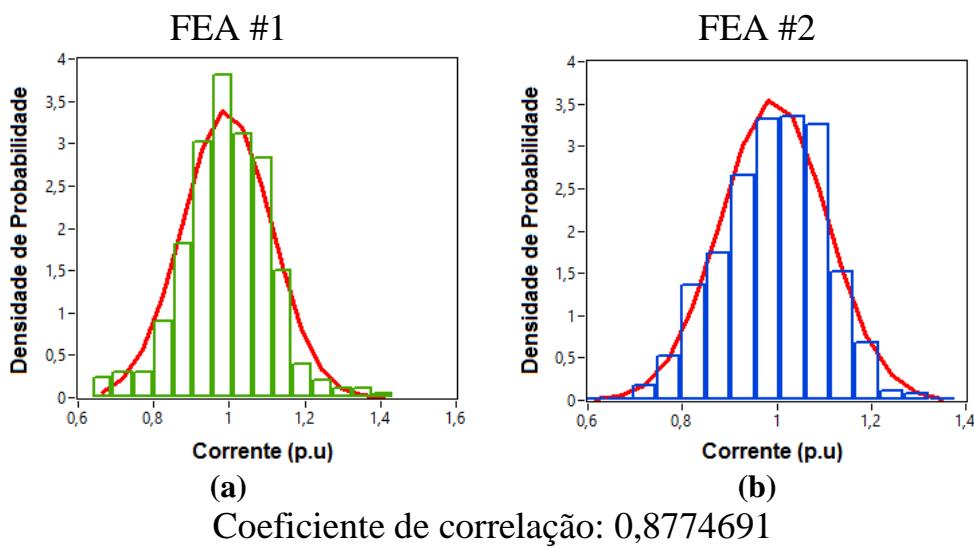


Figura 21 – Histograma da corrente eficaz: (a) FEA #1. (b) FEA #2.

Das características da corrente eficaz e dos histogramas, percebe-se que existe uma variação em torno de um valor médio. Dessa forma, pode-se dizer que há um comportamento estacionário. Para confirmar esse fato, a Tabela 8 apresenta os resultados do teste de estacionariedade. A estacionariedade numa série temporal significa que os dados oscilam sobre uma média constante, independentemente do tempo, com a variância das flutuações permanecendo essencialmente a mesma. Em outras palavras, a ideia básica de estacionariedade é que as leis de probabilidade que atuam no processo não mudam com o tempo, isto é, o processo mantém o equilíbrio estatístico.

Tabela 8 - Teste de estacionariedade.

Parâmetro	FEA #1	FEA #2
Média	Constante	Constante
Variância	Constante	Constante

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

Uma vez comprovada a estacionariedade, a relação entre a observação em determinado instante com aquela em um instante anterior foi analisada. Para tanto foi utilizado a função de autocorrelação. A autocorrelação entre as séries $I_{eficaz}(t)$ e $I_{eficaz}(t-1)$, por exemplo, (autocorrelação com *lag* ou atraso 1) indica como os valores de corrente eficaz estão relacionados com seus valores imediatamente precedentes, enquanto que a autocorrelação entre $I_{eficaz}(t)$ e $I_{eficaz}(t-2)$ (autocorrelação com atraso 2) fornecerá uma relação dos valores da corrente eficaz com aqueles atrasados em dois intervalos de tempo. Em geral, para uma série temporal, s_t , com n elementos, a autocorrelação, r , com atraso j , é calculada através de (10).

$$r_j = \frac{\sum_{t=1}^{n-j} (s_t - \bar{s}) \cdot (s_{t+j} - \bar{s})}{\sum_{t=1}^n (s_t - \bar{s})^2} \quad (10)$$

Onde:

- r_j : Autocorrelação;
- s_t : Série temporal;
- j : *Lag* ou Atraso;
- \bar{s} : Média da série temporal original de n elementos, admitida estacionária.

A Figura 22 apresenta as funções de autocorrelação das duas características da corrente eficaz, considerando-se atrasos em até 10 intervalos de tempo. Obviamente, devido ao processo estocástico e dinâmico, as funções não são totalmente idênticas. Todavia, verifica-se que as autocorrelações com atrasos 1 e 2 são similares nas duas funções, e há um decaimento exponencial à medida que o atraso é aumentado. Geralmente, a função de autocorrelação é gerada para

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

desenvolvimento de modelos de previsão de dados. Para os fins do presente trabalho, a mesma foi desenvolvida para destacar que há uma similaridade entre as auto correlações das duas séries temporais, considerando-se atrasos pequenos.

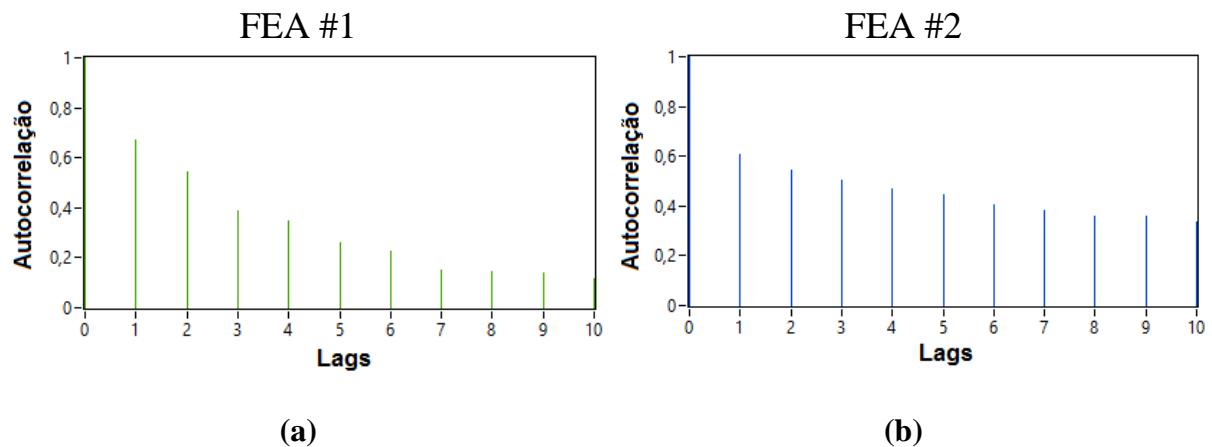


Figura 22 - Função de auto correlação da corrente eficaz: (a) FEA #1. (b) FEA #2.

Diante dos resultados obtidos através da análise estatística, muito embora a característica da corrente elétrica do forno a arco apresente uma variação bastante aleatória, constatou-se que há uma boa correlação do comportamento dessa corrente durante o período de fusão entre dois fornos a arco de diferentes capacidades, e instalados em diferentes sistemas.

3.3.2– Modelagem computacional

Uma vez detectado que o comportamento da variação da corrente elétrica não apresenta grandes alterações entre diferentes fornos a arco, esta seção apresenta uma técnica para modelagem computacional da carga, a qual foi baseada na característica do espectro de frequências da corrente elétrica instantânea. Assim, a partir de um conjunto de frequências, previamente

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

selecionadas, múltiplas e não-múltiplas da frequência fundamental, buscou-se desenvolver um modelo capaz de produzir um sinal no domínio do tempo. Esta transformação do domínio da frequência para domínio do tempo se faz necessária, visto que o fenômeno da flutuação de tensão é quantificado através da aplicação do flickermeter IEC, o qual representa um processamento de sinal no domínio do tempo.

Desta forma, a metodologia utilizada para modelagem da carga pode ser estruturada como segue:

- **Passo 1:** Toma-se como referência uma amostra da corrente instantânea normalizada durante o período de fusão do forno, conforme ilustra a Figura 23;

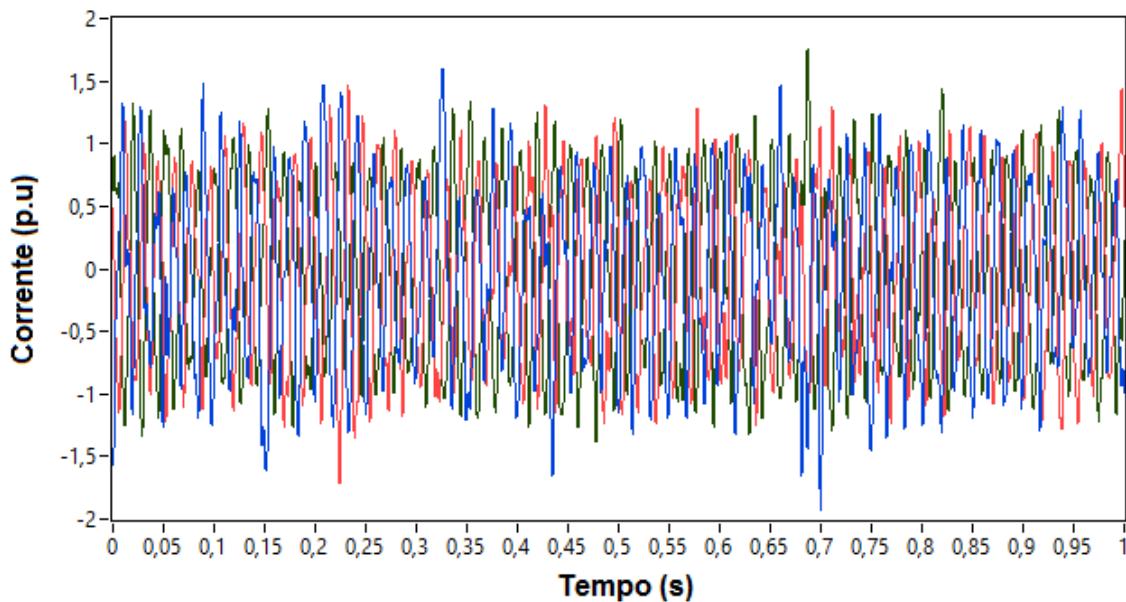


Figura 23 - Amostra de medição da corrente instantânea normalizada durante período de fusão do forno.

- **Passo 2:** Através do espectro de frequências extraído da corrente normalizada supracitada, seleciona-se as componentes não múltiplas da fundamental (frequências inter-harmônicas), as quais sejam

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

suficientes para representar de forma fiel o fenômeno de flutuação de tensão causado por um forno a arco. Conforme evidenciado em [2], verifica-se que as componentes inter-harmônicas mais próximas da fundamental são responsáveis pelas flutuações de tensão mais elevadas, considerando-se variação de tensão eficaz e de pico. Desta forma, conforme mostra a Tabela 9, as inter-harmônicas na faixa de 60 ± 15 [Hz] foram selecionadas para representar o comportamento do forno a arco.

Tabela 9 - Principais componentes de frequências harmônicas e inter-harmônicas da corrente no período de fusão do forno a arco.

Freq [Hz]	<i>I_{FEA}</i> Fase A		<i>I_{FEA}</i> Fase B		<i>I_{FEA}</i> Fase C	
	Amp [pu]	Ang. [graus]	Amp [pu]	Ang. [graus]	Amp [pu]	Ang. [graus]
45	0,08	-115,61	0,08	89,78	0,03	-13,11
47	0,06	-145,82	0,07	67,06	0,03	-60,63
49	0,02	-83,74	0,06	162,25	0,04	3,47
50	0,10	-131,58	0,05	79,51	0,04	16,31
51	0,11	170,40	0,03	39,50	0,06	-27,35
52	0,03	122,83	0,05	-74,22	0,02	88,37
53	0,07	157,32	0,01	78,00	0,05	-33,46
54	0,04	164,34	0,07	93,36	0,06	-60,62
55	0,11	142,36	0,09	22,33	0,07	-88,63
56	0,04	35,17	0,10	-18,86	0,09	175,74
57	0,14	100,74	0,06	-104,16	0,05	-59,79
58	0,07	4,39	0,07	157,36	0,02	-84,42
59	0,10	-119,38	0,10	89,99	0,04	-24,46
60	1,00	-175,84	1,00	96,02	1,00	-41,63
61	0,07	-62,10	0,08	-64,71	0,10	116,22
62	0,07	8,45	0,09	175,31	0,02	-39,47
63	0,16	37,21	0,07	163,89	0,09	-114,53
64	0,06	-150,53	0,10	42,04	0,03	-118,33
65	0,05	56,82	0,08	-32,56	0,07	178,07
66	0,07	36,11	0,08	-116,45	0,02	124,23
67	0,07	7,96	0,03	78,69	0,06	-153,33
68	0,05	-119,33	0,05	27,86	0,02	128,84
69	0,06	2,27	0,09	-49,65	0,09	151,20
70	0,07	-57,53	0,04	-84,31	0,08	111,56
71	0,05	-6,05	0,07	-157,30	0,03	60,50
73	0,02	-153,33	0,12	-39,78	0,08	131,83

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

- **Passo 3:** Uma vez definido o espectro de frequências para representar o forno a arco, foi proposta uma técnica para traduzir o conjunto espectral da carga em um sinal no domínio do tempo, de tal forma que a corrente elétrica solicitada pela rede elétrica seja similar à forma de onda real do equipamento sob simulação. Assim, para atingir esse objetivo, foi proposto o circuito equivalente representado pela Figura 24.

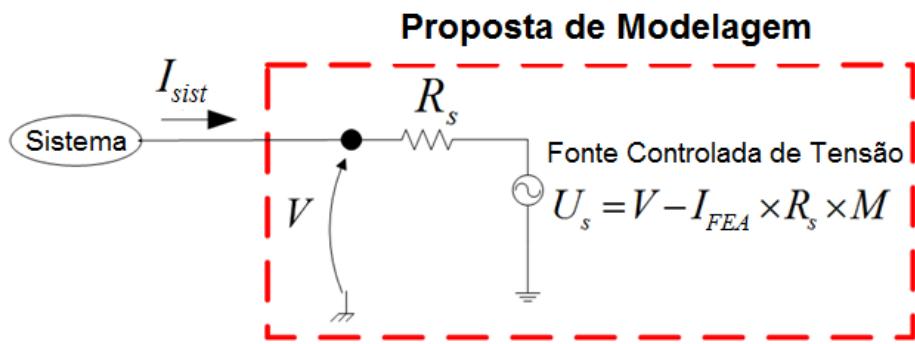


Figura 24 - Metodologia proposta para modelagem do forno a arco.

Através de (11), nota-se que a corrente solicitada pelo sistema, I_{sist} , será representada pela característica da carga, I_{FEA} .

$$\begin{aligned}
 I_{sist} &= \frac{V - U_s}{R_s} \\
 I_{sist} &= \frac{V - (V - I_{FEA} \times R_s \times M)}{R_s} \\
 I_{sist} &= \frac{V - V + I_{FEA} \times R_s \times M}{R_s} \\
 I_{sist} &= \frac{I_{FEA} \times R_s \times M}{R_s} \\
 I_{sist} &= I_{FEA} \times M
 \end{aligned} \tag{11}$$

Onde:

I_{sist} : Corrente solicitada pelo sistema;

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

V : Potencial na carga;

U_s : Fonte de tensão controlada;

R_s : Resistência de valor constante com a finalidade de fornecer uma diferença de potencial. Foi utilizada uma resistência já que a mesma não influencia no ângulo da tensão. Neste trabalho foi utilizado um valor igual a 100 [Ω]. Porém, poderia ser utilizada qualquer outro valor, já que a corrente do sistema não depende de seu valor;

I_{FEA} : Corrente normalizada da carga, a qual é representada pela sobreposição das frequências múltiplas e não múltiplas da fundamental, cujos valores estão destacados na Tabela 9;

M : Controle para variar a corrente da carga. A Figura 25 mostra que o valor de M é variado de acordo com a potência do forno a ser analisado.

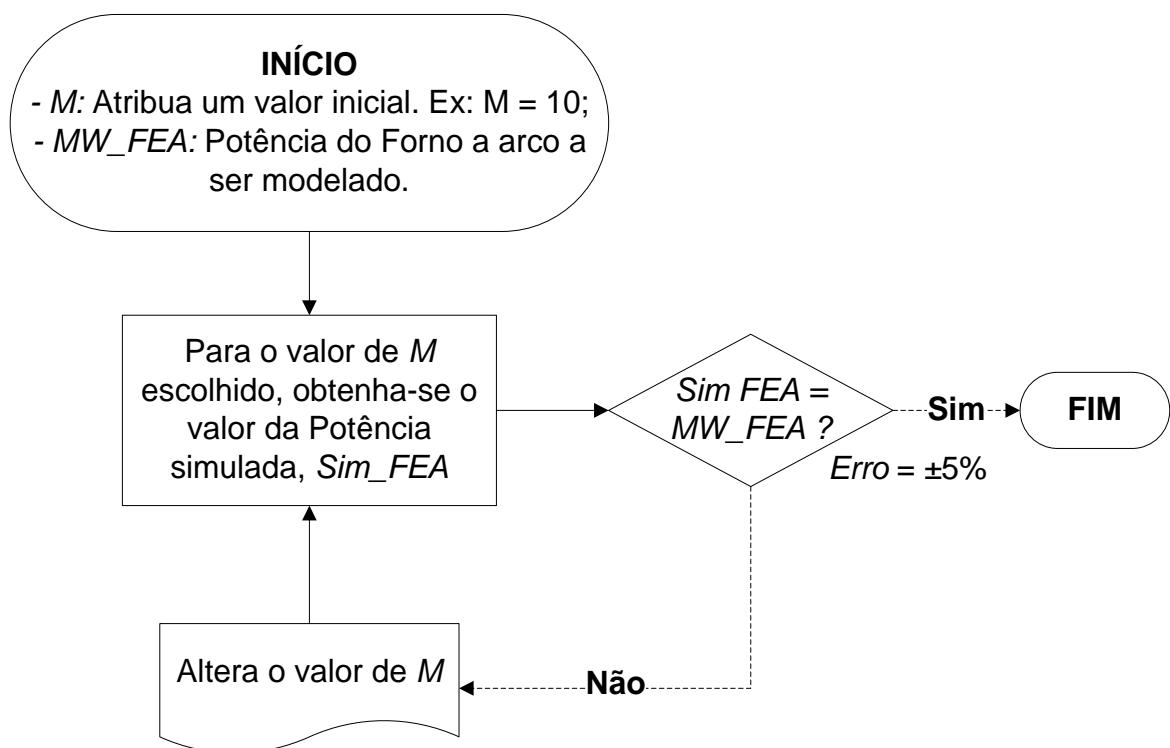


Figura 25 - Processo para ajustar a potência do forno a arco a ser modelado.

Através do ajuste do parâmetro M, qualquer forno pode ser modelado. Uma vez que a característica do forno a arco foi identificada apenas a partir da análise de dois fornos a arco, a avaliação estatística de outras medições se fazem necessárias para obter uma maior certeza que essas cargas possuem de fato uma resposta padrão.

3.3.3– Validação do Modelo

A característica do espectro de frequências da corrente do forno a arco e o circuito equivalente proposto, conforme Tabela 9 e Figura 24, respectivamente, foram implementados no programa computacional *ATPDraw*, utilizando *TACS*. Todavia, qualquer outro programa no domínio do tempo poderia ser utilizado. A Figura 26 mostra a corrente normalizada obtida em simulação. Verifica-se que a variação da corrente instantânea simulada é bastante similar àquela da medição, a qual é ilustrada pela Figura 23. Ou seja, constata-se que o circuito equivalente implementado, destacado na Figura 24, representou de forma adequada a característica da corrente do forno a arco.

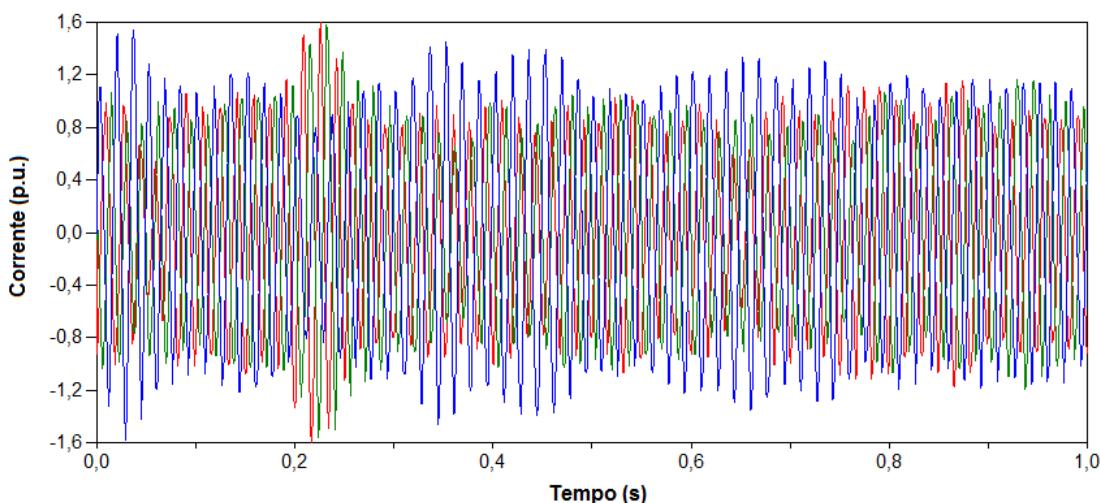


Figura 26 - Corrente instantânea simulada durante período de fusão do forno.

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

Para analisar a confiabilidade do modelo proposto, destacando que a metodologia pode ser empregada para qualquer forno, o fenômeno de flutuação foi avaliado no sistema elétrico ilustrado pela Figura 27, o qual apresenta um forno elétrico a arco real de aproximadamente 85 [MVA] localizado na *Southern Company - Alabama Power Company, Birmingham* [45].

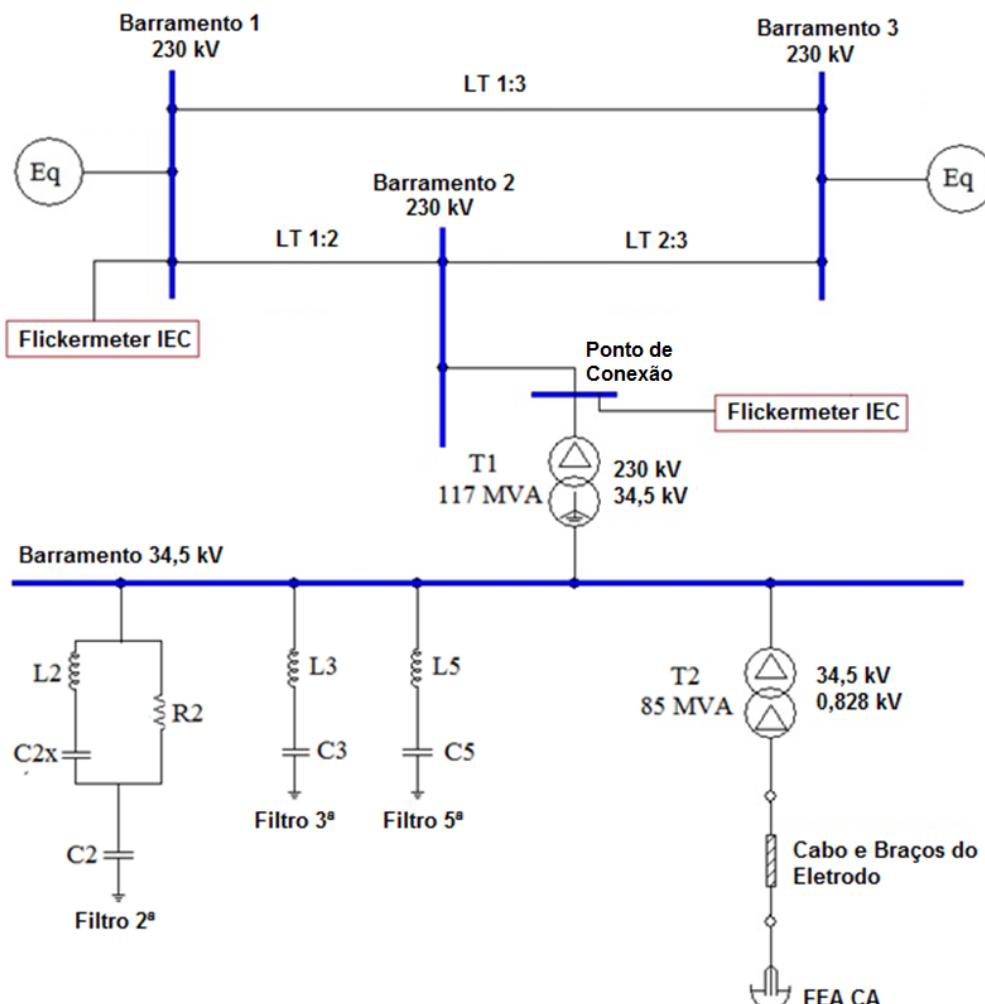


Figura 27 - Diagrama unifilar do sistema elétrico modelado para avaliação do fenômeno de flutuação de tensão devido à instalação de um forno a arco.

