

Universidade de São Paulo

Escola de Engenharia de São Carlos

Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação

Guilherme Grizzo Ragazzi

**Estudo e Análise dos Indicadores Referentes à Flutuação de
Tensão em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**

São Carlos

2014

Guilherme Grizzo Ragazzi

**Estudo e Análise dos Indicadores
Referentes à Flutuação de Tensão
em Sistemas de Distribuição de
Energia Elétrica**

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

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

Orientador: Prof. Dr. Mário Oleskovicz

São Carlos

2014

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

R943e Ragazzi, Guilherme
Estudo e Análise dos Indicadores Referentes à
Flutuação de Tensão em Sistemas de Distribuição de
Energia Elétrica / Guilherme Ragazzi; orientador Mário
Oleskovicz; coorientador Luciano Carli. São Carlos,
2014.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2014.

1. Flutuação de tensão. 2. Sistemas de
Distribuição. 3. flicker. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Guilherme Grizzo Ragazzi

Título: “Estudo e análise dos indicadores referentes à flutuação de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 16 / 12 / 2014,

com NOTA 6,5 (seis, cinco), pela Comissão Julgadora:

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

Mestre Thais Reggina Kempner - (Doutoranda - SEL/EESC/USP)

Mestre Luciano Carli Moreira de Andrade - (Doutorando - SEL/EESC/USP)

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

Resumo

RAGAZZI, G.G. **Estudo e Análise dos Indicadores Referentes à Flutuação de Tensão em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 2014. 46f. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014.

Este trabalho de conclusão de curso possui como objetivo a realização de um estudo da flutuação de tensão em Sistemas Elétricos de Potência (SEP) no contexto da Qualidade da Energia Elétrica (QEE). Para esse estudo e análise foi necessária uma pesquisa bibliográfica sobre os regulamentos e normas nacionais e internacionais sobre flutuação de tensão, na busca e entendimento dos indicadores aplicados à análise da qualidade da energia elétrica, com especial atenção aos Sistemas de Distribuição (SD) de energia elétrica no Brasil. Na sequência, para um melhor entendimento do distúrbio em análise, foram simulados diversas situações referentes à flutuação de tensão via o *software Multisim*, da *National Instruments*. Todas as informações e considerações, bem como os resultados decorrentes desta análise serão devidamente reportadas neste documento. Em suma, as simulações realizadas neste trabalho demonstraram importância significativa para a compreensão adequada do efeito do *flicker*, decorrente do fenômeno da flutuação de tensão, em um sistema de distribuição. Para gerar algumas das situações de interesse para este estudo, a carga considerada, simulada e conectada ao sistema de distribuição em análise foi uma máquina de solda.

Palavras chave: Sistema Elétrico de Potência, Qualidade da Energia Elétrica, Flutuação de Tensão e Sistema de Distribuição.

Abstract

RAGAZZI, G.G. **Study and Analysis of Indicators Relating to the Voltage Fluctuation in Distribution Systems** 2014. 46f. Final Paper – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2014

This course conclusion work has as objective the realization of a full study of the voltage fluctuation inserted in the Power Quality context of Electrical Power Systems. The study and analysis required a bibliographical research of both national and international norms and regulations on voltage fluctuations, in order to acquire knowledge and understanding of the indicators directly applied to the Power Quality analysis, particularly regarding to the electric energy distribution system in Brazil. In this sense, aiming to foster deeper comprehension of the matter, simulations of several voltage fluctuations disturbances were carried out with the support of National Instruments' Multisim software. All information and considerations, as well as the results deriving of this analysis will be properly reported in this work. In conclusion, the simulations carried out in this document demonstrate significant importance to the understanding of the flicker effect as a result of the voltage fluctuation phenomena in a distribution system. In order to generate some of the simulations of interest to this study the load considered simulated and connected to the distribution system in analysis was a welder machine.

Keywords: Electrical Power System, Distribution System, Power Quality, Voltage Fluctuation.