A Tabela 10 apresenta os parâmetros do sistema sob análise.

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

Tabela 10 - Parâmetros do sistema modelado.

Parâmetro	Valor
Sistema Eq Barramento #1:	$Z = 0,35 + j4,26 [\Omega]$
Sistema Eq Barramento #3:	$Z = 0,67 + j9,87 [\Omega]$
LT 1:2	$Z = 0,43 + j4,50 [\Omega]$
LT 1:3	$Z = 6,41 + j46,87 [\Omega]$
LT 2:3	$Z = 1,17 + j11,53 [\Omega]$
T1:	$Z = 5 \%, X/R = 10$
T2:	$Z = 1,94 \%, X/R = 10$
Cabo e braços do eletrodo:	$Z = 0,0332 + j2,7 [m\Omega]$
Filtro harmônico de 2 ^a ordem:	$L2 = 49,3 [\text{mH}]$; $C2 = 49,91 [\mu\text{F}]$; $C2x = 149,7 [\mu\text{F}]$; $R2 = 800 [\Omega]$
Filtro harmônico de 3 ^a ordem:	$L3 = 21 [\text{mH}]$; $C3 = 37,67 [\mu\text{F}]$
Filtro harmônico de 5 ^a ordem:	$L5 = 11 [\text{mH}]$; $C5 = 25,18 [\mu\text{F}]$

Para análise do fenômeno das flutuações de tensão, os valores de P_{st} simulados foram comparados tanto com os valores de P_{st} medidos, quanto com os valores de P_{st} obtidos através de outras técnicas de modelagem. Para obter os valores de P_{st} , implementou-se o modelo do *flickermeter* IEC, seguindo as recomendações do protocolo IEC 61000-4-15. Em resumo, este protocolo é essencialmente uma ferramenta de processamento de sinal, composta por cinco blocos, o qual utiliza a tensão como entrada, obtendo-se a sensação instantânea de *flicker* na saída. O valor de P_{st} (índice de *flicker* de curta duração) é resultado de uma classificação estatística das sensações instantâneas de *flicker*, tomando-se uma duração de 10 minutos. O índice de *flicker* de longa duração, denominado de P_{lt} , é calculado através de um conjunto de valores de P_{st} , considerando-se geralmente um período de 2 horas, ou seja, 12 valores de P_{st} . Maiores detalhes desse protocolo serão apresentados no próximo capítulo.

Durante o processo de fusão, a característica da corrente do forno não apresenta grandes variações a ponto de causar grandes variações dos valores de P_{st} ao longo de todo o período de fusão da sucata. Desta forma, no que tange o

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

fenômeno de flutuação de tensão, a análise apenas do indicador P_{st} é suficiente para avaliar o impacto do forno no sistema elétrico. Conforme ilustra a Figura 27, o *flickermeter* IEC foi instalado no Barramento #1 e no ponto de conexão do sistema.

A tensão eficaz no Barramento #1 e no ponto de conexão são apresentadas através da Figura 28. Verifica-se que ambos gráficos têm comportamento similar. Entretanto, conforme esperado, existe uma atenuação da flutuação de tensão do ponto de conexão em direção ao Barramento #1. Consequentemente, espera-se que o valor de P_{st} no ponto de conexão seja maior que no Barramento #1.

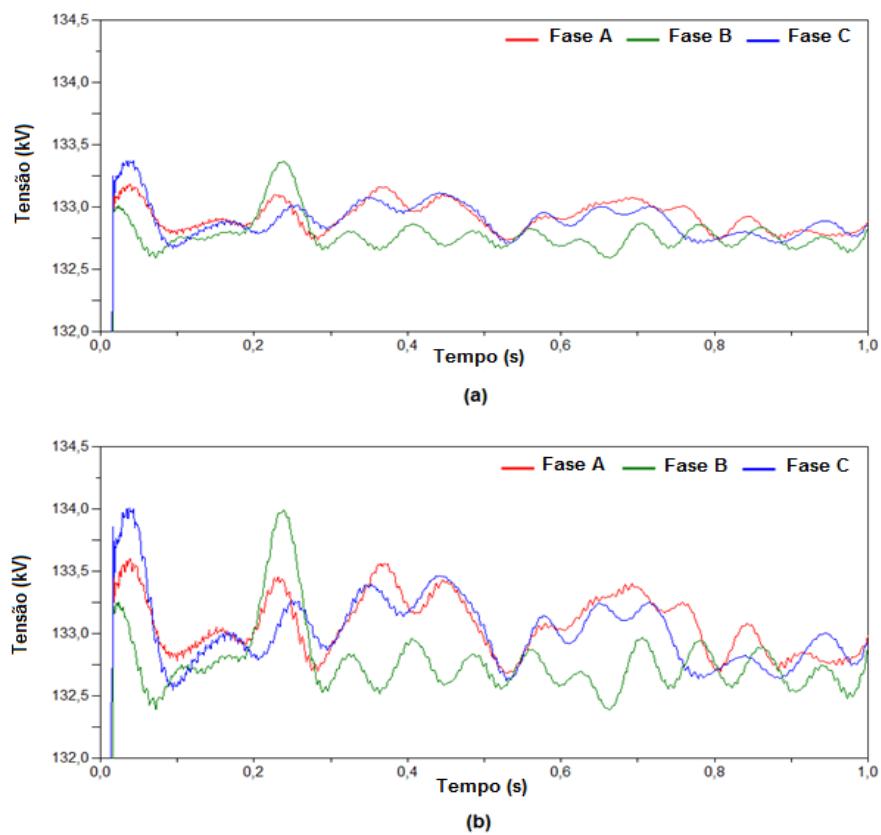


Figura 28 - Tensão eficaz. (a) Barramento #1. (b) Ponto de conexão.

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

A Figura 29 apresenta a potência total do forno. Nota-se que a máxima potência simulada (aproximadamente 88 [MVA]) encontra-se próxima da potência do forno sob análise (85 [MVA]).

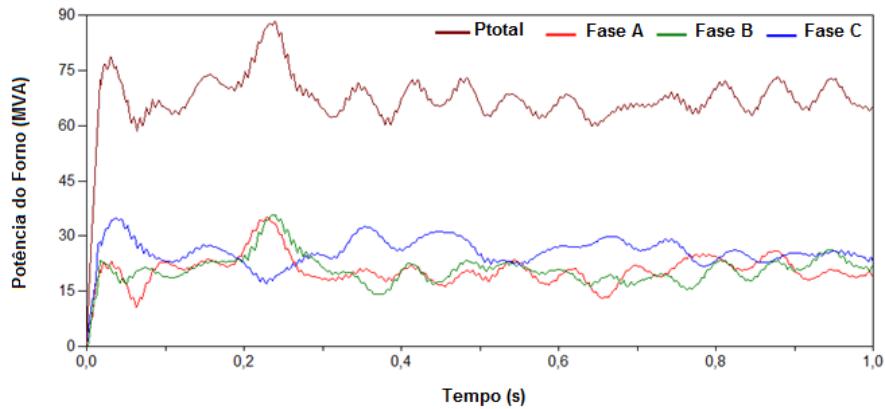


Figura 29 - Potência do forno por fase e total simulada.

As Tabelas 11 e 12 destacam, respectivamente, os resultados dos valores de P_{st} no Barramento #1 e no ponto de conexão do sistema elétrico, obtidos por simulação e por medição em campo.

Tabela 11 - Comparaçāo entre os valores de P_{st} simulados e medidos no Barramento #1.

Modelo	Valor de P_{st} [pu]			
	Fase A	Fase B	Fase C	Média
Modelo Proposto	0,81	1,15	1,15	1,04
Medição	1,01	0,88	1,01	0,97
Modelo Domínio da Frequência $Kst = 60$ [11]	0,59	-	-	0,59
Modelo Domínio da Frequência $Kst = 75$ [11]	0,74	-	-	0,74
Modelo Domínio do Tempo #1 [43]	1,23	1,28	1,28	1,26
Modelo Domínio do Tempo #2 [43]	0,57	0,60	0,60	0,59
Modelo Domínio do Tempo #3 [45]	1,00	0,94	0,94	0,96

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

Tabela 12 - Comparação entre os valores de P_{st} simulados e medidos no ponto de conexão.

Modelo	Valor de P_{st} [pu]			
	Fase A	Fase B	Fase C	Média
Modelo Proposto	1,67	2,37	2,38	2,14
Medição	2,09	1,81	2,11	2,00
Modelo Domínio da Frequência $Kst = 60$ [11]	1,2	-	-	1,2
Modelo Domínio da Frequência $Kst = 75$ [11]	1,5	-	-	1,5
Modelo Domínio do Tempo #1 [43]	2,48	2,57	2,57	2,54
Modelo Domínio do Tempo #2 [43]	1,11	1,18	1,14	1,14
Modelo Domínio do Tempo #3 [45]	2,07	1,94	1,93	1,98

Diante dos resultados destacados nas Tabelas 11 e 12, nota-se o valor máximo e médio de P_{st} obtido pelo modelo proposto são bastante próximos com aqueles obtidos por medição, tanto no Barramento #1, quanto no ponto de conexão. Uma vez que os maiores valores de P_{st} são utilizados para condições de planejamento, as diferenças entre os valores de cada fase não representam algum problema.

Ressalta-se que a proximidade dos valores de P_{st} entre o modelo apresentado em [45] e a medição já era esperada, visto que tal modelo foi fundamentado nas medições do sistema analisado. Ao contrário da modelagem proposta nesse trabalho, o modelo em [45] não pode ser considerado como sendo genérico, já que o mesmo não foi testado para fornos diferentes. Comparando-se os resultados do modelo proposto com as outras técnicas [11, 43], verifica-se que a metodologia proposta é mais exata. Portanto, dos resultados apresentados, constata-se que o modelo proposto de forno a arco nesse trabalho pode ser utilizado para a predição do nível de *flicker*.

3.4 – Considerações Finais

Este capítulo, inicialmente, apresentou as principais definições e características de operação de um forno arco, a qual está associada principalmente com o comportamento do arco elétrico nos três estágios de operação, quais sejam: perfuração, fusão e refino. Uma vez compreendido o funcionamento do equipamento, buscou-se propor um modelo de forno a arco para estudos de planejamento no âmbito do fenômeno da flutuação de tensão, ou seja, desenvolver uma ferramenta para predição de *flicker* quando do acesso de fornos a arco na rede elétrica. O modelo proposto é prático e simples, e os resultados apresentaram-se bastante satisfatórios. A metodologia utilizada foi fundamentada no fato de que muito embora a característica do arco elétrico tem um comportamento estocástico, verificou-se através de análises estatísticas que há uma característica padrão entre diferentes fornos. Dessa forma, a característica do espectro de frequências da corrente elétrica de um forno real foi utilizada para modelagem da carga. Para desenvolvimento do modelo, considerou-se apenas a característica de operação associada ao período de fusão da sucata, já que nesse estágio, além de ser o mais longo, o arco elétrico apresenta grandes variações. Apesar do período de perfuração apresentar variações ainda maiores, tal estágio é muito curto. No que se refere ao período de refino, uma vez que todo o aço líquido já está formado, as variações do arco e, consequentemente da corrente elétrica são bem suaves. Uma das grandes vantagens da proposta é que qualquer forno pode ser modelado através do simples ajuste de um parâmetro do modelo. Tal parâmetro varia de acordo com a potência do forno a ser analisado. Buscando destacar essa praticidade da proposta, modelou-se um sistema elétrico real, onde encontra-se instalado um forno a arco. A proposta foi validada através da

CAPITULO III – Uma Proposta para Modelagem de Fornos Elétricos a Arco para Avaliação do Fenômeno das Flutuações de Tensão

avaliação do fenômeno de flutuação de tensão, causada pela conexão do forno. Para tanto, os indicadores de P_{st} medidos e simulados foram comparados, e verificou-se que há uma boa proximidade entre tais valores, provando que o modelo proposto pode ser utilizado para predição do efeito *flicker*.

Diante do exposto, a técnica utilizada para modelagem do forno elétrico a arco também pode ser empregada para modelagem de outros tipos de cargas, desde que o objetivo seja voltado para análise do impacto da carga no sistema.

CAPÍTULO IV

Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

4.1 – Considerações iniciais

De acordo com a norma IEC 61000-4-15 [1], as flutuações de tensão devem ser medidas e quantificadas através do uso do medidor de cintilação luminosa, conhecido na bibliografia como *flickermeter*. Este medidor avalia o incômodo sofrido pelo olho humano, utilizando como referência a variação do fluxo luminoso produzido em uma lâmpada incandescente, em decorrência do fenômeno das flutuações de tensão. Porém, sabe-se que estas lâmpadas estão praticamente em desuso, já que em busca de uma maior eficiência no uso da energia elétrica estão sendo rapidamente substituídas pelas lâmpadas fluorescentes compactas (LFC) e LED. Esse cenário tem revelado algumas limitações do *flickermeter*. Por exemplo, há situações em que o efeito de cintilação luminosa pode ser constatado nas LFCs (sensibilizadas pela modulação do valor de pico da tensão), enquanto que nas lâmpadas incandescentes (sensibilizadas pelo valor eficaz da tensão) não se observa qualquer efeito [8].

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

Assim, o *flickermeter* proposto pela IEC e utilizado em todo o mundo não acusaria qualquer distúrbio na rede, já que a metodologia empregada em sua implementação se baseou nas lâmpadas incandescentes, as quais respondem apenas à variação do valor eficaz da tensão. Verifica-se que a principal causa das deficiências do *flickermeter* IEC está associada com a presença de elevadas componentes inter-harmônicas nos sinais de tensão. Ressalta-se que as flutuações de tensão não estão correlacionadas apenas às variações abruptas de carga, mas também com a superposição das inter-harmônicas nos sinais da rede. Ao longo dos últimos anos, tem-se considerado a relação direta existente entre esses dois fenômenos. Em termos práticos, sabe-se hoje que não é possível a existência de flutuações de tensão sem a existência de componentes inter-harmônicas nos sinais de tensão associados [2, 3, 5].

À luz dessas considerações, o presente capítulo tem por objetivo contribuir nos seguintes pontos:

- Destacar a relação direta existente entre o fenômeno das flutuações de tensão e a presença de componentes inter-harmônicas de tensão.
- Mostrar as deficiências do *flickermeter* diante da superposição das inter-harmônicas nos sinais de tensão. Para tanto, alguns ensaios laboratoriais com lâmpadas incandescentes e compactas serão realizados para comprovar as limitações do medidor;
- Apresentar uma proposta, fundamentada na variação do fluxo luminoso, para qualificação e quantificação do fenômeno das flutuações de tensão através do efeito da cintilação luminosa.

4.2 – Relação entre o fenômeno de flutuação de tensão e a superposição de componentes inter-harmônicas nos sinais da rede

Uma das formas de se caracterizar a relação flutuação de tensão e frequência inter-harmônica pode ser obtida analiticamente, através da expressão matemática que define a frequência da flutuação de tensão, conhecida também por frequência de modulação, a qual pode ser determinada através de (12) [5]:

$$f_m = |f_{IH} - h \cdot f_1| \quad (12)$$

Onde:

- f_m - é a frequência de modulação da tensão;
- f_{IH} - é a frequência da inter-harmônica sobreposta ao sinal da rede;
- f_1 - é a frequência fundamental;
- h - é a ordem harmônica mais próxima da componente inter-harmônica.

Por exemplo, tomando-se como referência a frequência fundamental de 60 [Hz] do sistema, as componentes inter-harmônicas com frequências iguais a 40 [Hz] e 80 [Hz], quando sobrepostas ao sinal fundamental, promovem o aparecimento de uma modulação do sinal fundamental, com uma frequência de 20 [Hz]. A Figura 30 apresenta o gráfico associado à (12). Da análise da Figura 30, observa-se que a máxima frequência de modulação fisicamente possível de ocorrer, em função de uma determinada componente inter-harmônica, é igual a 30 [Hz]. Adicionalmente, conforme esperado, a frequência de modulação para componentes harmônicas é nula.

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

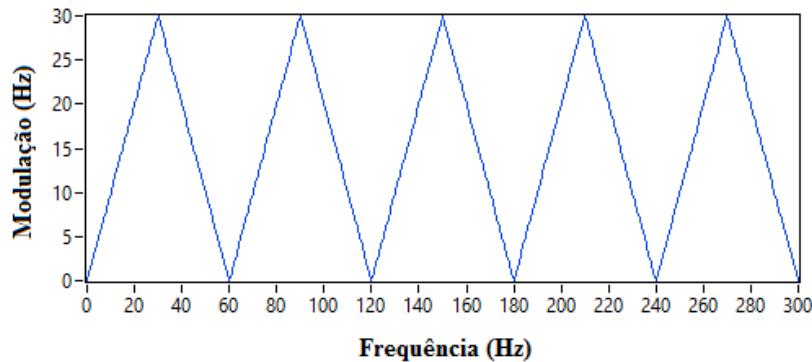


Figura 30 - Comportamento da frequência de modulação em função da sobreposição de componentes harmônicas e inter-harmônicas.

No que se refere à característica da amplitude da modulação de tensão em função das componentes inter-harmônicas sobrepostas, verifica-se que há comportamentos distintos quando analisa-se a variação da tensão eficaz e a variação da tensão de pico. As Figuras 31 e 32 apresentam, respectivamente, os gráficos característicos da modulação do valor eficaz e do valor de pico da tensão. Para tanto, considerou-se uma amplitude fixa da componente inter-harmônica igual a 3% em relação ao valor eficaz ou de pico da componente fundamental.

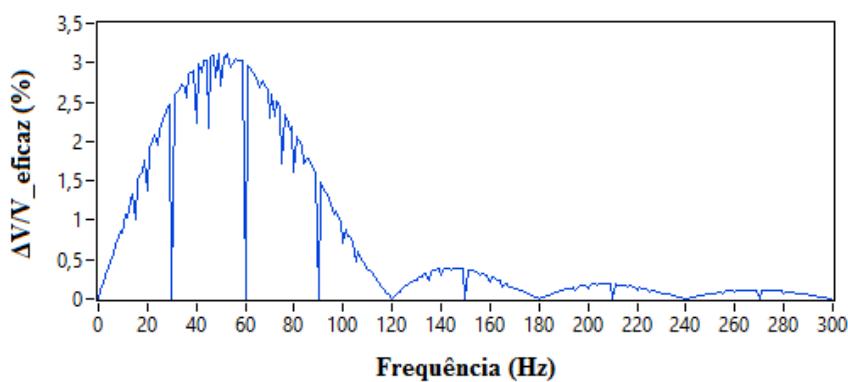


Figura 31 - Comportamento da modulação do valor eficaz em função da sobreposição de componentes harmônicas e inter-harmônicas.

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

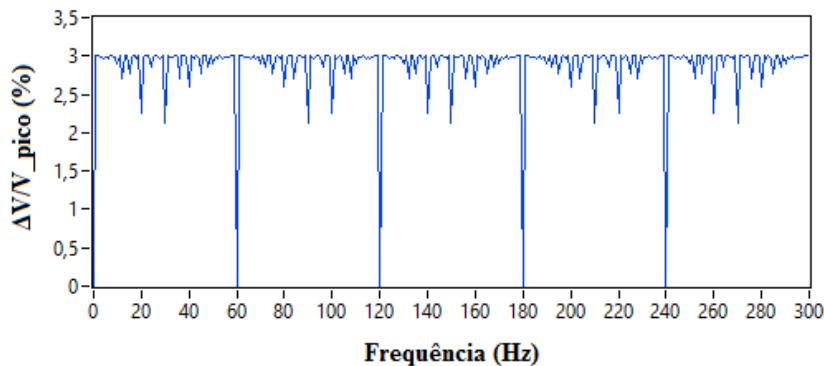


Figura 32 - Comportamento da modulação do valor de pico em função da sobreposição de componentes harmônicas e inter-harmônicas.

No que se refere à modulação do valor eficaz, observa-se que a amplitude é significante quando a frequência da componente inter-harmônica, sobreposta ao sinal fundamental, está mais próxima da frequência de 60 [Hz], e torna-se menor na medida em que a frequência da componente inter-harmônica aumenta. Por outro lado, no que tange à modulação do valor de pico, nota-se que a amplitude se mantém constante, ou seja, não depende da componente de frequência inter-harmônica estar mais próxima ou mais distante da frequência fundamental.

Em situações reais, sabe-se que não há apenas a sobreposição de componentes inter-harmônicas de forma isolada. Conforme [2, 78], onde são analisados os efeitos decorrentes da superposição de um par de frequências inter-harmônicas, nota-se que para as modulações da tensão eficaz, quando é aplicada uma inter-harmônica de baixa frequência e outra de alta frequência, aquela de baixa frequência tem maior influência no valor da amplitude da modulação que aquela de alta frequência. Por outro lado, para as modulações de tensão de pico, o grau de influência é igual para as duas componentes inter-harmônicas sobrepostas ao sinal de tensão.

Para evidenciar a relação direta entre o fenômeno de flutuação de tensão e a presença de componentes inter-harmônicas de uma forma mais simples e

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

prática, desenvolveu-se um experimento conforme o circuito elétrico mostrado na Figura 33, o qual contempla a alimentação de um conjunto de lâmpadas em paralelo com uma resistência mecanicamente chaveada a frequência variável.

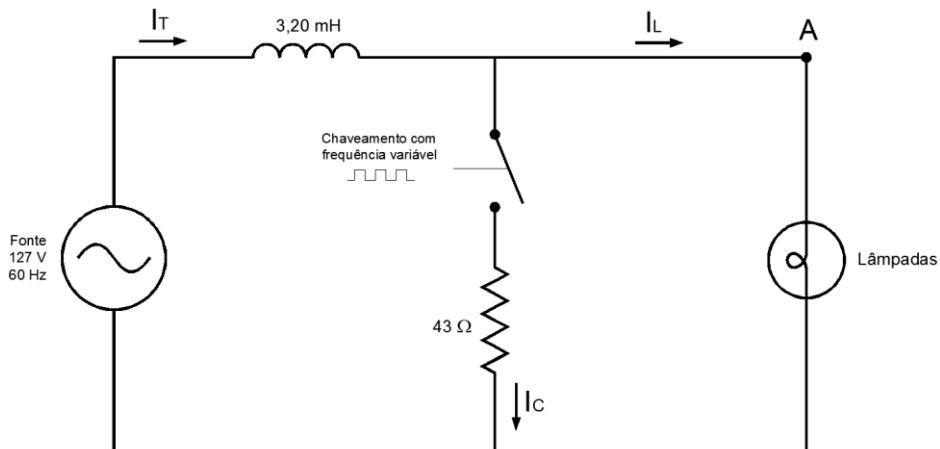


Figura 33 - Circuito utilizado para ilustrar a relação entre o fenômeno da flutuação de tensão e a presença de componentes inter-harmônicas.

A Figura 34 apresenta a disposição laboratorial para desenvolvimento dos testes.

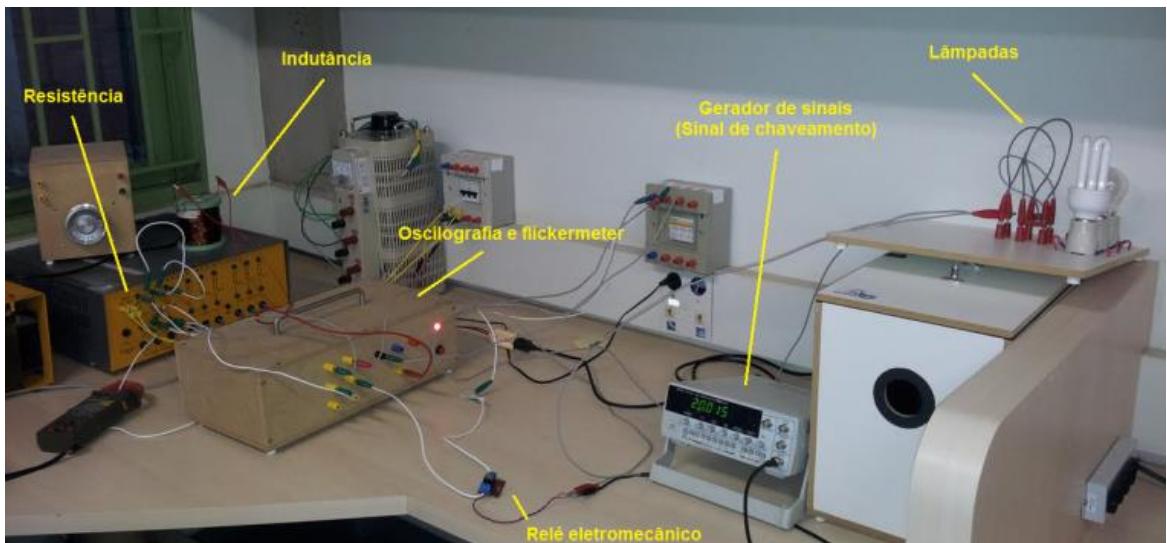


Figura 34 - Arranjo laboratorial para avaliação de um chaveamento com ciclo de 20 Hz em um circuito puramente resistivo.

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

Para produzir o chaveamento na frequência desejada foi utilizado um relé eletromecânico e um gerador de sinais, responsável pelo sinal de chaveamento ao relé. Este experimento é um típico exemplo de cargas que utilizam Controle de Ciclo Integral (*ICC – Integral Cycle Control*) ou Controle de Meio Ciclo Otimizado (*OHCPC - Optimized Half-Cycle Power Control*). Essas técnicas foram desenvolvidas para substituírem os contatores eletromecânicos e os sistemas de controle de fase, as quais são aplicadas, por exemplo, na operação de fornos a arco [7]. Para esse tipo de carga, de acordo com [7], as frequências presentes nos espectros de tensão e corrente deveriam seguir a relação indicada em (13).

$$\frac{f_1}{(n_{on} + n_{off})} \quad (13)$$

Onde:

- n_{on} : Número de ciclos “on”;
- n_{off} : Número de ciclos “off”.

A Figura 35 apresenta a forma de onda da corrente instantânea e a corrente eficaz solicitada pela carga resistiva igual a 43 [Ω]. Nota-se que as variações das correntes decorrentes dos chaveamentos são bem características. Analisando a corrente instantânea, verifica-se que o número de ciclos “on” e “off” são ambos iguais a 1,5.

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

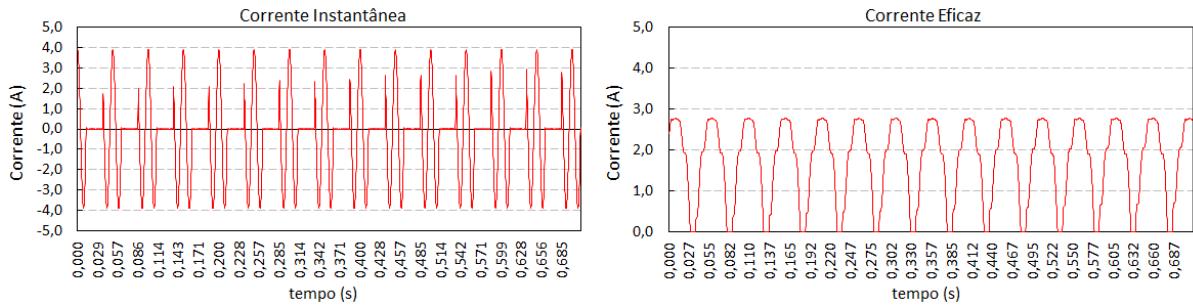


Figura 35 - Forma de onda da corrente instantânea e corrente eficaz da carga resistiva chaveada.

A Figura 36 apresenta a forma de onda da tensão instantânea e tensão eficaz, bem como o espectro de frequências da tensão devido ao chaveamento em uma frequência de 20 [Hz]. Retomando a relação indicada em (12), já discutida anteriormente, as frequências inter-harmônicas para uma frequência de modulação igual a 20 [Hz] (frequência do chaveamento aplicado) deverão ser iguais a 60 ± 20 [Hz], ou seja, 40 [Hz] e 80 [Hz]. Assim, as frequências inter-harmônicas presentes no espectro de frequências indicado na Figura 36 condizem com o resultado esperado. A flutuação de tensão pode ser visualizada tanto pela variação da tensão de pico, quanto pela variação da tensão eficaz. Aplicando-se a Equação (13), nota-se que o espectro deveria ser composto pela frequência de 20 [Hz] e as múltiplas inteiras de 20 [Hz]. Isto explica a presença das frequências inter-harmônicas iguais a 20 [Hz], 100 [Hz] e 140 [Hz] em menores amplitudes no espectro de tensão.

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

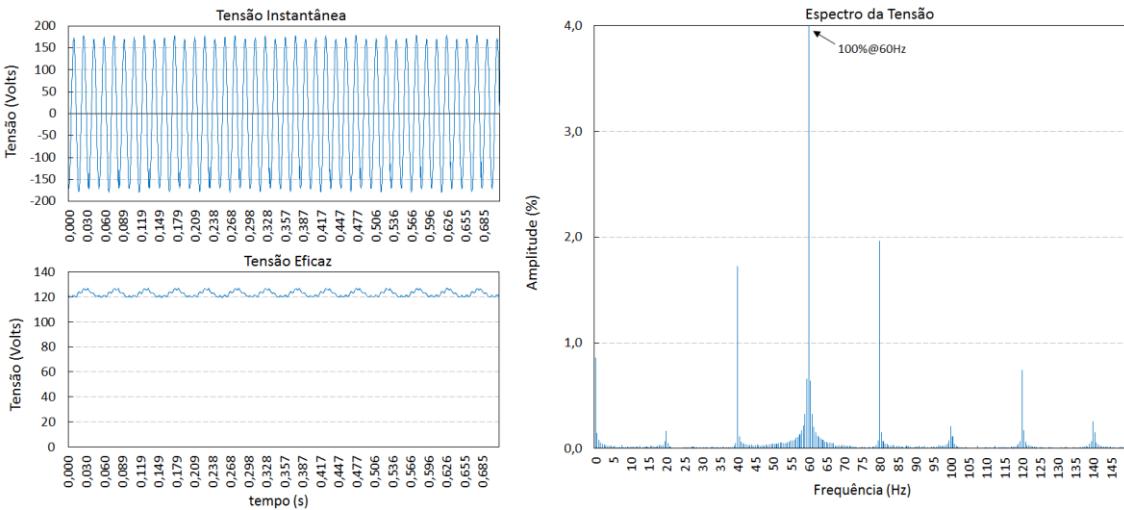


Figura 36 - Forma de onda da tensão instantânea, tensão eficaz e espectro da tensão devido ao chaveamento em uma frequência de 20 [Hz].

A Figura 37 apresenta a forma de onda da corrente instantânea e o comportamento da corrente eficaz, bem como o espectro de frequências da corrente no conjunto de lâmpadas devido ao chaveamento em uma frequência de 20 [Hz]. Novamente, nota-se que o efeito causado na tensão foi análogo ao encontrado na corrente da carga paralela à resistência chaveada.

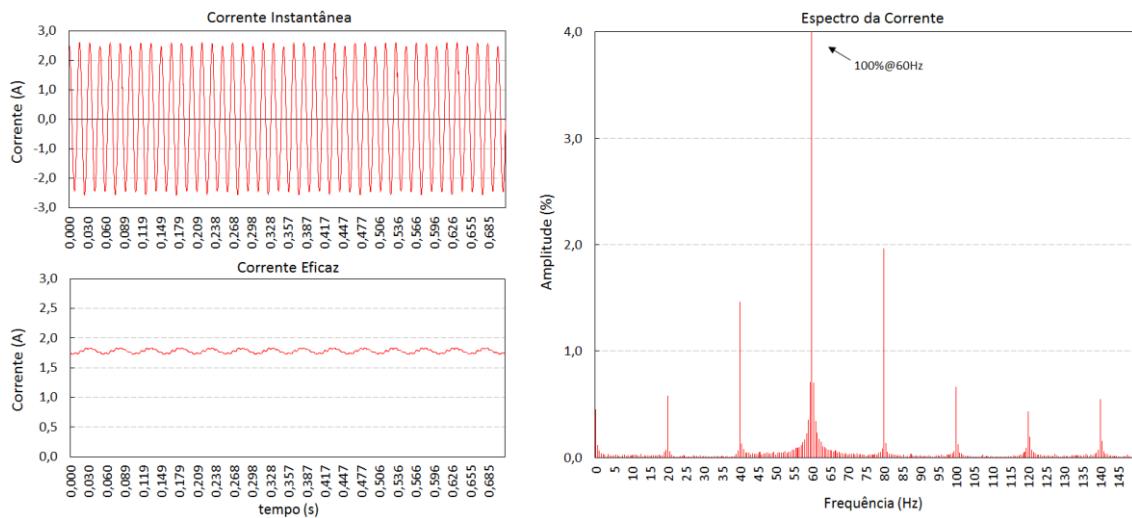


Figura 37 - Forma de onda da corrente instantânea, corrente eficaz e espectro da corrente no conjunto de lâmpadas devido ao chaveamento em uma frequência de 20 [Hz].

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

Nesse momento, fica evidente a possibilidade de mitigação do fenômeno da flutuação de tensão através da utilização de simples filtros harmônicos passivos sintonizados. Tal possibilidade nunca foi discutida no âmbito dos sistemas elétricos de potência, tratando-se, portanto, de uma importante contribuição resultante do presente trabalho.

Diante do exposto, com o objetivo de avaliar esta possibilidade, a Figura 38 apresenta o circuito elétrico implementado no programa *ATPDraw*, considerando-se a presença de um filtro sintonizado na frequência de 40 [Hz] e outro na frequência de 80 [Hz]. Essa análise não foi desenvolvida de forma empírica diante da dificuldade para implementação dos filtros necessários em laboratório, uma vez que as principais frequências inter-harmônicas produzidas, 40 [Hz] e 80 [Hz], estão muito próximas da frequência fundamental. A resistência de 70,6 [Ω] (carga 2) representa um conjunto de lâmpadas incandescentes.

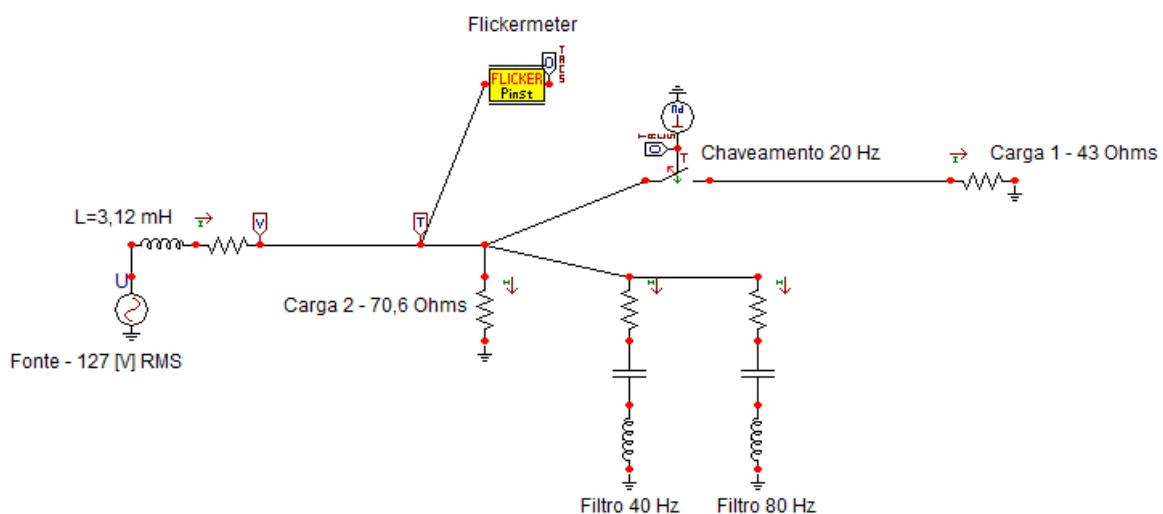


Figura 38 - Simulação de um chaveamento com ciclo de 20 [Hz] em um circuito puramente resistivo com a presença de filtros.

A Figura 39 apresenta a forma de onda e o espectro de tensão, resultantes do chaveamento com a presença dos filtros. Observa-se que não há mais

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

flutuação. O mesmo se observa para a forma de onda e espectro da corrente associada à resistência paralela àquela chaveada, conforme Figura 40.

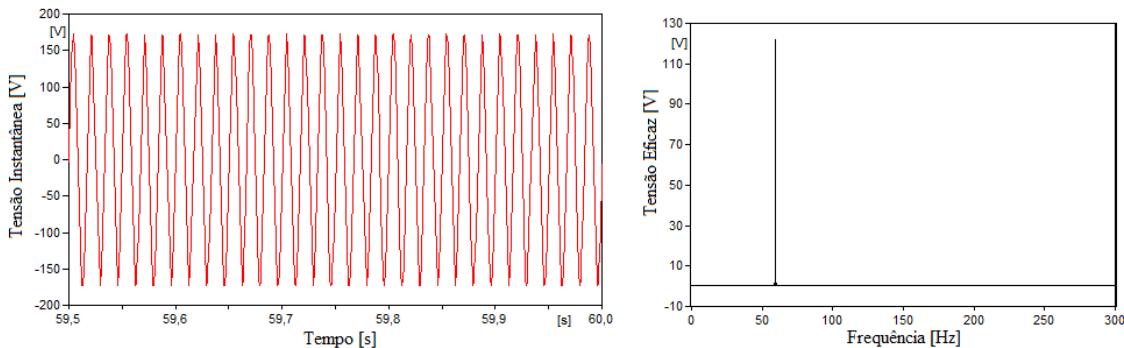


Figura 39 - Forma de onda e espectro da tensão devido ao chaveamento de 20 [Hz] com a presença de filtros.

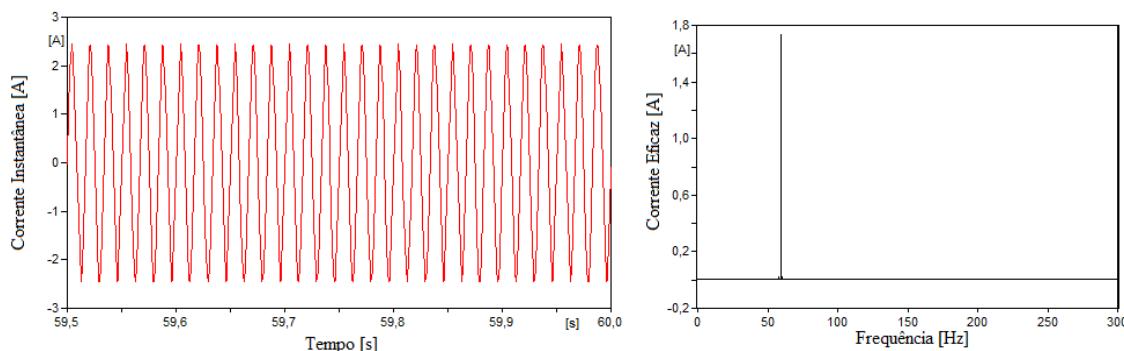


Figura 40 - Forma de onda e espectro da corrente na resistência de 70,6 [Ω] com a presença de filtros.

Diante das análises realizadas, práticas e teóricas, fica claro que o fenômeno de flutuação de tensão não pode ser analisado de forma isolada, sem sua associação com a presença de componentes de tensão com frequências inter-harmônicas. A seguir será mostrado que as principais deficiências do *flickermeter* IEC estão vinculadas com a superposição de elevadas componentes de frequências inter-harmônicas nos sinais de tensão.

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

4.3 – Deficiências do Flickermeter IEC

O *flickermeter* IEC tem sido amplamente aceito como um protocolo internacional para medição da severidade do efeito *flicker*. Todavia, esse protocolo apresenta uma deficiência: o mesmo é incapaz de quantificar o *flicker* causado por componentes inter-harmônicas de tensão com frequências superiores a 102 [Hz] (sistemas 60 [Hz]) ou 85 [Hz] (sistemas 50 [Hz]), comumente produzidas por sistemas de dupla-conversão [6].

O *flickermeter* é essencialmente uma unidade de processamento de sinal, a qual leva em conta o sinal de tensão como entrada e o índice de severidade de *flicker*, P_{st} , como saída, conforme ilustra a Figura 41.

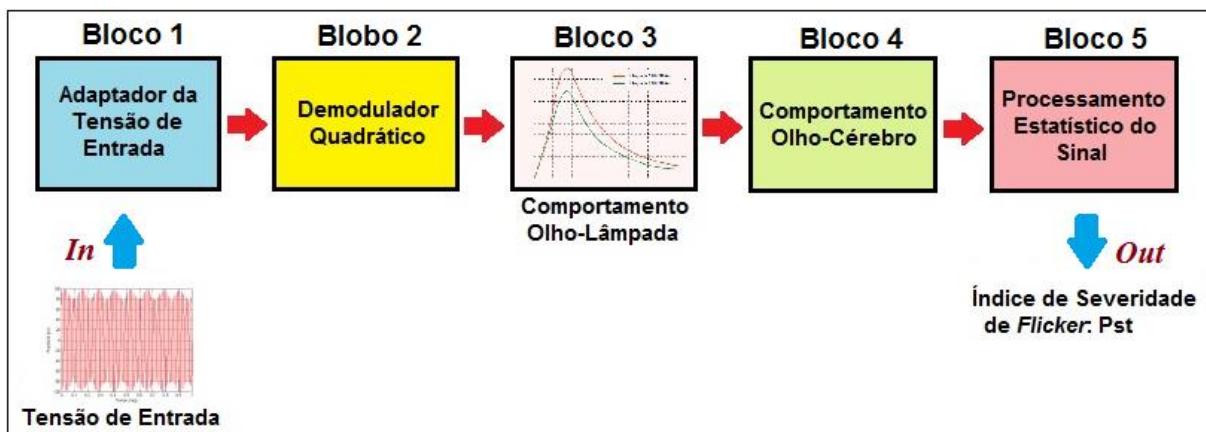


Figura 41 - Diagrama simplificado do *flickermeter* IEC.

As funcionalidades de cada bloco são [1]:

- **Bloco 1:** Normaliza a tensão de entrada por um sinal de referência;
- **Bloco 2:** Extraí a flutuação de tensão da forma de onda de tensão de entrada;

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

- **Bloco 3:** Constitui-se principalmente de uma curva de ponderação em frequência, a qual representa a sensibilidade visual às variações luminosas emitidas por uma lâmpada incandescente padrão. Vale ressaltar que a resposta em amplitude para o filtro de ponderação em frequência é normalizada para 8,8 [Hz], onde se tem a maior sensibilidade de percepção do efeito *flicker* em lâmpadas incandescentes;
- **Bloco 4:** Simula a percepção não-linear do comportamento do sistema olho-cérebro frente a variações na iluminação local, e avalia o efeito de armazenamento de informações, pelo cérebro humano, relacionadas a variações de iluminação;
- **Bloco 5:** Calcula-se o indicador de severidade de *flicker* de curta duração (P_{st}). Este indicador representa a severidade dos níveis de cintilação luminosa associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 10 (dez) minutos. De modo semelhante, a grandeza P_{lt} expressa a severidade dos níveis de cintilação luminosa associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 2 (duas) horas, através da composição de 12 valores consecutivos de P_{st} . As especificações para medição deste fenômeno e as recomendações associadas aos níveis aceitáveis podem ser encontrados em [11, 79-81].

Sabe-se que caso a frequência da modulação esteja na região de percepção do olho humano (0,5 a 30 [Hz]), ter-se-á uma maior probabilidade do aparecimento do efeito da cintilação luminosa, visto que nessa região a amplitude da flutuação não precisa ser tão elevada. Por exemplo, uma pequena amplitude de

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

flutuação, 0,33% do valor da tensão fundamental, com uma frequência de 8,8 [Hz] é suficiente para produzir cintilação luminosa [8].

A Figura 42 mostra o desempenho do *flickermeter* IEC considerando elevadas componentes de inter-harmônicas superpostas no sinal de tensão de entrada.

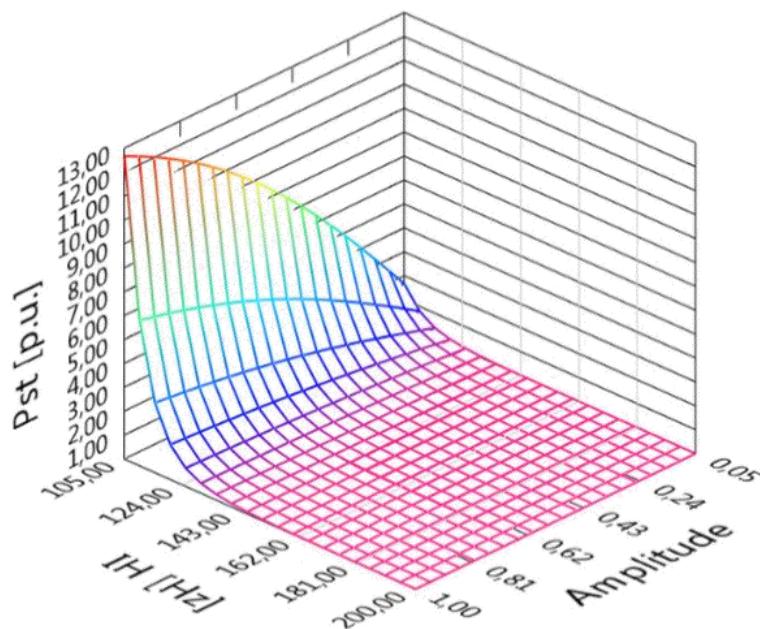


Figura 42 - Variação da magnitude do P_{st} em função da frequência e amplitude da inter-harmônica.

Percebe-se que a partir da frequência inter-harmônica aproximadamente igual a 124 [Hz], mesmo para valores de até 100% de amplitude em relação a tensão fundamental, o valor do P_{st} fica abaixo de 1,0 [pu]. Esta limitação é devido principalmente ao bloco 3 do protocolo, o qual possui um filtro tal que as frequências acima de 102 [Hz] (para redes de 60 [Hz]) sejam atenuadas. Conclui-se que o *flickermeter* IEC não é capaz de detectar o efeito *flicker* causado por elevadas componentes de frequências inter-harmônicas. Contudo, sabe-se que é possível a percepção visual de *flicker* em lâmpadas fluorescentes compactas até

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

quando da superposição de elevadas componentes de frequências inter-harmônicas. Para evidenciar esse fato foi criada, na estrutura em laboratório da Figura 43, meios para realização de testes considerando-se os três principais tipos de lâmpadas desenvolvidas para consumidores conectados na baixa tensão, quais sejam:

- Lâmpada incandescente (LI): O princípio de funcionamento dessa lâmpada consiste na passagem de uma corrente elétrica pela resistência do filamento da mesma, onde uma energia é liberada na forma de calor e luz [82]. Devido ao modelo simples dessa lâmpada, a resposta ao efeito *flicker* não irá variar entre os diferentes fabricantes. Adicionalmente, vale ressaltar que este tipo de lâmpada é mais sensível à variação da tensão eficaz [5];
- Lâmpada fluorescente compacta (LFC): A lâmpada LFC é composta basicamente por cinco blocos: filtro CA, retificador, filtro CC, inversor, e lâmpada elétrica [77]. Neste trabalho, foi utilizado um modelo composto de reator eletrônico, o qual representa a grande parte das atuais LFCs. Este tipo de lâmpada apresenta uma resposta similar entre diferentes fabricantes e são mais sensíveis à variação de tensão de pico [5];
- Lâmpada LED: Muito embora as lâmpadas LED ainda não são comuns de serem encontradas nas residências, elas também foram submetidas aos testes em laboratório. Similar às lâmpadas LFC, este tipo de lâmpada também é equipado com conversores de tensão. Dessa forma, as lâmpadas LED também são mais sensíveis às variações de tensão de pico. Um reator típico de lâmpada LED consiste de um filtro de interferência eletromagnética, uma ponte

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

retificadora de onda completa, um capacitor para redução da ondulação (*ripple*) do sinal CC, um conversor CC com controlador PWM, e um conjunto de LEDs. Todavia, podem ser encontradas lâmpadas LED com estruturas mais simples ou mais complexas, o que levam a serem mais ou menos sensíveis ao efeito *flicker* [83, 84].

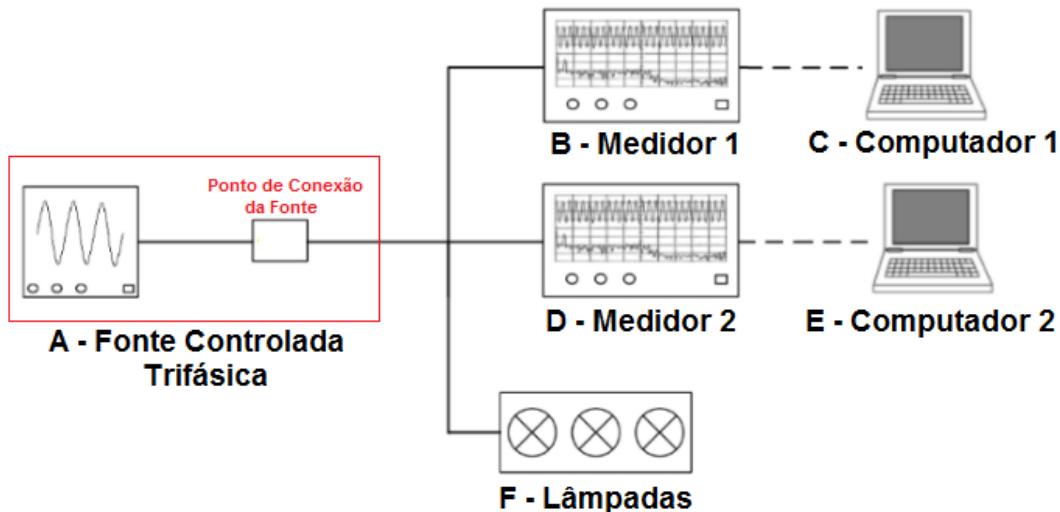


Figura 43 - Diagrama elétrico da arquitetura laboratorial implementada para avaliar as limitações do flickermeter IEC.

Conforme diagrama da Figura 43, os principais dispositivos para realização dos ensaios foram:

- **A - Fonte controlada trifásica** (Fabricante HP, Modelo 6834A): Responsável pela aplicação das flutuações de tensão;
- **B - Medidor 1:** Utilizado como medidor de referência para medir o valor de P_{st} ;
- **C - Computador 1:** Análise dos dados enviados pelo medidor 1;
- **D - Medidor 2:** Medidor instalado com objetivo de registrar os dados de corrente e tensão, possibilitando a visualização da forma de onda no computador 2;

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

- **E** - Computador 2: Análise dos dados enviados pelo medidor 2;
- **F** - Lâmpadas:
 - LI: OSRAM, 60 [W], 127 [V] – 60 [Hz];
 - LFC: FLC, 20 [W], 127 [V] – 60 [Hz], tipo 3U;
 - LED: ECOLUMN PAR20, 3 [W], 127 [V] – 60 [Hz].

A Figura 44 destaca a bancada de testes implementada em laboratório para avaliação dos estudos relacionados à flutuação de tensão.

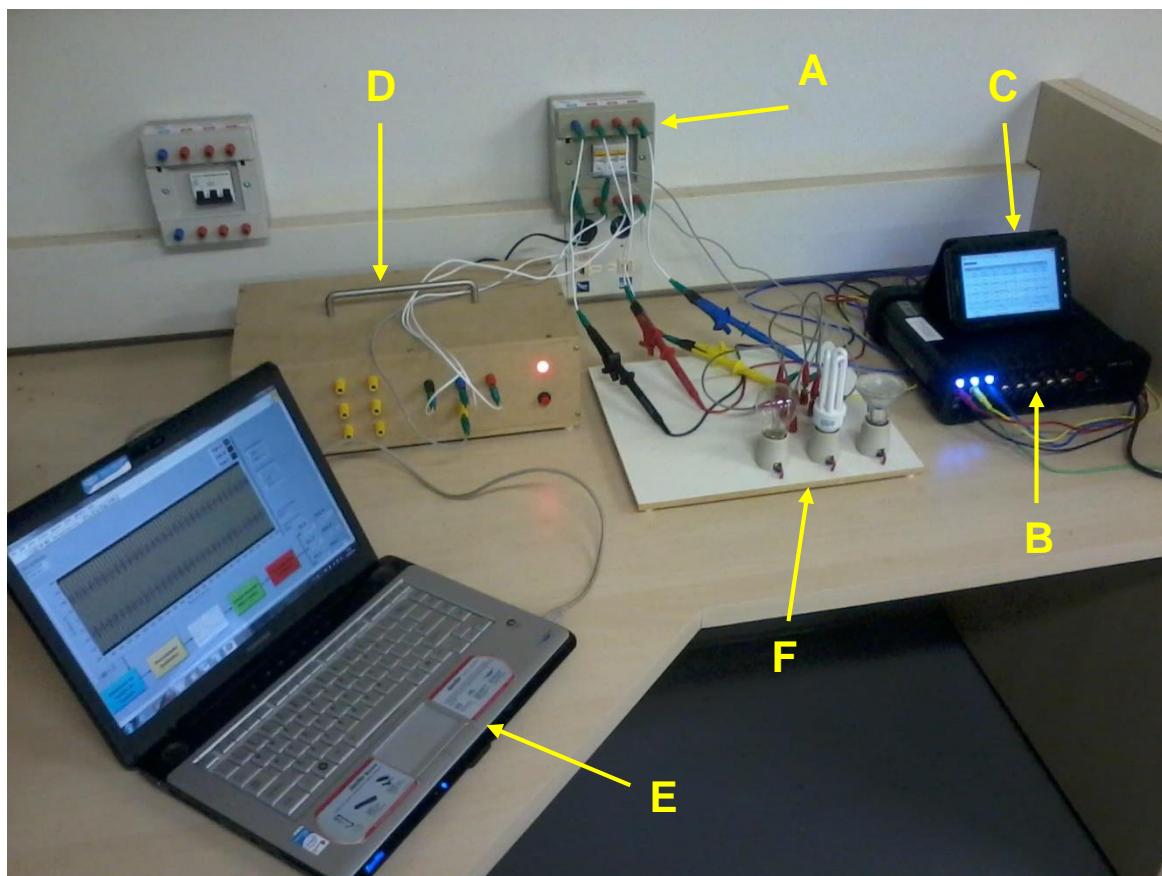


Figura 44 - Bancada de testes desenvolvida para avaliação das limitações do flickermeter IEC.

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

A fonte controlada trifásica utilizada neste trabalho não é capaz de gerar componentes inter-harmônicas de forma isolada, mas apenas em pares. Por conseguinte, uma frequência de modulação configurada em 105 [Hz] irá produzir componentes inter-harmônicas iguais a 45 [Hz] e 165 [Hz], ou seja, $|60 \pm 105|$ [Hz]. Conforme indicado pela Equação (14), este par de inter-harmônicas irá causar uma modulação na tensão com frequência de 15 [Hz] [2]:

$$\begin{aligned} f_m &= |f_{IH1} - h_{IH1} \cdot f_1| = |f_{IH2} - h_{IH2} \cdot f_1| \\ f_m &= |45 - 1 \cdot 60| = |165 - 3 \cdot 60| = 15 \text{ [Hz]} \end{aligned} \tag{14}$$

Onde:

- f_m : Frequência de modulação da tensão;
- f_{IH1} : Frequência da inter-harmônica 1;
- h_{IH1} : Ordem harmônica mais próxima de f_{IH1} ;
- f_{IH2} : Frequência da inter-harmônica 2;
- h_{IH2} : Ordem harmônica mais próxima de f_{IH2} .

Sob estas considerações, a Tabela 13 apresenta as frequências aplicadas pela fonte para diagnosticar o comportamento em cada lâmpada. O conjunto dos ensaios foram escolhidos a fim de se avaliar os resultados sob diferentes faixas de frequência e amplitudes, incluindo valores que evidenciam ou não as limitações do *flickermeter* IEC. Ressalta-se, portanto, que outros valores poderiam ter sido escolhidos para tal propósito.

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

Tabela 13 - Estudos de caso.

Caso	Frequência fonte (f_{fonte}) [Hz]	Amplitude da modulação (m) [%]	f_{IH1} [Hz]	f_{IH2} [Hz]
1	10	1	50	70
2	166,5	8	106,5	226,5
3	200	10	140	260

A seguir são apresentados os resultados para cada tipo de lâmpada em decorrência da aplicação de diferentes frequências de flutuação de tensão.

- **Estudo de caso 1**

A Tabela 14 apresenta os resultados numéricos obtidos para as três lâmpadas analisadas. Verifica-se que os valores de P_{st} estão de acordo com a percepção de *flicker*, ou seja, os resultados do *flickermeter IEC* se apresentam adequados. Vale ressaltar que a percepção de *flicker* foi detectada através de um grupo de observadores.

Tabela 14 - Resultados numéricos associados à análise do flickermeter IEC - Estudo de caso 1.

Parâmetro	Tipo de Lâmpada		
	LI	LFC	LED
P_{st} [pu] (Flickermeter IEC)	2,49	2,49	2,49
Percepção de <i>flicker</i>	Sim	Sim	Sim
Frequência de modulação [Hz]	10	10	10

A Figura 44 apresenta o espectro de frequências da forma de onda da tensão. Nota-se que o par de frequências inter-harmônicas no espectro, 50 e 70 [Hz], estão de acordo com aquelas apresentadas na Tabela 13.

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

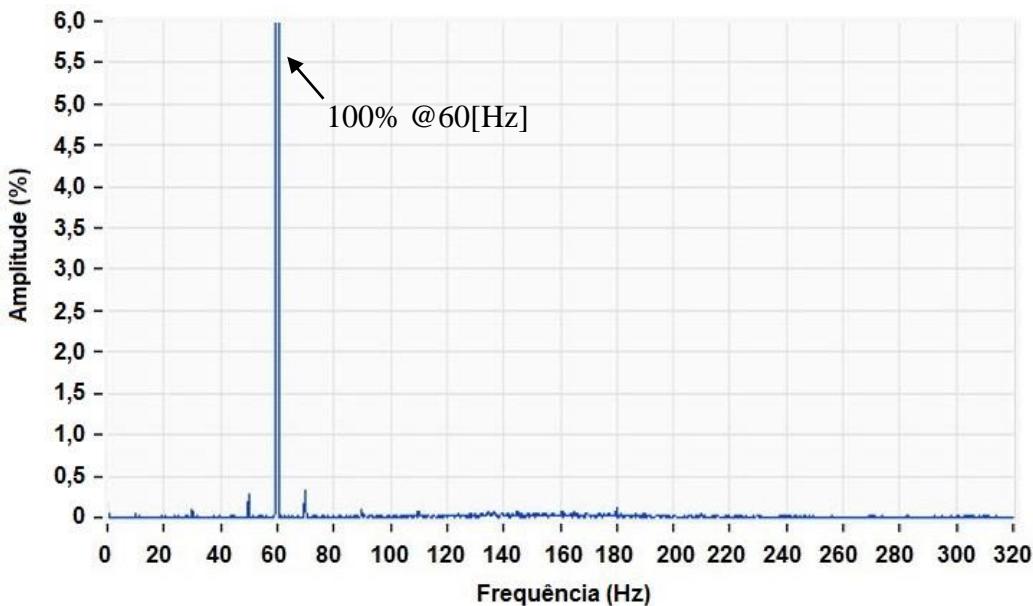


Figura 45 - Espectro de frequências da tensão para testes nas lâmpadas LI, LFC, e LED.
Estudo de caso 1: $f_{\text{fonte}} = 10 \text{ [Hz]}$, $m = 1\%$.

Muito embora a amplitude da modulação aplicada é de apenas 1,0 %, observou-se efeito *flicker* nas três lâmpadas. Este fato se justifica pela frequência de 10 [Hz] ser bem próxima da frequência mais sensível ao olho humano (8,8 [Hz]). Assim, uma variação de tensão eficaz ou de pico com baixa amplitude já é suficiente para causar a percepção de *flicker*. As Figuras 46 e 47 destacam, respectivamente, as variações de tensão de pico e eficaz.

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

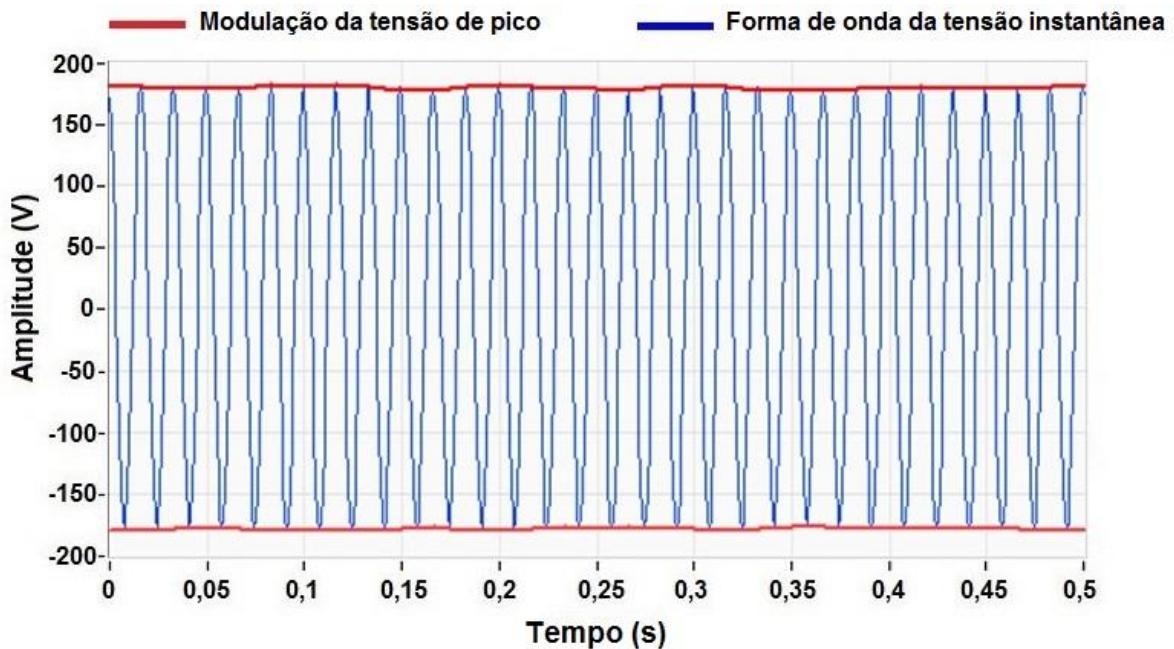


Figura 46 - Forma de onda da tensão instantânea para testes nas lâmpadas LI, LFC e LED.
Estudo de caso 1: $f_{fonte} = 10 \text{ [Hz]}$, $m = 1\%$.

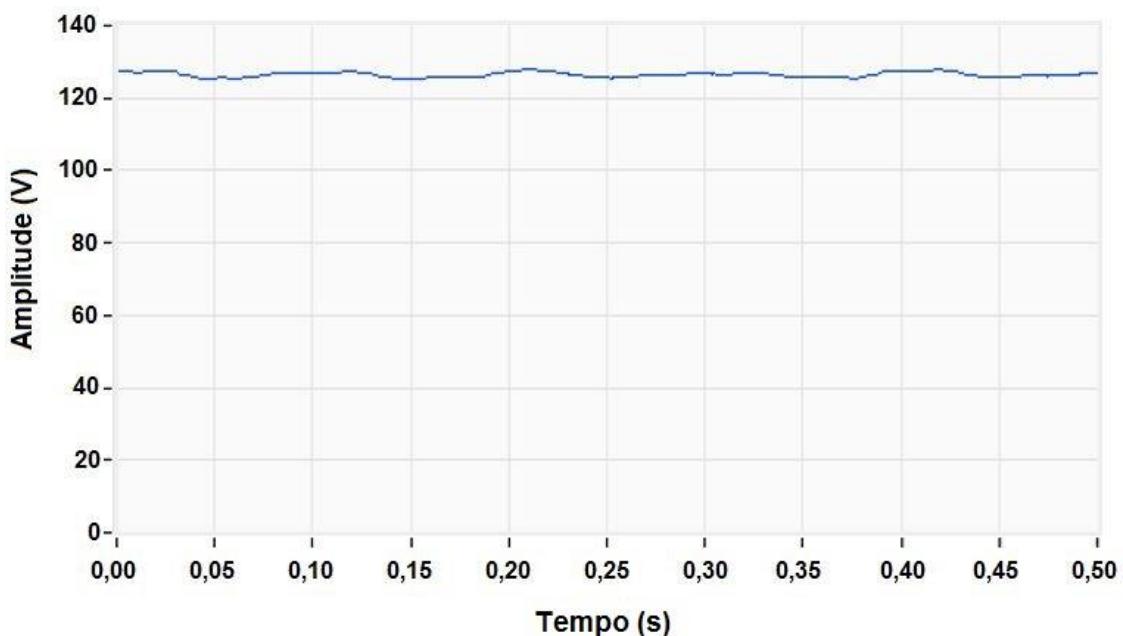


Figura 47 - Forma de onda da tensão eficaz para testes nas lâmpadas LI, LFC e LED. Estudo de caso 1: $f_{fonte} = 10 \text{ [Hz]}$, $m = 1\%$.

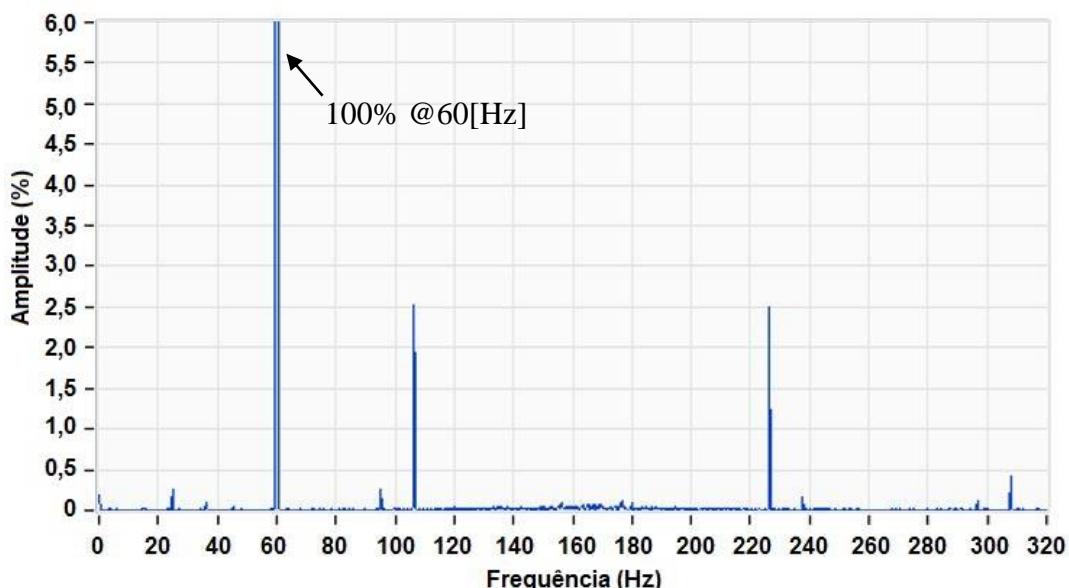
CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

• Estudo de caso 2

De acordo com os resultados numéricos para este caso de estudo, os quais se encontram apresentados através da Tabela 15, pode-se evidenciar as deficiências do *flickermeter* IEC. Verifica-se que há uma discordância entre o valor de P_{st} e a percepção de *flicker* para as lâmpadas LFC e LED. Esta limitação é justificada pelas elevadas componentes inter-harmônicas superpostas à tensão fundamental, as quais nesse caso, conforme espectro de frequências da Figura 48, são iguais a 106,5 [Hz] e 226,5 [Hz].

Tabela 15 - Resultados numéricos associados à análise do flickermeter IEC - Estudo de caso 2.

Parâmetro	Tipo de Lâmpada		
	LI	LFC	LED
P_{st} [pu] (<i>Flickermeter</i> IEC)	0,53	0,79	0,54
Percepção de <i>flicker</i>	Não	Sim	Sim
Frequência de modulação [Hz]	13,58	13,58	13,58



*Figura 48- Espectro de frequências da tensão para testes nas lâmpadas LI, LFC, e LED.
Estudo de caso 2: $f_{fonte} = 166,5$ [Hz], $m = 8\%$.*

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

Outra forma para analisar os resultados numéricos pode ser obtida através da análise da variação de tensão eficaz e de pico. Conforme Figura 49, nota-se facilmente uma modulação da tensão de pico em torno de 13,5 [Hz]. Isto justifica a cintilação luminosa nas lâmpadas LFC e LED, as quais são sensibilizadas pela variação da tensão de pico. Porém, de acordo com o valor de P_{st} indicado pelo *flickermeter* IEC não haveria qualquer problema de *flicker*, visto que o medidor aferiu um P_{st} inferior a 1,0 [pu]. Por outro lado, através da Figura 50, verifica-se que a variação da tensão eficaz é bem suave. Assim, devido à lâmpada incandescente ser sensível a esse tipo de variação, não foi acusado *flicker* visualmente e nem pelo *flickermeter* IEC, o qual indicou um P_{st} de 0,53 [pu]. Com base nessas constatações, a resposta do *flickermeter* IEC seria adequada, conforme esperado, apenas quando da consideração da lâmpada incandescente.

Adicionalmente aos resultados obtidos, uma constatação importante deve ser ressaltada. Observa-se que sob as mesmas condições de ensaio, o P_{st} medido para o teste na lâmpada fluorescente compacta foi maior daquele aferido para os testes nas lâmpadas incandescentes e LED. As lâmpadas fluorescentes compactas são constituídas por sistemas eletrônicos de dupla-conversão. Nesse sentido, as referidas lâmpadas podem, eventualmente, gerar quantidades significativas de componentes inter-harmônicas e, consequentemente, contribuir para a produção de flutuações de tensão.

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

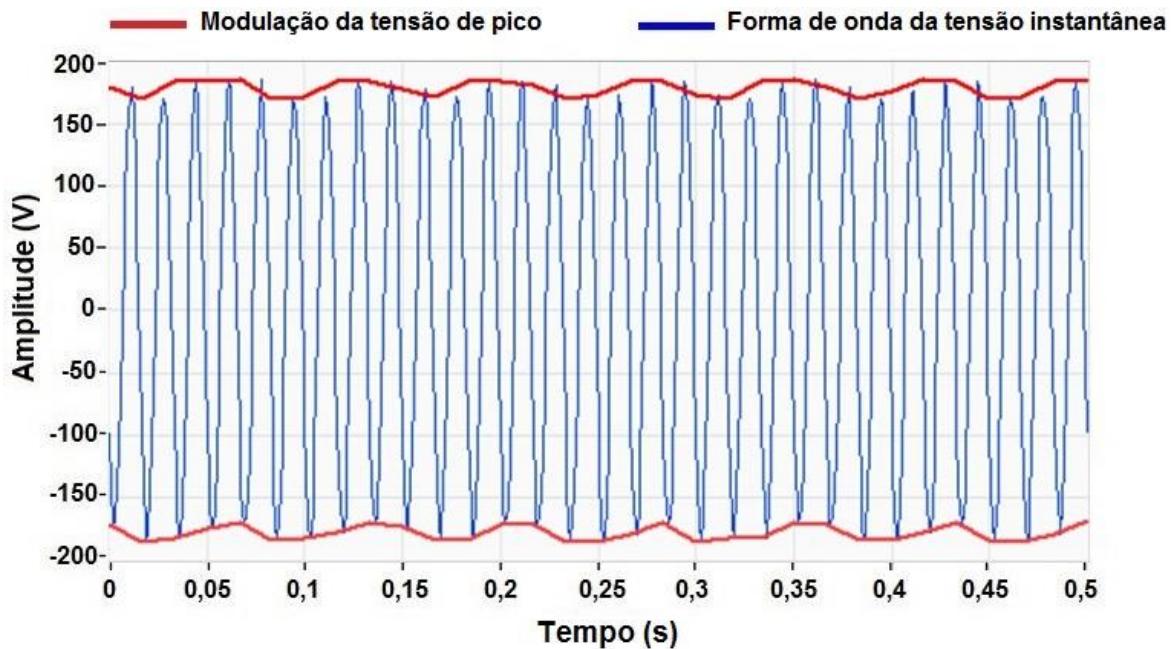


Figura 49 - Forma de onda da tensão instantânea para testes nas lâmpadas LI, LFC e LED.

Estudo de caso 2: $f_{fonte} = 166,5 \text{ [Hz]}$, $m = 8\%$.

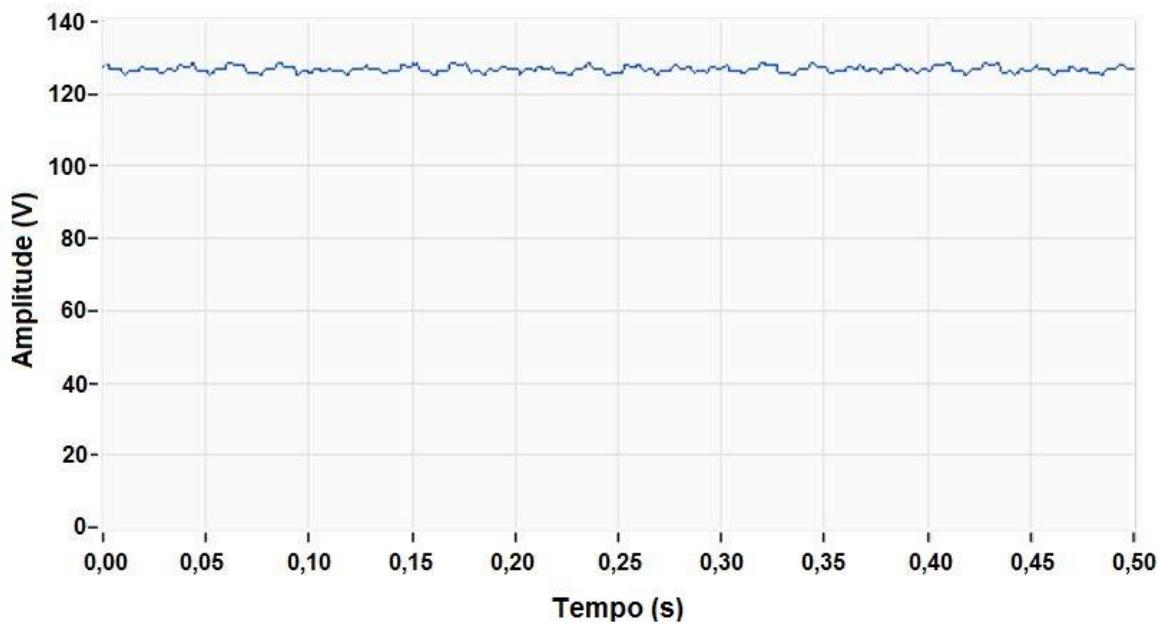


Figura 50 - Forma de onda da tensão eficaz para testes nas lâmpadas LI, LFC e LED. Estudo de caso 2: $f_{fonte} = 166,5 \text{ [Hz]}$, $m = 8\%$.

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

• Estudo de caso 3

No que tange aos testes realizados nesse estudo de caso, conforme os resultados apresentados através da Tabela 16, verifica-se que o *flickermeter* IEC se encontra adequado com a não percepção visual de cintilação luminosa, visto que os valores de P_{st} foram todos abaixo de 1,0 [pu].

Tabela 16 - Resultados numéricos associados à análise do flickermeter IEC - Estudo de caso 3.

Parâmetro	Tipo de Lâmpada		
	LI	LFC	LED
P_{st} [pu] (Flickermeter IEC)	0,44	0,46	0,47
Percepção de flicker	Não	Não	Não
Frequência de modulação [Hz]	19,7	19,8	19,8

A Figura 51 apresenta o espectro de frequências, do qual observa-se a presença das inter-harmônicas de 140 [Hz] e 260 [Hz], produzindo-se portanto, uma modulação na tensão de 20 [Hz].

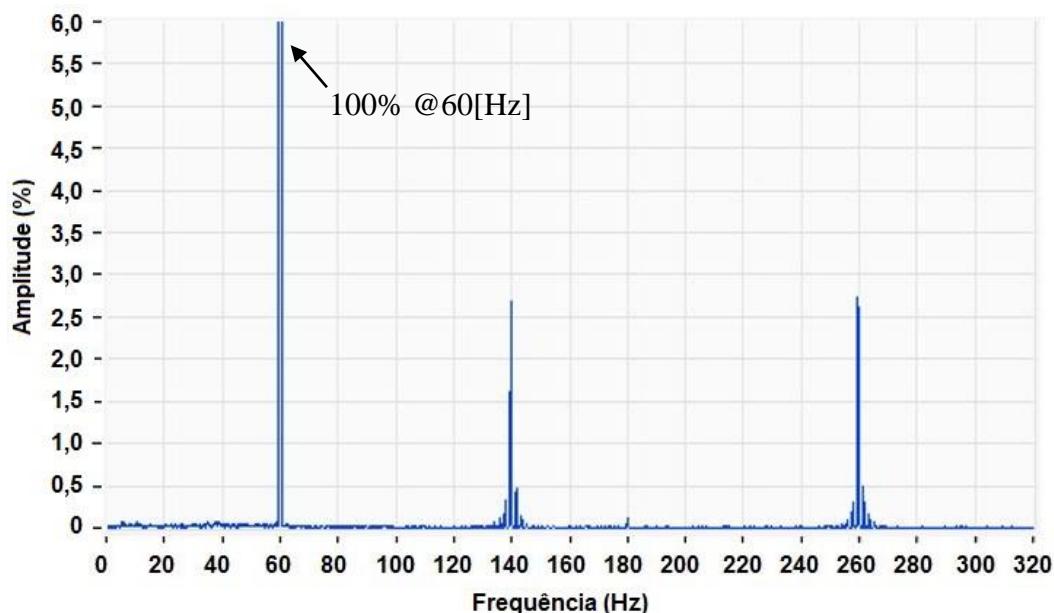


Figura 51 - Espectro de frequências da tensão para testes nas lâmpadas LI, LFC, e LED. Estudo de caso 3: $f_{fonte} = 200$ [Hz], $m = 10\%$.

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

A modulação de 20 [Hz] pode ser facilmente detectada através da Figura 52, a qual destaca a variação de tensão de pico. Todavia, para produzir algum efeito de cintilação luminosa nas lâmpadas LFC e LED, o valor aplicado da amplitude de modulação deveria ser ainda maior, já que a frequência de modulação se encontra distante daquela de maior sensibilidade.

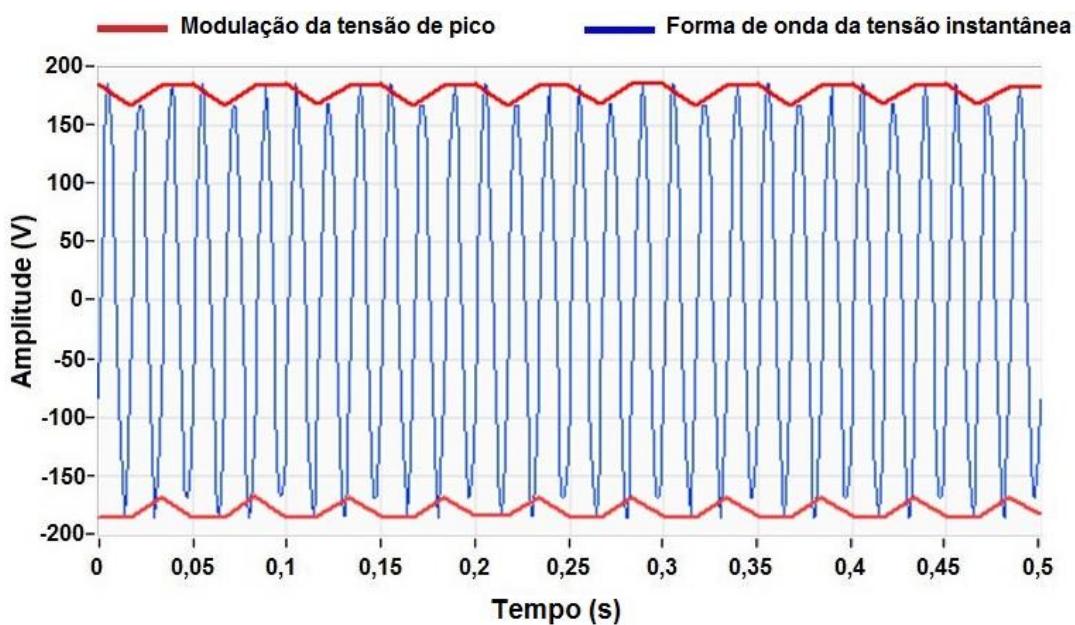


Figura 52 - Forma de onda da tensão instantânea para testes nas lâmpadas LI, LFC e LED.
Estudo de caso 3: $f_{fonte} = 200$ [Hz], $m = 10\%$.

No que se refere ao comportamento da tensão eficaz, ilustrada através da Figura 53, verifica-se uma pequena variação da mesma, a qual aliada a elevada frequência de modulação, contribui para a não percepção de *flicker* na lâmpada incandescente.

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

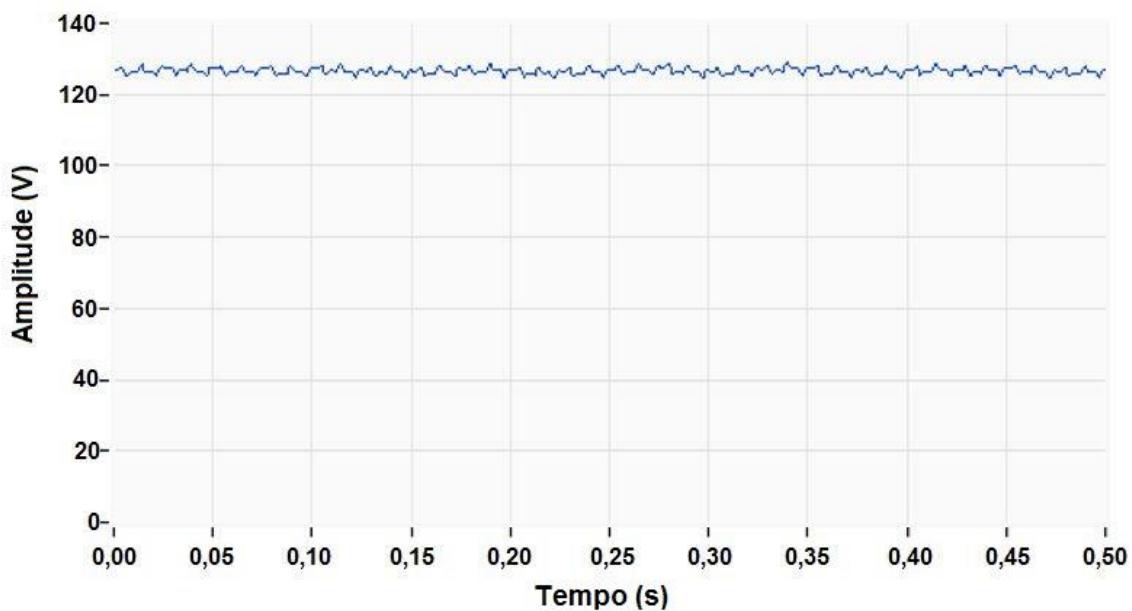


Figura 53 - Forma de onda da tensão eficaz para testes nas lâmpadas LI, LFC e LED. Estudo de caso 3: $f_{fonte} = 200 \text{ Hz}$, $m = 10\%$.

4.4 –Análise da variação do fluxo luminoso

Diante das deficiências do *flickermeter* IEC, o interesse da comunidade científica tem recentemente sido focado no desenvolvimento e aprimoramento de técnicas que possam avaliar o efeito de cintilação luminosa. Neste sentido, este trabalho tem avaliado a resposta do fluxo luminoso diante da flutuação de tensão/inter-harmônicas, buscando propor uma metodologia para qualificar e quantificar corretamente o efeito *flicker*. Para tanto, utilizou-se uma estrutura laboratorial similar àquela da Figura 44, na qual foram adicionados mais dois dispositivos como seguem:

- **G** - Luxímetro (Fabricante INSTRUTHERM): Dispositivo responsável em detectar a variação do fluxo luminoso. A escolha deste equipamento foi possibilitada pelo fato do mesmo ter uma resposta espectral similar ao do olho humano. Adicionalmente, ressalta-se que este dispositivo foi

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

alocado em uma câmara escura para avaliar apenas a fonte de luz sob teste, evitando qualquer interferência de iluminação externa;

- **H** - Placa de aquisição da *National Instruments* – NI USB-6008 (14-bit, 12 [kS/s]): Recebe o sinal analógico do luxímetro e envia os dados para análise no computador 2.

As Figuras 54 e 55 ilustram, respectivamente, o diagrama elétrico e a bancada implementada em laboratório para avaliação dos estudos relacionados à variação do fluxo luminoso.

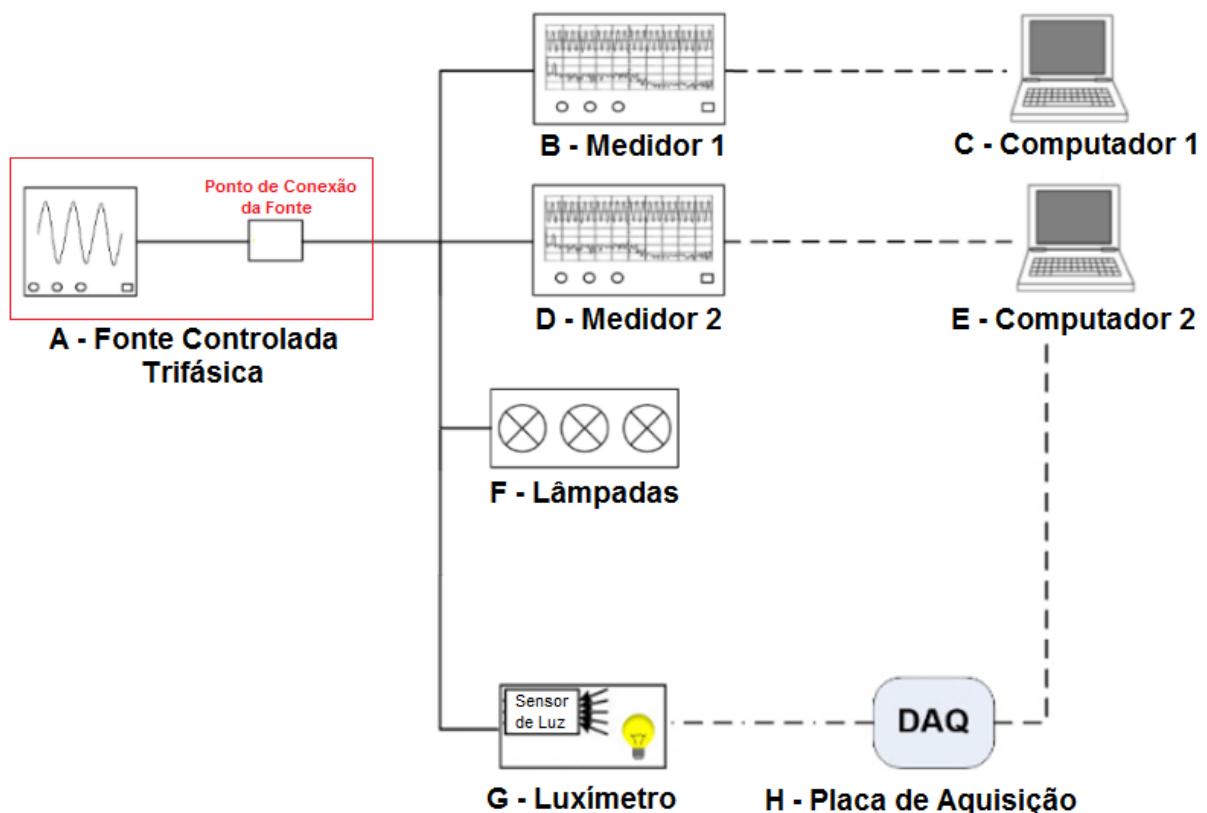


Figura 54 - Diagrama elétrico da arquitetura laboratorial para avaliar variação do fluxo luminoso das lâmpadas.

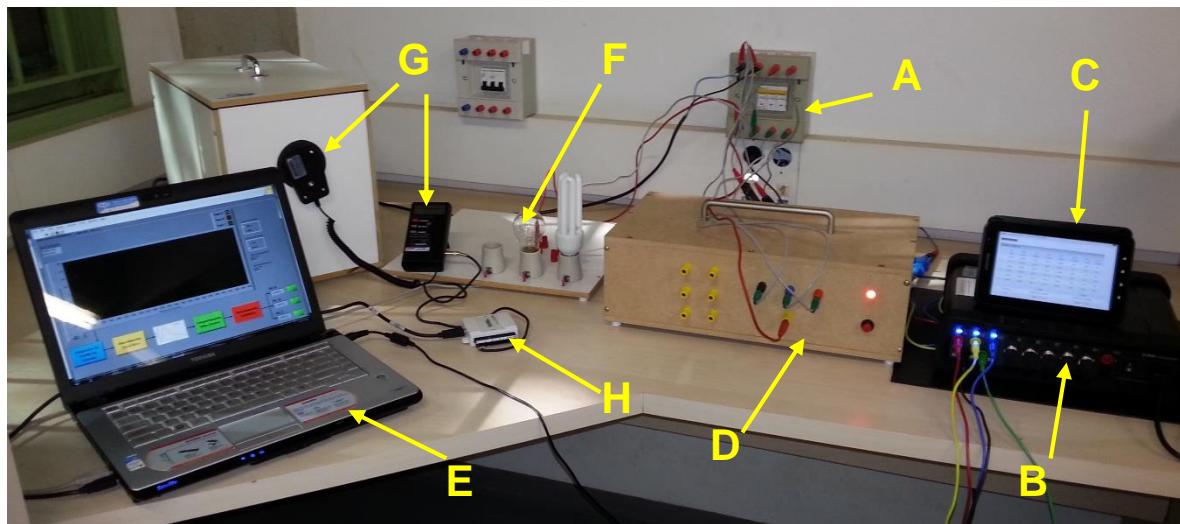


Figura 55 - Bancada de testes desenvolvida para avaliação da variação do fluxo luminoso das lâmpadas.

A seguir são apresentados os resultados dos testes realizados, considerando-se os mesmos estudos de casos definidos através da Tabela 13 da seção anterior.

- **Estudo de caso 1**

A Tabela 17 apresenta a forma de onda e o espectro de frequências da variação do fluxo luminoso para os três tipos de lâmpadas, quando da aplicação de uma frequência igual a 10 [Hz], com 1% de amplitude. Verifica-se que a variação de fluxo luminoso nas três lâmpadas é relativamente pequena, na ordem de 0,5%, conforme destaca a Tabela 18. A constatação do efeito *flicker* se justifica pela maior frequência detectada no espectro de frequências (10 [Hz]) se encontrar próxima daquela de maior sensibilidade do olho humano.

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

Tabela 17 - Análise da variação do fluxo luminoso nas lâmpadas LI, LFC e LED – Estudo de caso 1: $f_{\text{fonte}} = 10 \text{ [Hz]}$, $m = 1\%$.

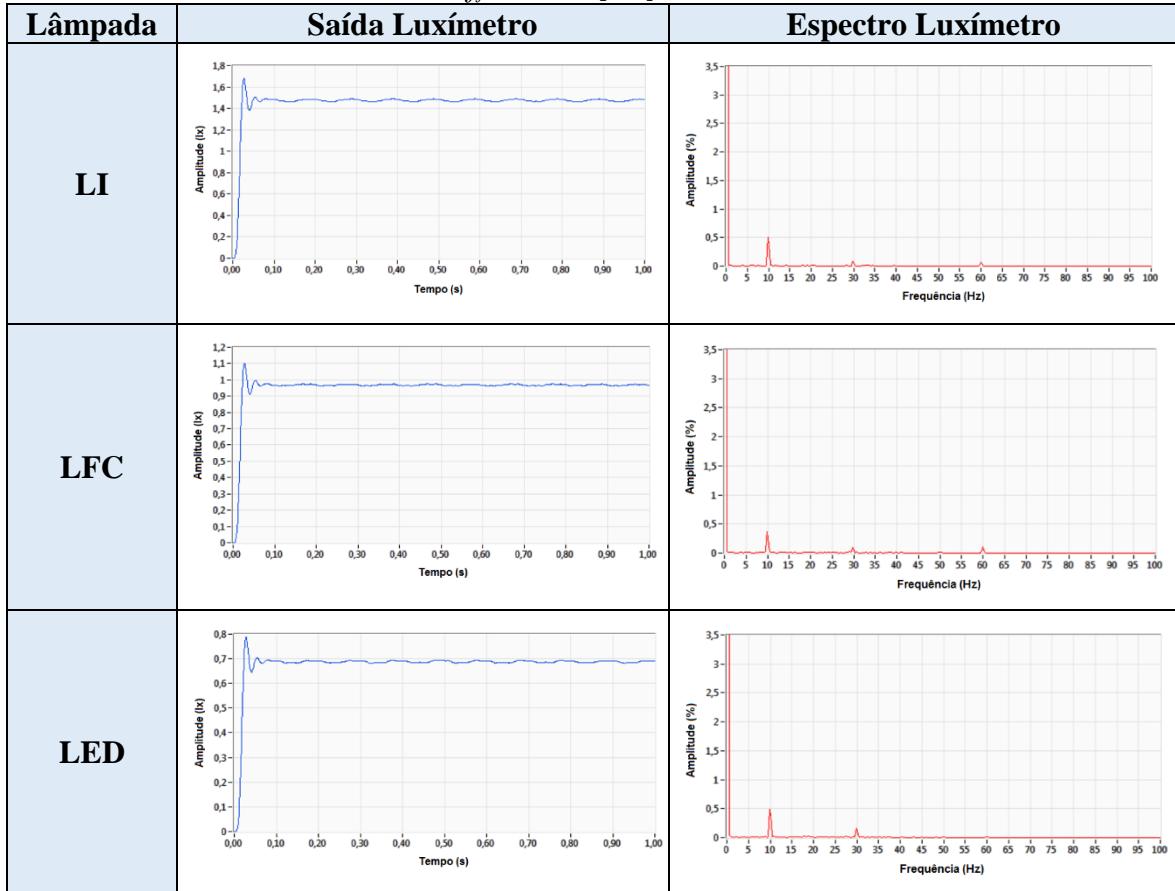


Tabela 18 - Resultados numéricos associados à análise da variação do fluxo luminoso - Estudo de caso 1.

Parâmetro	Lâmpada		
	LI	LFC	LED
$P_{st} \text{ [pu]} \text{ (flickermeter IEC)}$	2,49	2,49	2,49
Percepção de Flicker	Sim	Sim	Sim
Variação do Fluxo Luminoso	Frequência [Hz]	10	9,97
	Amplitude [%]	0,53	0,36

• **Estudo de caso 2**

No que se refere ao presente estudo de caso, a Tabela 19 mostra a característica da variação do fluxo luminoso, quando da presença das inter-harmônicas 106,5 e 226,5 [Hz] superpostas no sinal de tensão. Vale ressaltar que este teste foi capaz de constatar as limitações do *flickermeter* IEC. Analisando a forma de onda da variação do fluxo luminoso, obtida na saída luxímetro, nota-se que as variações são bem evidentes nas lâmpadas LFC e LED, ao contrário do que se observa na lâmpada incandescente. Através do espectro de frequências, percebe-se que neste ensaio a modulação do fluxo luminoso não acompanha a modulação da tensão (13,5 [Hz]). Tal fato se justifica pela resposta diferente de cada lâmpada quando da presença de elevadas componentes inter-harmônicas. Na lâmpada incandescente, por exemplo, a principal frequência existente no espectro do fluxo luminoso foi de 46,5 [Hz]. Por outro lado, para as lâmpadas LFC e LED, verifica-se a presença de duas frequências no espectro, 46 e 27 [Hz]. A Tabela 20 apresenta os resultados numéricos associados a este ensaio. Observa-se que para análise da lâmpada incandescente foi escolhida a frequência de 46,5 [Hz], cuja amplitude é igual a 0,18%. Além da amplitude baixa, esta frequência não está localizada na faixa de sensibilidade do olho humano (0 – 30 [Hz]). Por isso, nenhuma cintilação luminosa foi detectada na lâmpada LI. Para análise das lâmpadas LFC e LED, a frequência escolhida foi de 27 [Hz], a qual corresponde a 0,92% na lâmpada LFC, e a 1,06% na lâmpada LED. Estas amplitudes, aliadas ao fato da frequência estar localizada na faixa de sensibilidade do olho humano foram capazes de produzir *flicker* nas lâmpadas LFC e LED.

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

Tabela 19 - Análise da variação do fluxo luminoso nas lâmpadas LI, LFC e LED – Estudo de caso 2: $f_{fonte} = 166,5 \text{ [Hz]}$, $m = 8\%$.

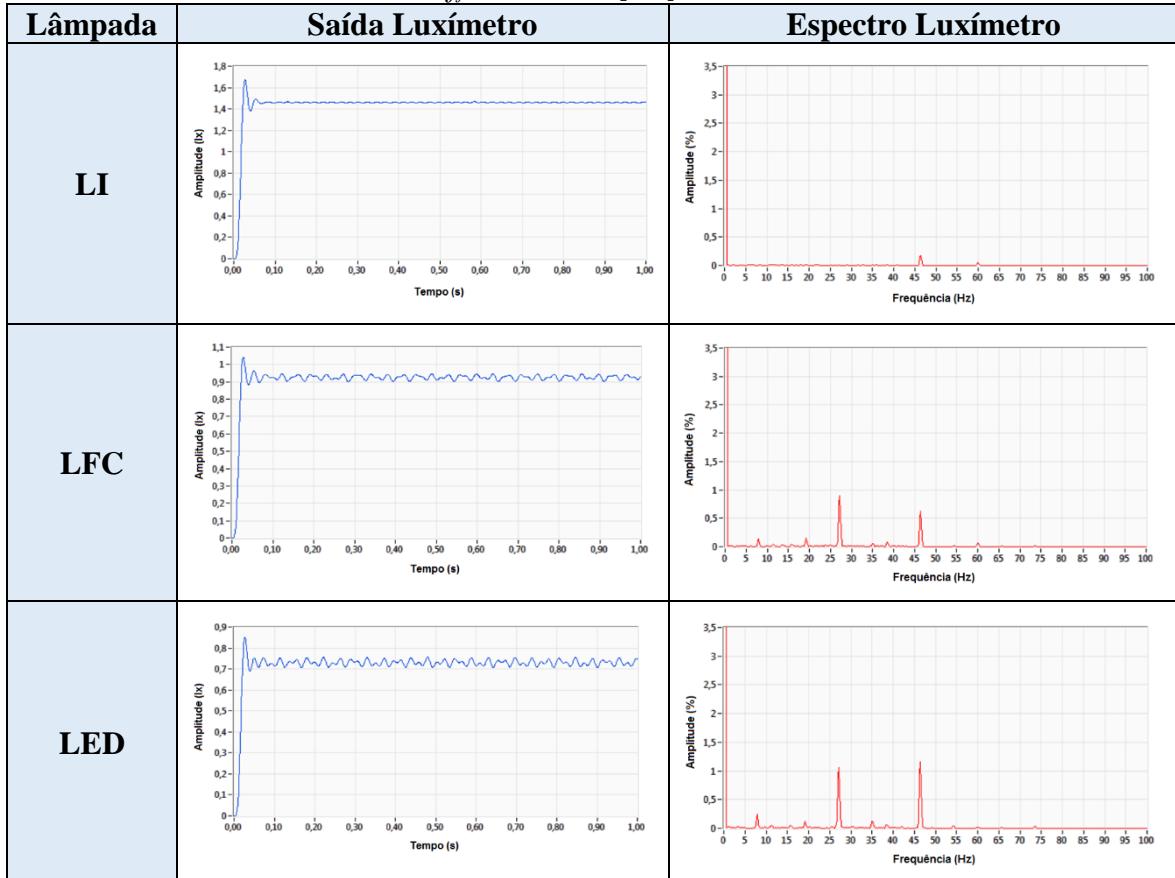


Tabela 20 - Resultados numéricos associados à análise da variação do fluxo luminoso - Estudo de caso 2.

Parâmetro	Lâmpada		
	LI	LFC	LED
P_{st} [pu] (flickermeter IEC)	0,53	0,79	0,54
Percepção de Flicker	Não	Sim	Sim
Variação do Fluxo Luminoso	Frequência [Hz]	46,5	27,25
	Amplitude [%]	0,18	0,92

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

• Estudo de caso 3

As Tabelas 21 e 22 apresentam respectivamente os resultados gráficos e numéricos obtidos para as três lâmpadas analisadas neste ensaio. Similar ao estudo de caso anterior, analisando a variação do fluxo luminoso, nota-se que as variações são mais evidentes nas lâmpadas LFC e LED que na lâmpada LI. Além disso, verifica-se novamente através do espectro de frequências que a modulação do fluxo luminoso não acompanha a modulação da tensão (aproximadamente 20 [Hz]). Na lâmpada incandescente a principal frequência existente no espectro do fluxo luminoso foi a própria fundamental com valor de 0,057%, justificando, portanto, a ausência de efeito *flicker* nesta lâmpada. No que tange às outras lâmpadas, a principal frequência detectada no espectro foi de aproximadamente 40 [Hz], com amplitudes, respectivamente iguais a 0,8% para a LFC e 1,9% para a LED. Apesar dessas amplitudes serem próximas ou até maior que no caso anterior, não há efeito de cintilação luminosa nas lâmpadas LFC e LED, já que a frequência de 40 [Hz] não está localizada na faixa de sensibilidade do olho humano.

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

Tabela 21 - Análise da variação do fluxo luminoso nas lâmpadas LI, LFC e LED – Estudo de caso 3: $f_{fonte} = 200 \text{ [Hz]}$, $m = 10\%$.

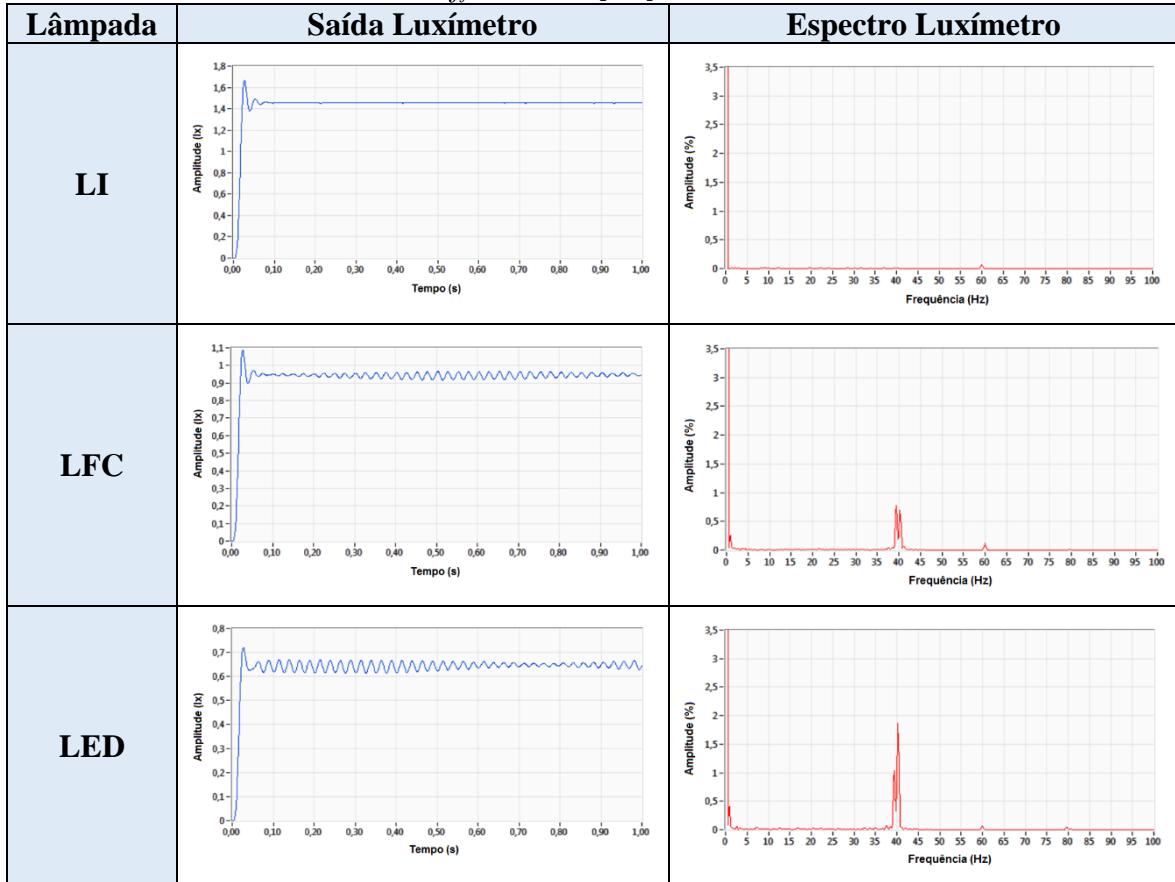


Tabela 22 - Resultados numéricos associados à análise da variação do fluxo luminoso - Estudo de caso 2.

Parâmetro	Lâmpada		
	LI	LFC	LED
$P_{st} [\text{pu}]$ (flickermeter IEC)	0,44	0,46	0,47
Percepção de Flicker	Não	Não	Não
Variação do Fluxo Luminoso	Frequência [Hz]	60	39,5
	Amplitude [%]	0,057	0,8

4.5 –Proposta de uma metodologia para avaliação do efeito *flicker*

Diante dos resultados obtidos em laboratório, apresentados anteriormente, verifica-se que um bom caminho para avaliar o efeito da cintilação luminosa é através da análise da amplitude e frequência da variação do fluxo luminoso. Assim, conhecendo-se o valor limite de iluminância ao efeito *flicker* para cada frequência localizada entre 0 e 30 [Hz], pode-se obter uma curva de sensibilidade para a quantificação do efeito.

Sabe-se que um valor de P_{st} acima de 1,0 [pu] é capaz de causar *flicker* em uma lâmpada incandescente. Partindo dessa premissa, a estratégia para obter a iluminância limite dentro da faixa de 0 a 30 [Hz], sem a necessidade de um grupo de voluntários, foi baseada na aquisição da frequência e da iluminância em uma lâmpada incandescente, tomando-se o valor de P_{st} unitário para cada frequência na faixa de 0 a 30 [Hz], ou seja, para cada frequência e amplitude de flutuação de tensão, em que o medidor indicasse um valor de P_{st} igual a 1,0 [pu], obteve-se um par frequência e amplitude do fluxo luminoso. A lâmpada incandescente foi utilizada para essa finalidade, pois ela permite a criação da curva para toda a faixa de frequência de sensibilidade do olho humano, algo que seria mais difícil para os outros tipos de lâmpadas. Muito embora os ensaios tenham sido realizados a partir da lâmpada incandescente, ao contrário da curva de sensibilidade do *flickermeter* IEC, a curva de sensibilidade do fluxo luminoso é válida para qualquer tipo de lâmpada, já que a resposta do luxímetro é obtida diretamente da cintilação luminosa detectada na lâmpada.

À luz desses esclarecimentos, a Figura 56 ilustra quatro curvas de sensibilidade (linhas sólidas) baseada na variação do fluxo luminoso, tomando-se os valores de P_{st} iguais a 0,5 [pu], 1,0 [pu], 2,0 [pu], e 3,0 [pu]. Estas curvas

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

introduzem a proposta deste trabalho para avaliação do efeito de cintilação luminosa, denominada de “*Flicker lux meter*”. Observa-se que o comportamento das curvas obtidas é similar ao da curva de sensibilidade do *flickermeter* IEC, verificando-se que a maior sensibilidade ao efeito *flicker* também se encontra próxima da frequência mais sensível ao olho humano, ou seja, 8,8 [Hz].

Além de medição, as curvas de sensibilidade de 0,5 [pu], 2,0 [pu] e 3,0 [pu] foram calculadas através da relação (15).

$$lux_{[c]pu}(f_m) = c \cdot lux_{1,0pu}(f_m) \quad (15)$$

Onde:

- $lux_{[c]pu}(f_m)$: amplitude da variação do fluxo luminoso em [mlx], associado à curva c para uma frequência de modulação f_m localizada na faixa de 0 a 30 [Hz];
- c : valor em [pu], o qual indica a curva de sensibilidade a ser estimada;
- $lux_{1,0pu}(f_m)$: amplitude da variação do fluxo luminoso em [mlx], associado a curva de 1,0 [pu] para uma frequência de modulação f_m localizada na faixa de 0 a 30 [Hz].

As curvas estimadas também se encontram apresentadas na Figura 56 (linhas tracejadas), onde verifica-se que a variação do fluxo luminoso é diretamente proporcional à curva de referência.

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

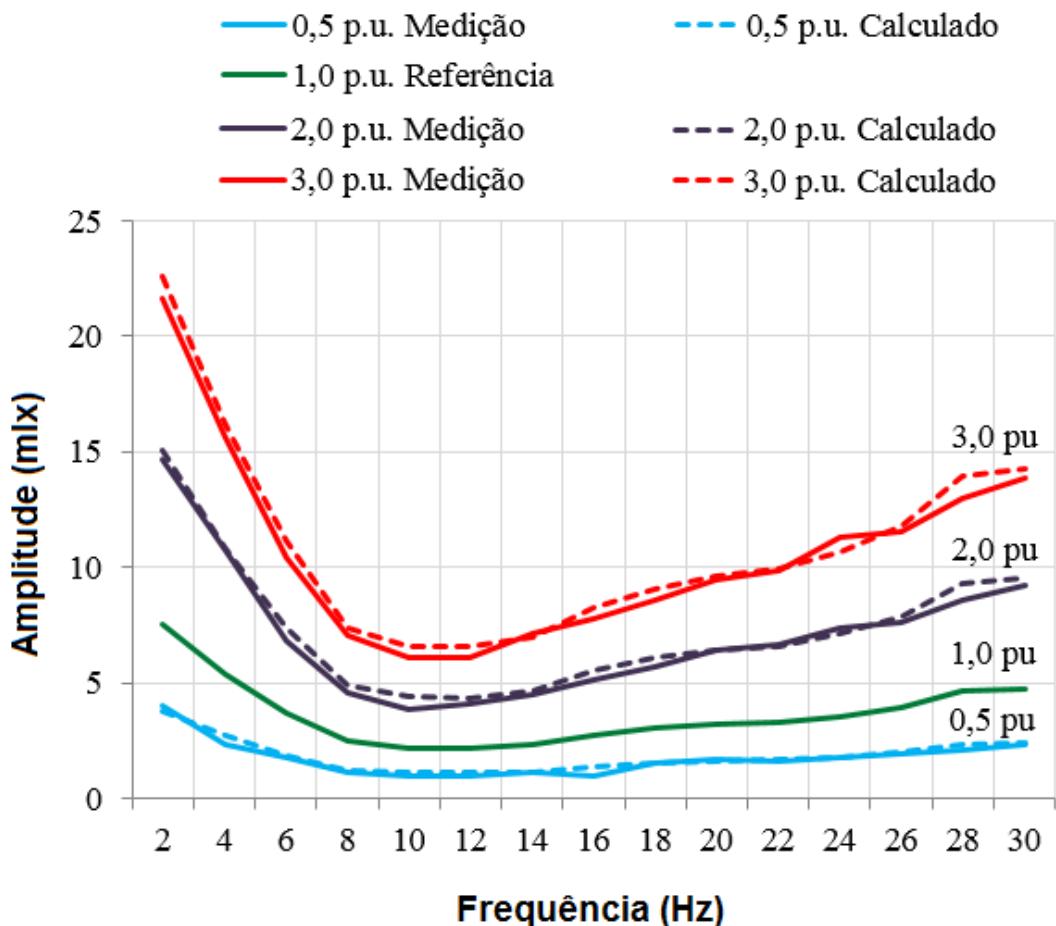


Figura 56 - Curvas de sensibilidade ao efeito flicker baseadas na variação do fluxo luminoso – “Flicker lux meter”.

A Tabela 23 apresenta os resultados do coeficiente de correlação de Pearson, destacando que há uma boa aproximação entre as respectivas curvas obtidas por medição e através da expressão (15).

Tabela 23 - Análise da correlação entre as curvas de sensibilidade obtidas por medição e por cálculo.

Curva	Coeficiente de correlação de Pearson
0,5 [pu]	0,9793
2,0 [pu]	0,9961
3,0 [pu]	0,9965

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

O próximo passo foi introduzir na metodologia proposta um índice que fosse capaz de diagnosticar a severidade da cintilação luminosa. Esse novo indicador foi denominado de P_{lux} . Dessa forma, a curva de referência destacada na Figura 57 foi equacionada através da relação (16), a qual foi fundamentada na aproximação polinomial pelo método dos mínimos quadrados [85].

$$lux_{1,0pu}(f_{lux}) = 1,755 - 0,339 \cdot f_{lux} + 0,028 \cdot f_{lux}^2 - 0,000944 \cdot f_{lux}^3 + 0,0000116 \cdot f_{lux}^4 \quad (16)$$

Onde:

- $lux_{1,0pu}(f_{lux})$: representa a amplitude da variação do fluxo luminoso associado à curva de 1,0 [pu] do *flicker lux meter*;
- f_{lux} : representa a frequência da variação do fluxo luminoso;
- a_0, a_1, \dots, a_4 : coeficientes do polinômio da equação de referência do *flicker lux meter*.

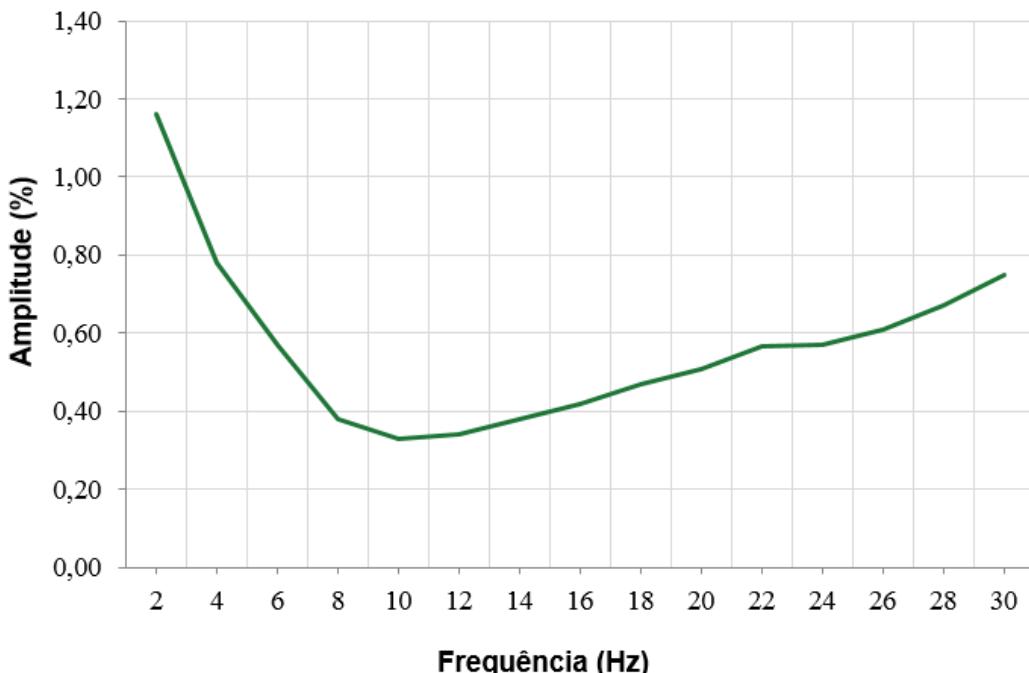


Figura 57 - Curva de referência utilizada pelo “flicker lux meter”.

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

Assim, diante da existência de uma proporcionalidade entre as curvas de sensibilidade do luxímetro para diferentes valores de P_{st} , conforme ilustrado na Figura 56, estima-se o indicador de severidade da variação do fluxo luminoso, denominado de índice P_{lux} , o qual pode ser obtido através da relação (17).

$$P_{lux} = \frac{lux_{med}(f_{lux})}{lux_{1,0\text{pu}}(f_{lux})} [\text{pu}] \quad (17)$$

Onde:

- $lux_{med}(f_{lux})$: representa a amplitude da variação do fluxo luminoso obtida em medição para uma determina frequência de iluminância, f_{lux} .

A Figura 58 apresenta a curva associada à Equação (16), bem como a curva obtida por medição. Nota-se que há uma boa aproximação entre ambas as representações.

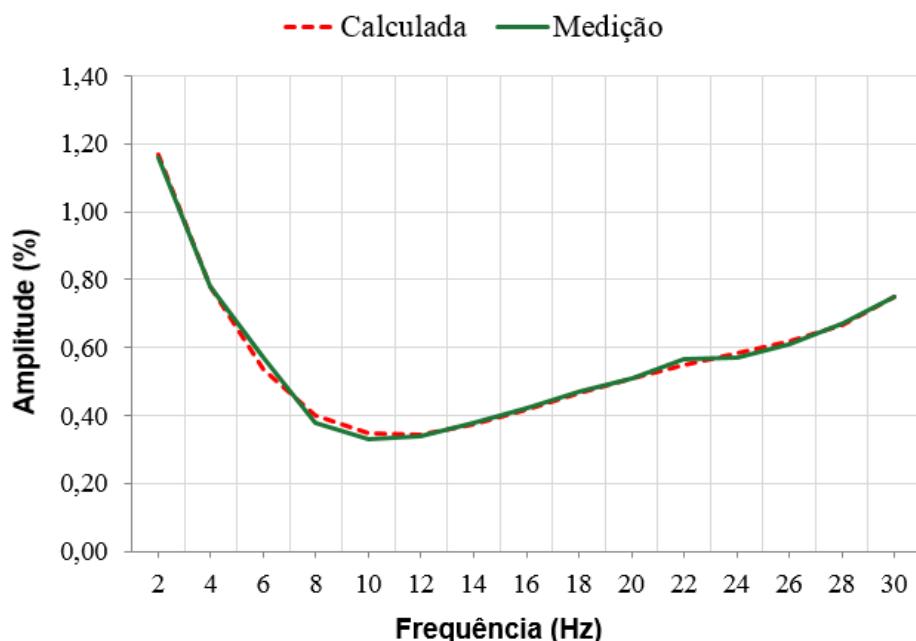


Figura 58 - Curvas de sensibilidade de referência obtidas por medição e analiticamente.

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

Para avaliar o desempenho do “*Flicker lux meter*”, o novo indicador de severidade de *flicker*, P_{lux} , foi calculado e comparado com o indicador de P_{st} , tomando-se os estudos de casos apresentados nas seções 4.3 e 4.4.

• Estudo de caso 1

A Tabela 24 apresenta os resultados obtidos quando da aplicação de uma frequência de flutuação de 10 [Hz] com amplitude de 1% pela fonte HP. Os valores foram destacados em vermelho quando da percepção de *flicker*, e em verde quando em situação contrária. Nota-se no presente ensaio que tanto a medição de P_{st} , quanto a de P_{lux} apresentaram um valor maior que 1,0 [pu] para todas as lâmpadas. Dessa forma, de acordo com a percepção de *flicker*, ambos os medidores se encontram adequados.

Tabela 24 - Análise comparativa de desempenho entre flickermeter IEC e flicker lux meter para lâmpadasa LI, LFC e LED – Estudo de caso 1: $fm = 10$ [Hz], $m = 1\%$.

Parâmetro	Lâmpada		
	LI	LFC	LED
Percepção de Flicker	Sim	Sim	Sim
Valor P_{st} [pu]	2,49	2,49	2,49
Valor P_{lux} [pu]	1,54	1,04	1,44

• Estudo de caso 2

A Tabela 25 apresenta os resultados diante da aplicação de uma frequência de 166,5 [Hz] com amplitude de 8%. Nota-se que este ensaio causou cintilação luminosa nas lâmpadas LFC e LED. Observa-se que a medição de P_{st} acusou valor

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

menor que 1,0 [pu] em todas as lâmpadas, quando de fato deveria ser maior que 1,0 [pu] para os testes nas lâmpadas LFC e LED. Já o valor de P_{lux} apresentou um valor menor que 1,0 [pu] para a lâmpada incandescente e maior que 1,0 [pu] para os outros dois tipos de lâmpada.

À luz dessas ilustrações, apenas o medidor fundamentado no sinal de saída do luxímetro respondeu bem ao efeito *flicker*.

Tabela 25 - Análise comparativa de desempenho entre flickermeter IEC e flicker lux meter para lâmpadasa LI, LFC e LED – Estudo de caso 1: $fm = 166,5$ [Hz], $m = 8\%$.

Parâmetro	Lâmpada		
	LI	LFC	LED
Percepção de Flicker	Não	Sim	Sim
Valor P_{st} [pu]	0,53	0,79	0,54
Valor P_{lux} [pu]	0,03	1,42	1,65

• Estudo de caso 3

Finalmente, a Tabela 26 apresenta os resultados do terceiro estudo de caso, onde aplicou-se uma frequência de 200 [Hz] com amplitude de 10%. Nota-se que neste ensaio em nenhuma das lâmpadas foi detectada cintilação luminosa. Verifica-se que tanto a medição de P_{st} , quanto a de P_{lux} acusou-se um valor menor que 1,0 [pu] para todas as lâmpadas, ou seja, ambos os medidores responderam de forma fiel ao efeito *flicker*.

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

Tabela 26 - Análise comparativa de desempenho entre flickermeter IEC e flicker lux meter para lâmpadasa LI, LFC e LED – Estudo de caso 1: $f_m = 200 \text{ [Hz]}$, $m = 10\%$.

Parâmetro	Lâmpada		
	LI	LFC	LED
Percepção de Flicker	Não	Não	Não
Valor P_{st} [pu]	0,44	0,46	0,47
Valor P_{lux} [pu]	0,002	0,37	0,77

Portanto, através dos resultados apresentados e discutidos, constata-se que as respostas obtidas pelo *flicker lux meter* são mais fiéis que aquelas resultantes do protocolo IEC.

Para implementação do *flicker lux meter* pode-se adotar duas estratégias. A primeira opção, proposta via *hardware*, baseia-se de uma forma similar aos testes laboratoriais executados nesta pesquisa para analisar a variação do fluxo luminoso. Para tanto, seria necessário o desenvolvimento de um equipamento contendo um sensor para detectar a iluminância em uma determinada lâmpada. Assim, a resposta do sensor seria comparada com a curva de sensibilidade proposta para estimar o indicador P_{lux} . A segunda alternativa, proposta via *software*, baseia-se na utilização de uma curva típica de iluminância, em função da variação de tensão e da frequência de modulação. Assim, tal curva substituiria o equipamento da primeira opção. A Figura 59 ilustra como seria realizado uma análise de uma carga perturbadora sob os dois tipos de implementação.

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

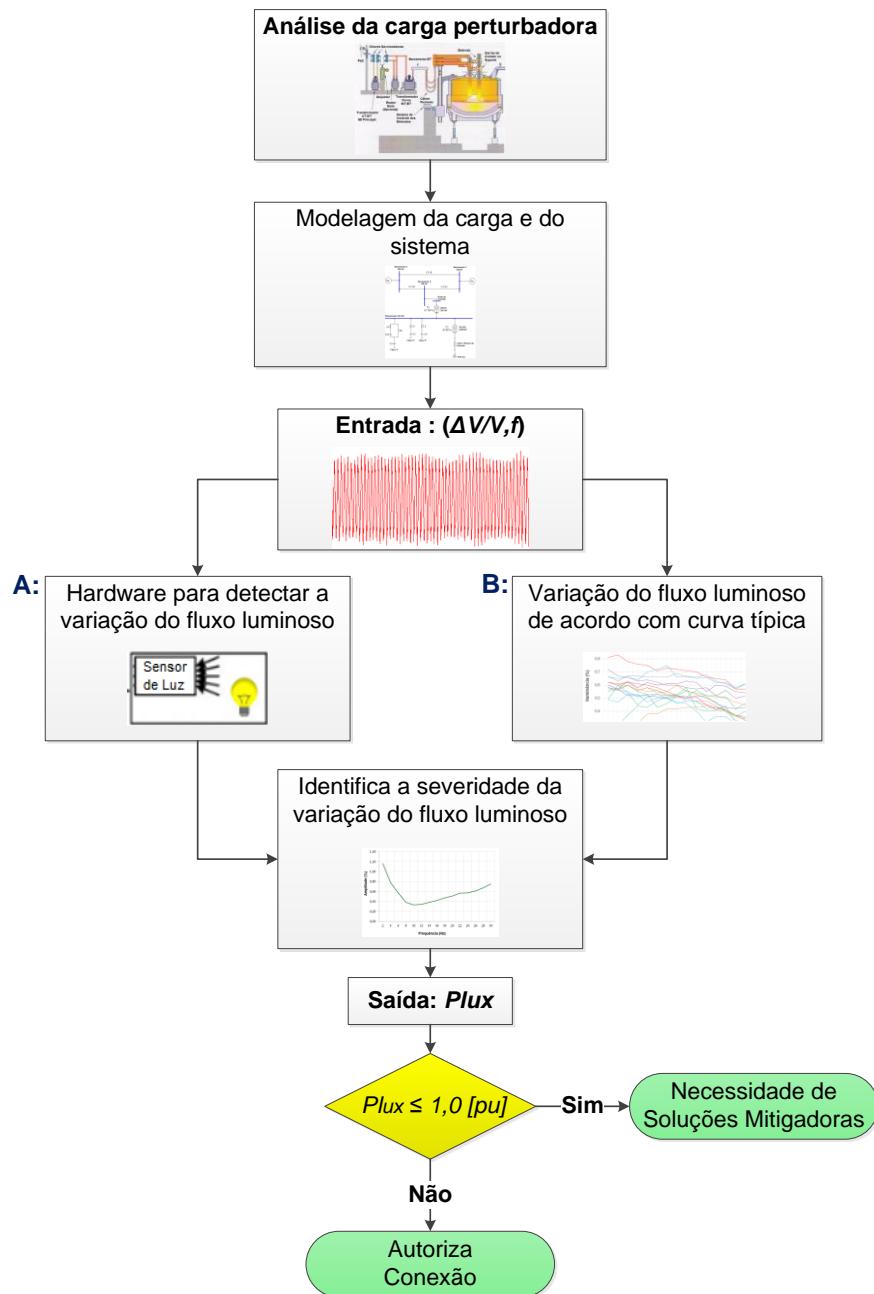


Figura 59 - Procedimento para análise do fenômeno de flutuação de tensão através do indicador P_{lux} .

A título de ilustração, no que tange a viabilidade da segunda opção, foram realizados testes laboratoriais em 16 lâmpadas de diferentes fabricantes, dos tipos LFC e LED, para verificação da resposta das mesmas quando submetidas a uma

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

variação relativa de tensão de 1%, entre 0 a 30 Hz. As lâmpadas incandescentes não foram consideradas, visto que elas já se encontram em desuso. A Tabela 27 mostra as especificações das lâmpadas analisadas.

Tabela 27- Especificações das lâmpadas submetidas em teste para avaliar a característica da variação do fluxo luminoso.

Item	Lâmpada	Fabricante	Tensão [V]	Potência [W]
1	LFC	Philips	127	11
2	LFC	TCP	127	14
3	LFC	FLC	127	15
4	LFC	FLC	127	20
5	LFC	Philips	127	23
6	LFC	FLC	127	34
7	LFC	Philips	220	11
8	LFC	FLC	220	15
9	LFC	Monoprix	220	15
10	LFC	OSRAM	220	20
11	LFC	TCP	220	20
12	LED	ECOLUMN	127	3
13	LED	Union LED	127	10
14	LED	Decore LED	220	5
15	LED	Decore LED	220	8
16	LED	Union LED	220	10

A Figura 60 ilustra a massa de dados obtida durante os ensaios.

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

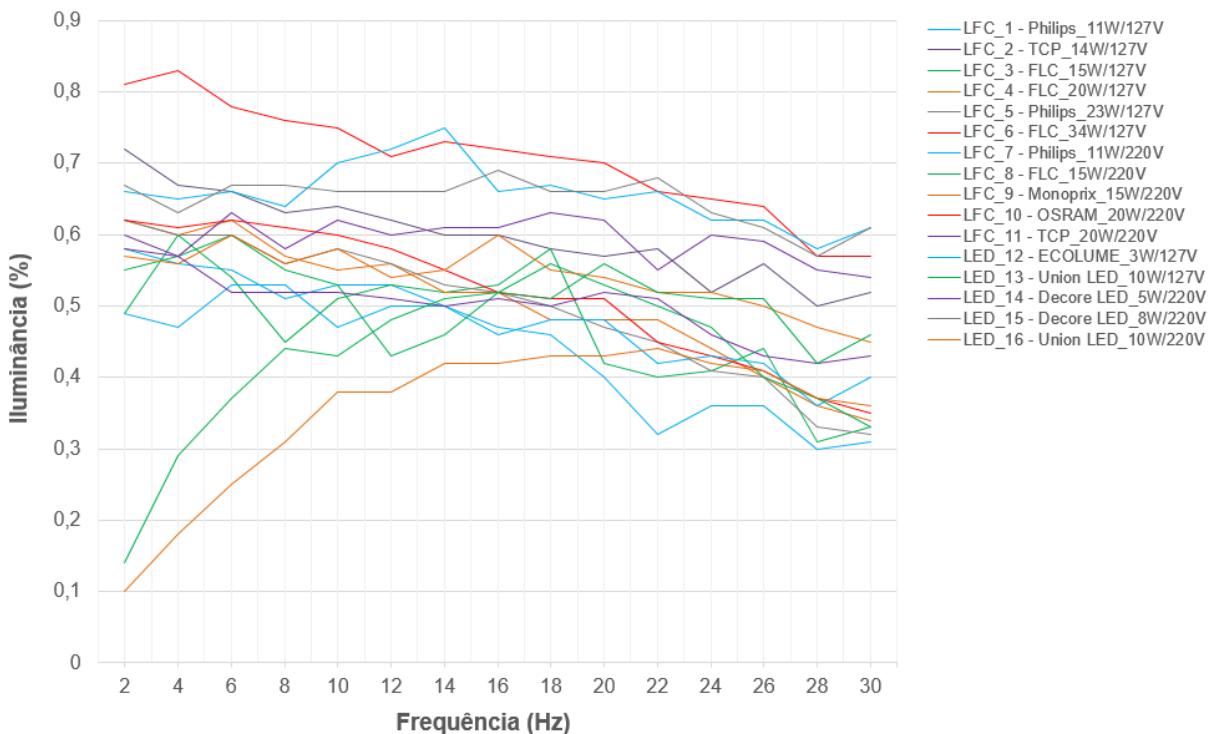


Figura 60 - Variação do fluxo luminoso em lâmpadas LFC e LED submetidas a uma variação de 1% de tensão.

Da massa de dados indicada na Figura 60 fica claro que, para a grande parte das frequências consideradas, as lâmpadas apresentam respostas similares para uma mesma variação de tensão, tornando-se possível a determinação de uma curva típica. As divergências encontradas são causadas, principalmente, devido às diferenças de potência e de tensão entre as lâmpadas. Adicionalmente, devido às diferentes tecnologias de construção entre as lâmpadas LED, pode-se encontrar uma maior divergência de resposta comparada às outras lâmpadas. Todavia, este fato só foi constatado para baixas frequências.

Para a obtenção de uma curva típica devem ser aplicar técnicas que auxiliem na análise de grandes quantidades de dados e informações (*data mining*), objetivando extrair as principais características da massa de dados e obter agrupamentos (*clusters*), os quais permitem a visualização do comportamento de

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

vários conjuntos de dados e possibilitam, através de métodos estatísticos, a determinação da tipologia de uma determinada grandeza. Este procedimento é bastante utilizado, por exemplo, para estimar curvas típicas de demanda em sistemas de distribuição [86].

Ressalta-se que o foco neste momento é de apenas apresentar a viabilidade de obtenção do índice de severidade de variação do fluxo luminoso sem a necessidade de um equipamento físico. Para atingir esse propósito, análises da correlação entre a variação de tensão e a variação de fluxo luminoso devem ser realizadas com maiores detalhes. Estes estudos se justificam principalmente devido à possibilidade de obtenção de variações de tensão iguais, a partir de diferentes componentes de frequências inter-harmônicas superpostas ao sinal de tensão.

4.6 –Considerações Finais

Inicialmente, o presente capítulo sintetizou de forma teórica e prática a relação existente entre as componentes de frequência inter-harmônica e o efeito da flutuação de tensão. Pôde-se notar que a presença de uma frequência inter-harmônica acarreta no efeito de flutuação de tensão, destacando que a frequência de modulação tem um comportamento cíclico em relação à inter-harmônica aplicada, possuindo valor máximo de 30 [Hz]. Todavia, a amplitude desta modulação tem comportamentos distintos quando se analisa a modulação do valor de tensão eficaz ou de pico. Tomando-se a modulação de tensão eficaz, verifica-se que as maiores variações são para inter-harmônicas próximas da frequência fundamental, reduzindo-se bastante a partir de frequências superiores a 100 [Hz], aproximadamente. Por outro lado, no que se refere a modulação da tensão de pico,

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

nota-se que a grande parte das frequências inter-harmônicas, desde as mais baixas até as mais altas, produzem o mesmo efeito na variação da tensão. Para evidenciar a relação direta entre as duas grandezas foi apresentado um caso prático de geração de tensões e correntes com frequências inter-harmônicas através do simples chaveamento de uma resistência linear, destacando que filtros sintonizados passivos para as frequências inter-harmônicas podem representar uma nova forma de mitigação do fenômeno da flutuação de tensão.

Uma vez conhecida a relação entre as componentes inter-harmônicas e o fenômeno da flutuação de tensão, verifica-se que as elevadas componentes inter-harmônicas são as principais responsáveis pelas deficiências do protocolo IEC 61000-4-15 em avaliar o efeito de cintilação luminosa. Tal fato foi constatado tanto por simulação, quanto através de testes em laboratório, verificando que o indicador utilizado para quantificar o efeito *flicker*, conhecido como P_{st} , apresenta valores abaixo de 1,0 [pu], mesmo quando há percepção de cintilação luminosa. Quando da presença de elevadas componentes de frequências inter-harmônicas, verifica-se que não há modulação da tensão eficaz, mas apenas da tensão de pico. Neste sentido, como as lâmpadas incandescentes são sensibilizadas apenas pela variação da tensão eficaz, as mesmas não irão cintilar, e consequentemente o valor de P_{st} será baixo, já que o *flickermeter* IEC foi desenvolvido tomando-se como base as lâmpadas incandescentes. Por outro lado, como as lâmpadas fluorescentes compactas e LED são sensibilizadas pela variação da tensão de pico, pode-se detectar efeito *flicker* nas mesmas.

Dessa forma, diante das limitações do protocolo IEC, foi proposto uma metodologia para avaliação do fenômeno da flutuação de tensão, a qual está diretamente fundamentada na variação do fluxo luminoso. Assim, através da implementação de uma arquitetura laboratorial, realizou-se um conjunto de testes,

CAPITULO IV – Uma Proposta para Quantificação da Flutuação de Tensão Baseada na Resposta Direta da Variação do Fluxo Luminoso

onde foi possível analisar a variação do fluxo luminoso a partir de um luxímetro com resposta similar ao do olho humano. Analisando-se a amplitude relativa da iluminância, em uma faixa de 0 a 30 [Hz], e associada a uma variação de tensão com P_{st} igual a 1,0 [pu], resultou em uma nova curva de sensibilidade, e consequentemente em um novo índice de severidade de *flicker* para avaliar o fenômeno da flutuação de tensão. Este novo índice proposto foi denominado de P_{lux} . Tomando-se alguns estudos de caso, verificou-se que o índice de severidade de *flicker* fundamentado no fluxo luminoso responde melhor que aquele associado ao *flickermeter IEC*, já que o sinal de saída do luxímetro é uma resposta direta da cintilação luminosa da lâmpada e, além disso, a técnica proposta considera a presença de qualquer componente de frequência inter-harmônica no sinal de tensão. A implementação da proposta pode ser realizada via *hardware* ou via *software*. A primeira estratégia nada mais é que o desenvolvimento de um equipamento para avaliar a variação do fluxo luminoso, através de um sensor, tal como o luxímetro utilizado nesta pesquisa. No que se refere a segunda estratégia, foi proposto para análises futuras o desenvolvimento de uma curva típica, visto que através de ensaios laboratoriais ficou evidenciado que a maioria das lâmpadas apresentam uma resposta similar de iluminância, em função da variação de tensão e da frequência de modulação.

CAPÍTULO V

Conclusões

À luz dos assuntos explorados ao longo de cada capítulo, é conveniente, neste momento, apresentar uma síntese dos principais pontos associados com os desenvolvimentos, propostas, metodologias, implementações computacionais, e outros aspectos gerais e conclusivos sobre os trabalhos até então realizados. Dentro deste enfoque, pode-se reconhecer que a presente pesquisa, nos termos atuais, evidencia significativas contribuições para a análise do fenômeno da flutuação de tensão em sistemas elétricos de potência, constatando-se ao longo do texto elaborado, os seguintes avanços:

a) Quanto à análise do fenômeno da flutuação de tensão em estudos de acesso

Através dessa pesquisa, foi identificado que as atuais recomendações nacional e internacional apresentam falhas para analisar o fenômeno da flutuação de tensão em estudos de acesso, principalmente quando as cargas acessantes são os fornos elétricos. Uma vez que este trabalho propõe um modelo simples, prático e preciso de forno elétrico, e adicionalmente propõe uma metodologia para avaliar corretamente o fenômeno em questão, fica claro que esses dois avanços contribuem para os estudos de acesso mais robustos, onde faz-se necessária uma

modelagem adequada do sistema no qual o acessante potencialmente perturbador será conectado.

b) Quanto à proposta de modelagem de fornos elétricos a arco

Nesta etapa da pesquisa foram realizados trabalhos voltados para o estabelecimento de uma proposta para modelagem simples, prática e precisa de fornos elétricos a arco. De fato, a importância do assunto se reveste que os fornos a arco representam um papel fundamental às usinas siderúrgicas e são uma das principais cargas causadoras de flutuações de tensão, além de outros distúrbios, nos sistemas elétricos de potência. Neste sentido, a literatura, como esclarecido ao longo desta tese, tem divulgado diversos tipos de modelos na tentativa de avaliar o fenômeno da flutuação de tensão causado pela presença de fornos a arco na rede elétrica. O fato das técnicas existentes se apresentarem bastante complexas, tornando-as impraticáveis, ou não serem genéricas para avaliação de fornos com diferentes capacidades, motivou a necessidade de desenvolvimentos e aprofundamentos na matéria. Assim, tomando-se como base as principais características de funcionamento do forno a arco, obtidas especialmente através de análises estatísticas em medições reais, foi proposto um modelo capaz de representar o comportamento do equipamento em seu período de fusão da sucata, o qual é definido como principal estágio para a causa das flutuações de tensão. Ao término dos trabalhos ficou evidenciado que a proposta de modelagem de forno elétrico a arco apresentada pela presente pesquisa se mostra adequada para a avaliação do fenômeno de flutuação de tensão, tanto para análises com a carga já em operação, quanto para estudos antes da conexão do forno a arco. A título de ilustração, a técnica proposta foi implementada para a modelagem de um forno a arco, instalado em um

sistema real, com o propósito de avaliar seu impacto no sistema elétrico. Para tanto, o indicador de severidade de *flicker*, P_{st} , obtido em simulação, foi comparado com aquele obtido por medição, verificando-se que ambos valores são bem próximos. Além de proporcionar bons resultados, a técnica proposta é de simples aplicação, facilitando a sua utilização para fins de estudos de acesso, onde deseja-se prever o impacto da carga antes da sua instalação no sistema elétrico.

c) Quanto à proposta para avaliação do fenômeno das flutuações de tensão

Esta fase da pesquisa foi direcionada à proposição de uma metodologia alternativa para avaliação do fenômeno das flutuações de tensão. Atualmente, o protocolo IEC 61000-4-15, ou simplesmente *flickermeter* IEC, é utilizado para este propósito. Todavia, conforme foi destacado nessa pesquisa, uma vez que o fenômeno da flutuação de tensão está diretamente relacionado com a presença de componentes de frequências inter-harmônicas, nota-se que o atual medidor apresenta limitações quando há elevadas componentes dessas frequências superpostas ao sinal de tensão. Em outras palavras, o protocolo IEC desconsidera variações de tensão causadas por elevadas componentes inter-harmônicas podendo, portanto, negligenciar um eventual problema na rede. Dessa forma, para análise do fenômeno da flutuação de tensão, este trabalho propôs uma metodologia fundamentada no efeito de cintilação luminosa, porém, ao contrário do *flickermeter* IEC, a quantificação do fenômeno foi realizada através da variação do fluxo luminoso, em resposta a uma determinada variação de tensão. Para tanto, foi desenvolvida uma curva de sensibilidade ao efeito *flicker* da iluminância em função da frequência, representando uma das principais

contribuições dessa metodologia. Através de testes laboratoriais, ficou evidenciado que a quantificação do fenômeno através dessa curva apresenta resultados melhores que o protocolo IEC. Adicionalmente, foi destacado nesse trabalho que as variações de fluxo luminoso de várias lâmpadas utilizadas nos sistemas de baixa tensão apresentam uma resposta similar para uma dada variação de tensão. Assim, foi destacado que uma curva padrão pode ser construída para representar a resposta da variação do fluxo luminoso em função da variação de tensão e da frequência de modulação e, consequentemente, através da curva de sensibilidade proposta, o fenômeno de flutuação pode ser quantificado de uma forma mais simples, ou seja, sem a necessidade de um dispositivo para detectar a variação de fluxo luminoso.

d) Quanto às investigações futuras sobre o tema

Através dos avanços atingidos ficou evidenciado que as propostas apresentadas nessa pesquisa, se mostram como técnicas adequadas para os estudos que envolvem o fenômeno de flutuação nos sistemas elétricos. Não obstante a isto, é importante reconhecer que estudos complementares, certamente, ainda se fazem necessários para se atingir o devido e necessário grau de maturidade e aceitação pelos agentes envolvidos na questão sob foco.

Dentro destes aspectos destacam-se, na sequência, alguns pontos considerados relevantes e meritórios para investigações futuras, os quais evidenciam ainda mais a importância dos trabalhos desenvolvidos nesta pesquisa:

-
- Realização de mais testes do modelo proposto de forno elétrico a arco, e incorporação de uma análise estatística em um número maior de fornos a arco, objetivando verificar se os mesmos seguem a mesma característica padrão daqueles analisados nesta pesquisa. Para tanto, faz-se necessário a obtenção de medições de tensão e corrente de fornos a arco instalados em sistemas reais;
 - Implementação da curva de sensibilidade da iluminância em função da frequência de modulação em um dispositivo que contenha uma lâmpada padrão, e um sensor para detectar a variação de fluxo luminoso da mesma;
 - Sabe-se que quando há apenas baixas ordens de componentes inter-harmônicas superpostas no sinal de tensão, verifica-se tanto variação de tensão eficaz, quanto de pico. Todavia, quando da presença de componentes inter-harmônicas com frequências elevadas, nota-se de forma substancial apenas variações da tensão de pico. Dessa forma, faz-se necessária uma ponderação para sinais de tensão, identificados com variação de tensão eficaz e de pico, e aqueles identificados com apenas variação de tensão de pico.
 - Maiores aprofundamentos e levantamentos voltados para a análise de outros efeitos produzidos pelas flutuações de tensão, tais como, vibrações em motores, redução da suportabilidade dielétrica em equipamentos com fonte chaveada, etc. Esta análise permite a proposição de um indicador que não esteja associado apenas com o efeito de cintilação luminosa;
 - Por fim, o estabelecimento de uma ferramenta computacional, contemplando as principais cargas causadoras de flutuações de tensão, e de um medidor que seja capaz de avaliar corretamente o

fenômeno em questão, possibilitando, portanto, o desenvolvimento de estudos de acesso mais eficazes que os atuais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEC 61000-4-15, "Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-15: Testing and measurement techniques - Flickermeter - Functional and design specifications," 2010.
- [2] Y. Jing, T. Tayjasanant, X. Wilsun, and S. Caixin, "Characterizing Voltage Fluctuations Caused by a Pair of Interharmonics," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 23, pp. 319-327, 2008.
- [3] V. B. Virulkar and M. V. Aware, "Modeling and simulation of flicker due to interharmonics," in Power Electronics (IICPE), 2010 India International Conference on, 2011, pp. 1-5.
- [4] K. Taekhyun, E. J. Powers, W. M. Grady, and A. Arapostathis, "Detection of Flicker Caused by Interharmonics," Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, vol. 58, pp. 152-160, 2009.
- [5] T. Tayjasanant, W. Wencong, L. Chun, and X. Wilsun, "Interharmonic-flicker curves," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 20, pp. 1017-1024, 2005.
- [6] X. Wilsun, "Deficiency of the IEC flicker meter for measuring interharmonic-caused voltage flickers," in Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE, 2005, pp. 2326-2329 Vol. 3.
- [7] C. Yong-Nong, G. T. Heydt, and L. Yazhou, "The impact of switching strategies on power quality for integral cycle controllers," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 18, pp. 1073-1078, 2003.
- [8] J. R. Macedo Jr., "Uma Contribuição à Análise das Componentes Inter-harmônicas e seus Efeitos nos Indicadores de Flutuação de Tensão," Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitoria/ES, 2009.
- [9] K. Taekhyun, M. Rylander, E. J. Powers, W. M. Grady, and A. Arapostathis, "LED Lamp Flicker Caused by Interharmonics," in Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2008. IMTC 2008. IEEE, 2008, pp. 1920-1925.

-
- [10] S. Chen, M. Y. Heah, A. B. Then, and M. K. Foo, "Automatic evaluation of flickering sensitivity of fluorescent lamps caused by interharmonic voltages," in Harmonics and Quality of Power, 2008. ICHQP 2008. 13th International Conference on, 2008, pp. 1-6.
 - [11] IEC 61000-3-7, "Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-7: Limits - Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV, HV and EHV power systems," 2008.
 - [12] ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico, "Instruções para realização de estudos e medições de QEE relacionados aos novos acessos à rede básica," RE 2.1 057, 2013.
 - [13] ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico, "Diretrizes e critérios para estudos elétricos," Submódulo 23.3 - Procedimentos de Rede, 2010.
 - [14] ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico, "Acesso aos Sistemas de Transmissão," Módulo 3 - Procedimentos de Rede, 2010.
 - [15] ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico, "Critérios para Estudos," Módulo 23 - Procedimentos de Rede, 2010.
 - [16] X. Yang and J. Gauthier, "How can flicker level be determined before a customer is connected to the electric grid," in Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE, 2009, pp. 1-6.
 - [17] WG C4.108, "Review of Flickermeter Objectives for LV, MV, and HV Systems," CIGRE Technical Brochure 449, 2011.
 - [18] M. Maana, A. Ortiz, F. J. Azcondo, F. J. Diaz, F. Gonzalez, and C. Renedo, "Flicker impact on 150 W HPS Lamps of different ages," in Electrical Power Quality and Utilisation, 2007. EPQU 2007. 9th International Conference on, 2007, pp. 1-6.
 - [19] Z. Kun, P. Ciufo, and S. Perera, "Rectifier Capacitor Filter Stress Analysis When Subject to Regular Voltage Fluctuations," Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 28, pp. 3627-3635, 2013.
 - [20] A. Testa and R. Langella, "Power system subharmonics," in Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE, 2005, pp. 2237-2242 Vol. 3.

-
- [21] T. Feese, R. Maxfield, and M. Hilscher, "Torsional vibration problem with motor/ID fan system due to PWM variable frequency drive," Proceedings of the 37th Turbomachinery Symposium, pp. 45-56, 2008.
 - [22] B. Chen, X. Yuan, Y. Xu, X. Wei, Q. Li, R. Sun, et al., "Power quality measurement and comparison between two wind farms equipped with FSIG+PMSG and DFIG," in Power System Technology (POWERCON), 2010 International Conference on, 2010, pp. 1-7.
 - [23] G. Chicco, P. Di Leo, I. S. Ilie, and F. Spertino, "Operational characteristics of a 27-MW wind farm from experimental data," in Electrotechnical Conference, 2008. MELECON 2008. The 14th IEEE Mediterranean, 2008, pp. 520-526.
 - [24] G. Chicco, P. Di Leo, F. Scapino, and F. Spertino, "Experimental Analysis of Wind Farms connected to the High Voltage Grid: the Viewpoint of Power Quality," in Environment Identities and Mediterranean Area, 2006. ISEIMA '06. First international Symposium on, 2006, pp. 184-189.
 - [25] L. S. Christensen, P. E. Sorensen, T. S. Sorensen, and H. K. Nielsen, "Evaluation of Measuring Methods for Flicker Emission from Modern Wind Turbine," presented at the AEE TECHWINDGRID'09-Grid Integration Seminar, Madrid, 2009.
 - [26] Y. J. Hsu and C. N. Lu, "Flicker measurements at an industrial power network with wind turbines," in Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE, 2006, p. 5 pp.
 - [27] A. Petersson, T. Thiringer, L. Harnefors, and T. Petru, "Modeling and experimental verification of grid interaction of a DFIG wind turbine," Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol. 20, pp. 878-886, 2005.
 - [28] IEC 61400-21, "Edition 2.0 Wind turbines – Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines," 2008.
 - [29] M. R. Cândido, "Aplicação da transformada wavelet na análise da qualidade de energia em fornos elétricos e arco," Tese de Doutorado, Electrical Engineering Department, São Paulo University (USP), 2008.
 - [30] A. L. V. C. Silva. (2006). Elaboração do aço em forno elétrico a arco. Available: http://www.equilibriumtrix.net/refino/forno_eletrico_acs_rev4.pdf

-
- [31] EPRI, "Understanding Electric Arc Furnace Operations," TechCommentary/TC-107714, 1997.
 - [32] J. J. Cardoso, Eletrotermia – Fornos elétricos a arco vol. 2: Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, 1987.
 - [33] W. Ries, Fornos a arco – Analise e projeto do sistema elétrico: EDIPUCRS, 2001.
 - [34] M. Görnerup and S. Poliakova, "Electric arc furnace," World Steel Association & MATTER. University of Liverpool, steeluniversity.org, 2012.
 - [35] A. Robert and M. Couvreur, "Arc furnace flicker assessment and prediction," in Electricity Distribution, 1993. CIRED. 12th International Conference on, 1993, pp. 2.2/1-2.2/6 vol.2.
 - [36] A. Cavallini, G. C. Montanari, L. Pitti, and D. Zaninelli, "ATP Simulation for Arc Furnace Flicker Investigation," European Transactions on Electrical Power, vol. 6, 1995.
 - [37] M. A. Golkar, M. T. Bina, and S. Meschi, "A Novel Method of Electrical Arc Furnace Modeling for Flicker Study," Renewable Energies and Power Quality, vol. 126, 2007.
 - [38] M. A. Golkar and S. Meschi, "MATLAB modeling of arc furnace for flicker study," in Industrial Technology, 2008. ICIT 2008. IEEE International Conference on, 2008, pp. 1-6.
 - [39] Z. Li, L. Yilu, M. R. Ingram, D. T. Bradshaw, S. Eckroad, and M. L. Crow, "EAF voltage flicker mitigation by FACTS/ESS," in Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES, 2004, pp. 372-378 vol.1.
 - [40] D. C. Bhonsle and R. B. Kelkar, "Simulation of electric arc furnace characteristics for voltage flicker study using MATLAB," in Recent Advancements in Electrical, Electronics and Control Engineering (ICONRAEeCE), 2011 International Conference on, 2011, pp. 174-181.
 - [41] G. Manchur and C. C. Erven, "Development of a model for predicting flicker from electric arc furnaces," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 7, pp. 416-426, 1992.

-
- [42] G. C. Montanari, M. Loggini, A. Cavallini, L. Pitti, and D. Zaninelli, "Arc-furnace model for the study of flicker compensation in electrical networks," *Power Delivery*, IEEE Transactions on, vol. 9, pp. 2026-2036, 1994.
 - [43] S. Varadan, E. B. Makram, and A. A. Girgis, "A new time domain voltage source model for an arc furnace using EMTP," *Power Delivery*, IEEE Transactions on, vol. 11, pp. 1685-1691, 1996.
 - [44] T. Le, S. Kolluri, and M. F. McGranaghan, "Voltage flicker prediction for two simultaneously operated AC arc furnaces," in *Transmission and Distribution Conference*, 1996. Proceedings., 1996 IEEE, 1996, pp. 255-262.
 - [45] R. Horton, T. A. Haskew, and R. F. Burch, "A Time-Domain AC Electric Arc Furnace Model for Flicker Planning Studies," *Power Delivery*, IEEE Transactions on, vol. 24, pp. 1450-1457, 2009.
 - [46] O. Ozgun and A. Abur, "Development of an arc furnace model for power quality studies," in *Power Engineering Society Summer Meeting*, 1999. IEEE, 1999, pp. 507-511 vol.1.
 - [47] O. Ozgun and A. Abur, "Flicker study using a novel arc furnace model," *Power Delivery*, IEEE Transactions on, vol. 17, pp. 1158-1163, 2002.
 - [48] Y. F. Wang and J. G. Jiang, "A novel chaotic model of AC electric arc furnace for power quality studies," in *Electrical Machines and Systems, 2007. ICEMS. International Conference on*, 2007, pp. 1759-1762.
 - [49] X. Yang and M. Kratz, "Power System Flicker Analysis and Numeric Flicker Meter Emulation," in *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne*, 2007, pp. 1534-1539.
 - [50] X. X. Yang and M. Kratz, "Power System Flicker Analysis by RMS Voltage Values and Numeric Flicker Meter Emulation," *Power Delivery*, IEEE Transactions on, vol. 24, pp. 1310-1318, 2009.
 - [51] A. A. Gomez, J. J. M. Durango, and A. E. Mejia, "Electric arc furnace modeling for power quality analysis," in *ANDESCON, 2010 IEEE*, 2010, pp. 1-6.
 - [52] E. O'Neill-Carrillo, G. T. Heydt, E. J. Kostelich, S. S. Venkata, and A. Sundaram, "Nonlinear deterministic modeling of highly varying loads," *Power Delivery*, IEEE Transactions on, vol. 14, pp. 537-542, 1999.

-
- [53] H. Yu-Jen, C. Kuan-Hung, H. Po-Yi, and L. Chan-Nan, "Electric Arc Furnace Voltage Flicker Analysis and Prediction," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 60, pp. 3360-3368, 2011.
 - [54] P. Bilik, P. Petvaldsky, and M. Kaspirek, "Twelve flickermeters comparison test," in *Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU), 2011 11th International Conference on*, 2011, pp. 1-4.
 - [55] G. Bucci, E. Fiorucci, and F. Ciancetta, "The Performance Evaluation of IEC Flicker Meters in Realistic Conditions," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 57, pp. 2443-2449, 2008.
 - [56] D. Fregosi, L. W. White, E. Green, S. Bhattacharya, and J. Watterson, "Digital Flickermeter design and implementation based on IEC Standard," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE*, 2010, pp. 4521-4526.
 - [57] D. Gallo, C. Landi, and N. Pasquino, "Design and Calibration of an Objective Flickermeter," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 55, pp. 2118-2125, 2006.
 - [58] A. Graczyk, "Construction criteria of a digital flickermeter," in *Electrical Power Quality and Utilisation, 2009. EPQU 2009. 10th International Conference on*, 2009, pp. 1-4.
 - [59] J. J. Gutierrez, J. Ruiz, L. A. Leturiondo, A. Lazcano, and I. Azpiri, "A simplified implementation of the test protocol for the IEC flickermeter," in *Electrical Power Quality and Utilisation, 2007. EPQU 2007. 9th International Conference on*, 2007, pp. 1-6.
 - [60] J. R. Macedo Jr, G. P. Colnago, G. C. D. Sousa, J. L. d. F. Vieira, E. Trarbach, and D. S. L. Simonetti, "Modelagem, construção e análise de desempenho do flickermeter IEC," *Sba Controle & Automação*, vol. 22, 2011.
 - [61] J. Ruiz, J. J. Gutierrez, U. Irusta, and A. Lazcano, "A Precise Analysis of the IEC Flickermeter When Subject to Rectangular Voltage Fluctuations," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 58, pp. 3839-3846, 2009.

-
- [62] L. W. White and S. Bhattacharya, "A Discrete Matlab–Simulink Flickermeter Model for Power Quality Studies," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 59, pp. 527-533, 2010.
 - [63] C. A. G. Medeiros, "Contribuição para a Conceituação, Medição, Efeitos e Análises dos Limites Relacionados com Flutuações de Tensão," *Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG*, 2003.
 - [64] Z. Hanzelka and A. Bien, "Harmonics-Interharmonics," *Power Quality Application Guide*, 2004.
 - [65] A. Testa, M. F. Akram, R. Burch, G. Carpinelli, G. Chang, V. Dinavahi, et al., "Interharmonics: Theory and Modeling," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 2335-2348, 2007.
 - [66] F. J. Azcondo, A. Ortiz, M. Maana, F. J. Diaz, C. Braas, C. Renedo, et al., "Effects of Flicker on Different Types of 150-W High-Pressure Sodium Lamps and Ballasts," in *Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE*, 2007, pp. 833-838.
 - [67] K. Chmielowiec, "Flicker effect of different types of light sources," in *Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU), 2011 11th International Conference on*, 2011, pp. 1-6.
 - [68] L. P. Frater and N. R. Watson, "Light flicker sensitivity of high efficiency compact fluorescent lamps," in *Power Engineering Conference, 2007. AUPEC 2007. Australasian Universities*, 2007, pp. 1-6.
 - [69] T. Keppler, N. Watson, and J. Arrillaga, "Computation of the short-term flicker severity index," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 15, pp. 1110-1115, 2000.
 - [70] H. Shyh-Jier and L. Chen-Wen, "Enhancement of digital equivalent voltage flicker measurement via continuous wavelet transform," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 19, pp. 663-670, 2004.
 - [71] M. Szlosek, B. Swiatak, Z. Hanzelka, and A. Bien, "Application of neural networks to voltage fluctuations measurement-a proposal for a new flickermeter," in *Harmonics and Quality of Power, 2004. 11th International Conference on*, 2004, pp. 403-407.

-
- [72] A. E. Emanuel and L. Peretto, "A simple lamp-eye-brain model for flicker observations," *Power Delivery*, IEEE Transactions on, vol. 19, pp. 1308-1313, 2004.
 - [73] M. G. Masi, L. Peretto, and R. Tinarelli, "Flicker Effect Analysis in Human Subjects: New Noninvasive Method for Next-Generation Flickermeter," *Instrumentation and Measurement*, IEEE Transactions on, vol. 60, pp. 3018-3025, 2011.
 - [74] L. Peretto, E. Pivello, R. Tinarelli, and A. E. Emanuel, "Theoretical Analysis of the Physiologic Mechanism of Luminous Variation in Eye-Brain System," *Instrumentation and Measurement*, IEEE Transactions on, vol. 56, pp. 164-170, 2007.
 - [75] L. Peretto, C. E. Riva, L. Rovati, G. Salvatori, and R. Tinarelli, "Analysis of the Effects of Flicker on the Blood-Flow Variation in the Human Eye," *Instrumentation and Measurement*, IEEE Transactions on, vol. 58, pp. 2916-2922, 2009.
 - [76] J. R. Macedo Jr. and D. S. L. Simonetti, "Análise de desempenho do flickermeter na presença de componentes inter-harmônicas," *Controle & Automação* (Impresso), vol. 23, pp. 508-519, 2012.
 - [77] G. P. Colnago, J. R. Macedo Jr., and J. L. F. Vieira, "Development and implementation of a flickermeter with luminous flux variation measurement," *Eletrônica de Potência* (Impresso), vol. 18, pp. 1235-1244, 2013.
 - [78] A. J. P. Rosentino Jr. , J. R. Macedo Jr., and A. C. Delaiba, "Uma nova perspectiva para a análise do fenômeno da flutuação de tensão," presented at the CBQEE 2013 - X Conferencia Brasileira sobre Qualidade da Energia Eletrica, Araxá-MG, 2013.
 - [79] IEEE Std. 1453, "IEEE Recommended Practice—Adoption of IEC 61000-4-15:2010, Electromagnetic compatibility (EMC)—Testing and measurement techniques—Flickermeter—Functional and design specifications," 2011.
 - [80] ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico, "Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes," Submódulo 2.8 - Procedimentos de Rede, 2009.
 - [81] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, "Qualidade da Energia Elétrica," Módulo 8 – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, 2011.

-
- [82] C. May and E. R. Collins, "An investigation of the response of incandescent lamps and compact fluorescent lamps to voltage fluctuations," in Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010 14th International Conference on, 2010, pp. 1-8.
 - [83] S. Uddin, H. Shareef, A. Mohamed, and M. A. Hannan, "Analysis of voltage sag sensitivity of LED lamps," in Power and Energy (PECon), 2012 IEEE International Conference on, 2012, pp. 667-670.
 - [84] L. Chi Kwan, L. Sinan, and S. Y. Hui, "A Design Methodology for Smart LED Lighting Systems Powered By Weakly Regulated Renewable Power Grids," Smart Grid, IEEE Transactions on, vol. 2, pp. 548-554, 2011.
 - [85] S. C. Chapra and R. P. Canale, *Métodos Numéricos para Engenharia*, 5^a ed.: BOOKMAN, 2008.
 - [86] S. C. Cerchiari, A. Teurya, J. O. P. Pinto, G. Lambert-Torres, L. Sauer, and E. H. Zorzate, "Data Mining in Distribution Consumer Database using Rough Sets and Self-Organizing Maps," in Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE '06. 2006 IEEE PES, 2006, pp. 38-43.

APÊNDICE

A.1 – Aplicação do Protocolo IEC 61000-3-7 – Estudo de caso: Avaliação da conexão de uma máquina de solda trifásica

Este estudo de caso destaca a predição do efeito *flicker*, baseado na avaliação simplificada da IEC 61000-3-7, devido à conexão de uma máquina de solda trifásica (W_2) no sistema elétrico ilustrado pela Figura A.1, onde já se encontra instalado uma máquina de solda (W_1). Ressalta-se que o consumidor 1 e consumidor 2, instalados no sistema MT, são cargas não perturbadoras.

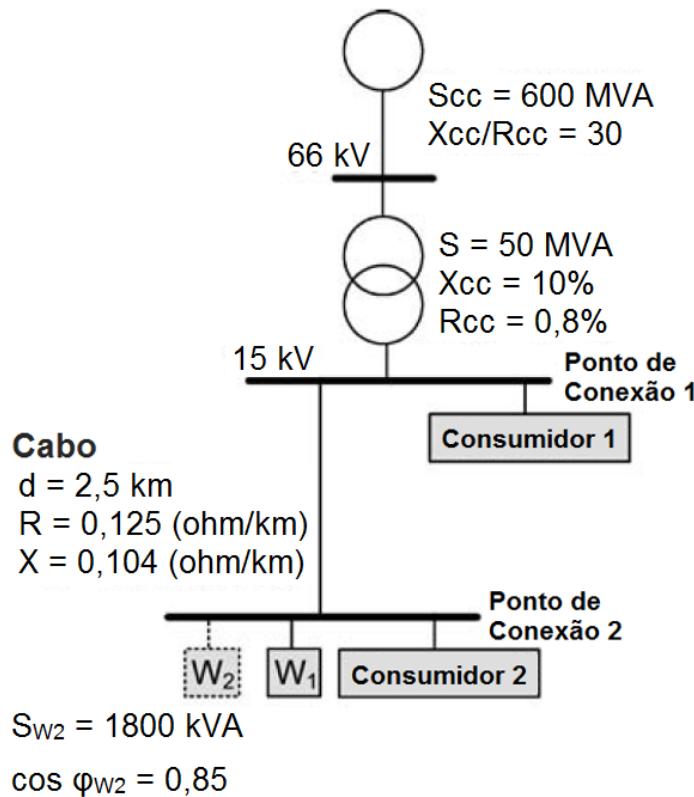


Figura 61 - Sistema elétrico utilizado para aplicação de estudo de caso da IEC 61000-3-7.

Para análise do acesso da carga potencialmente perturbadora, serão consideradas as seguintes informações:

-
- Nível de planejamento permitido no ponto de conexão 1: $Pst_{m-MT} = 0,8 \text{ p.u.};$
 - Nível de planejamento permitido no ponto de conexão 2: $Pst_{MT} = 0,9 \text{ p.u.};$
 - Atenuação de flicker entre barramentos de 66 kV e 15 kV: $TF_{MT} = 0,9;$
 - Pst medido no ponto de conexão 2, sem considerar W2: $Pst_{(w1)} = 0,67 \text{ p.u.};$
 - Operação de W₂: 20 operações por minuto: $r = 40 \text{ variações de tensão por minuto.}$

A. Aplicação do critério 1 da IEC 61000-3-7

Para analisar o critério 1 da IEC 61000-3-7, deve-se estimar o valor da relação percentual ($k\%$) entre a potência da máquina de solda (S_{W2}) e a potência de curto-circuito no ponto de conexão 2 (S_{cc-PC2}). Para tanto, tem-se os seguintes cálculos:

Impedância da fonte – lado de 15 kV:

$$Z_s = \frac{U_n^2}{S_{cc}} = \frac{15^2}{600} = 0,375\Omega$$

Admitindo a relação X_{cc}/R_{cc} igual a 30, consequentemente, a impedância da fonte, em sua forma complexa é:

$$Z_s = 0,012 + j0,375\Omega$$

Impedância do transformador – lado 15 kV:

$$R_t = \frac{R_{cc} \% \cdot U_n^2}{S_n \cdot 100} = \frac{0,8 \cdot 15^2}{50 \cdot 100} = 0,036\Omega$$

$$X_t = \frac{X_{cc} \% \cdot U_n^2}{S_n \cdot 100} = \frac{10 \cdot 15^2}{50 \cdot 100} = 0,450\Omega$$

$$Z_t = 0,036 + j0,450\Omega$$

Impedância do cabo 15 kV:

Considerando uma extensão de 2,5 km de cabo, cuja resistência e reatância são respectivamente, 0,125 Ω/km e 0,104 Ω/km, consequentemente, a impedância do cabo MT é:

$$Z_c = 0,313 + j0,260\Omega$$

Impedância no ponto de conexão 2:

Dos cálculos anteriores, estima-se a impedância no ponto de conexão 2:

$$Z_{PC2} = Z_s + Z_t + Z_c = 0,361 + j1,085\Omega$$

Este valor implica em uma potência de curto-circuito no ponto de conexão 2 igual a:

$$S_{cc-PC2} = \frac{U_n^2}{Z_{PC2}} = \frac{15^2}{1,143} \approx 200MVA$$

Assim, o valor de k% pode ser estimado:

$$k\% = \frac{S_{W2}}{S_{cc-PC2}} = \frac{1,8}{200} \cdot 100 = 0,9\%$$

Comparando o valor de k% calculado com os limites estabelecidos na Tabela A.1, verifica-se que o mesmo extrapola o limite de 0,2%. Portanto, conclui-se que o acesso da carga, tomando-se o critério 1 da IEC 61000-3-7, não pode ser aprovado.

Tabela 28 - Limites para variações relativas da potência em função do número de variações de tensão por minuto (r).

r	$K = (\Delta S_i / S_{sc}) \%$
$r > 200$	0,1
$10 \leq r \leq 200$	0,2
$r < 10$	0,4

B. Aplicação do critério 2 da IEC 61000-3-7

Para analisar o critério 2 da IEC 61000-3-7, o valor de Pst deve ser estimado. Para tanto, inicialmente foi calculado a variação percentual de tensão:

$$d = \Delta V/V \% = \frac{R_{PC2} \cdot P_{w2} + X_{PC2} \cdot Q_{w2}}{U_n^2} \cdot 100 = \frac{0,361 \cdot 1800 \cdot 10^3 \cdot 0,85 + 1,085 \cdot 1800 \cdot 10^3 \cdot 0,53}{(15 \cdot 10^3)^2} \cdot 100 = 0,71\%$$

Da Figura A.2, verifica-se que seria necessária uma variação percentual de tensão (d_0) de 0,9% para que a máquina de solda (W_2) causasse um Pst de 1,0 pu.

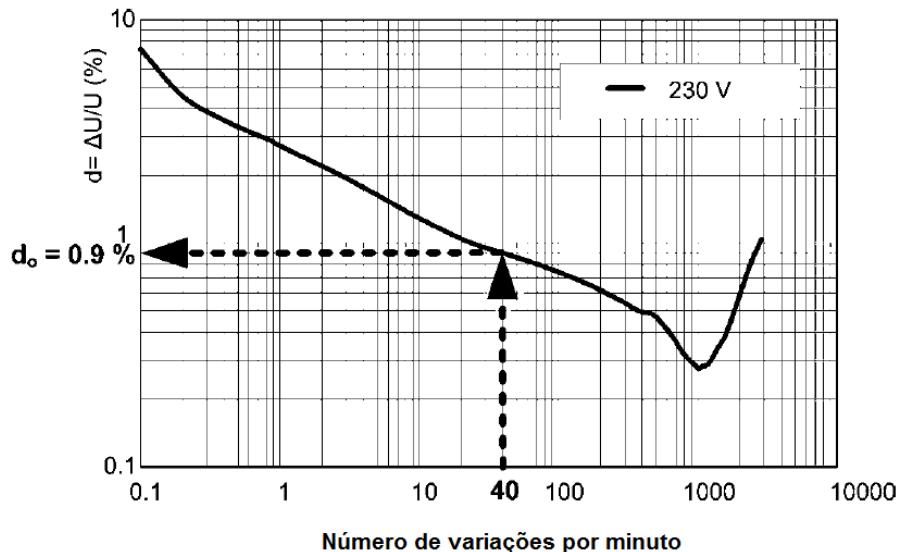


Figura 62 - Variação percentual de tensão obtida da curva de Pst unitário.

Dessa forma, tem-se que o Pst emitido pelo equipamento é:

$$P_{st(w2)} = \frac{d}{d_0} = \frac{0,71}{0,9} = 0,79 \text{ p.u.}$$

Diante do Pst emitido pela carga, calcula-se a máxima emissão global permitida no ponto de conexão 2:

$$GPst_{MT} = \sqrt[3]{Pst_{MT}^{\alpha} - (Pst_m \cdot TF_{MT})^{\alpha} - Pst_{c-MT}^{\alpha}} = \sqrt[3]{0,9^3 - (0,8 \cdot 0,9)^3 - 0^3} = 0,71 \text{ p.u.}$$

Uma vez que o valor de *flicker* emitido pela carga já é maior que a máxima emissão global, consequentemente também será maior que o valor da emissão individual permitido, E_{Psti} . Portanto, conclui-se que o acesso da nova carga perturbadora, tomando-se o critério 2 da IEC 61000-3-7, não pode ser aprovado.

C. Aplicação do critério 3 da IEC 61000-3-7

O critério 3 da IEC 61000-3-7 estabelece que caso as condições de conexão não se adequem aos estudos desenvolvidos pelo critério 1 e 2, verifica-se a possibilidade de permitir maiores níveis de emissão de *flicker* da carga acessante. O valor de *flicker* emitido no ponto de conexão 2, devido à operação simultânea das duas cargas perturbadoras, pode ser calculado como:

$$P_{st(w1+w2)} = \sqrt[3]{P_{st(w1)}^3 + P_{st(w2)}^3} = \sqrt[3]{0,67^3 + 0,79^3} = 0,93 \text{ p.u.}$$

Tomando-se tal valor, o nível de planejamento no barramento MT deveria ser alterado de 0,9 para:

$$Pst_{MT} = \sqrt[3]{Pst_{(w1+w2)}^{\alpha} + (Pst_m \cdot TF_{MT})^{\alpha}} = \sqrt[3]{0,93^3 + (0,8 \cdot 0,9)^3} = 1,06 \text{ p.u.}$$

Portanto, cabe à Distribuidora autorizar o acesso da nova carga com ou sem equipamento de mitigação.