Lista de Figuras

Figura 1 - Pacientes fotossensíveis ao flicker	8
Figura 2 - Exemplo de um gerador de flicker.....	15
Figura 3 - Pulsos retangulares de 1 a 15Hz	18
Figura 4 - Diagrama de bloco do flicker.....	19
Figura 5 - Pst de uma turbina eólica com frequência fixa e outra variável. A frequência de corte apresenta escala logarítmica.....	20
Figura 6 - Diagrama do Simulador de Medição do Pst	23
Figura 7 - Média do valor total do Pst.....	24
Figura 8 - Modelo de uma máquina de solda	28
Figura 9 - Layout do Multisim.....	29
Figura 10 - Tipos de fonte do Multisim.	30
Figura 11 - Ferramentas do Multisim.	30
Figura 12 - Gerador de flicker	31
Figura 13 - Circuito gerador de flicker.	32
Figura 14 - Formas de onda para um chaveamento a 0,02 segundos.	32
Figura 15 - Formas de onda para um chaveamento a 0,04 segundos.	33
Figura 16 - Formas de onda para um chaveamento a 0,06 segundos.	33
Figura 17 - Formas de onda para um chaveamento a 0,08 segundos.	34
Figura 18 - Formas de onda para um chaveamento a 0,10 segundos.	34

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Terminologia para a flutuação de tensão	9
Tabela 2 - Valores de referência para Pst e Plt.....	10
Tabela 3 - Fatores de transferência	10
Tabela 4 - Parâmetros da carga..	15
Tabela 5 - Variações de Potência	16
Tabela 6 - Variação da tensão em função do instante de chaveamento.	35
Tabela 7 - Relação das potências para o instante de chaveamento de 0,02s....	37
Tabela 8 - Relação das potências para o instante de chaveamento de 0,04s....	38
Tabela 9 - Relação das potências para o instante de chaveamento de 0,06s....	38
Tabela 10 - Relação das potências para o instante de chaveamento de 0,08s..	39
Tabela 11 - Relação das potências para o instante de chaveamento de 0,10s..	40

Lista de Siglas e Abreviaturas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
BJT	<i>Bipolar Junction Transistor</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
FGPA	<i>Field Programmable Array</i>
FT	Fator de Transferência
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
Plt	Severidade de Longa Duração
Pst	Severidade de Curta Duração
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SCVD	<i>Short-Circuit Voltage Depression</i>
SD	Sistema de Distribuição
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SPICE	<i>Simulated Program with Integrated Circuits Emphasis</i>
THDV	<i>Total Harmonic Distortion of Voltage</i>

Sumário

1- Introdução	1
1.1- Objetivos da pesquisa	2
1.2- Estrutura do documento	2
2- Conceitos e Metodologia Adotada.....	5
2.1 Conceitos Envolvendo a QEE	5
2.2.1 Os Danos do Flicker à Saúde	7
3- Normas e Padrões Pertinentes ao Assunto.....	9
4- Avaliação de Alguns Estudos Encontrados	13
4.1 - Modelagem da fonte de flutuação de tensão	13
4.2- Implementação de um gerador de “flicker”	14
4.3- Impactos da Flutuação de Tensão.....	16
4.4- Avaliação do <i>Flicker</i> em Condições Reais	17
4.5- Emissão do <i>Flicker</i> em Turbinas Eólicas durante Operação Contínua.	18
4.6- Impactos das Interrupções de Curta e Longa Duração no indicador Pst	21
4.7- Distúrbios do Forno Elétrico a Ar	24
4.7.1 – Medição do <i>Flicker</i>	25
5- Simulação de um Gerador de <i>Flicker</i>	27
5.1- Modulação de Amplitude	27
5.2 - Máquina de solda	27
5.3 – Aplicação do <i>software Multisim</i>	28
5.4- Modelagem e Implementação do <i>Flicker</i>	31
5.4.1- Simulações de <i>Flicker</i> Cíclico.....	32
6 – Cálculo da Potência e Indicadores	37
7- Conclusão	43
8- Referências Bibliográficas.....	45

1 Introdução

Todo desenvolvimento da sociedade moderna depende da energia elétrica. Logo, é primordial nos certificarmos de que o sistema elétrico de potência opere e forneça energia elétrica de forma adequada, esperada e com segurança, conforme os padrões existentes. Portanto, quando ocorrem eventos e/ou distúrbios no Sistema Elétrico de Potência (SEP), é preciso investigar as causas, os meios de propagação e propor intervenções técnicas e economicamente viáveis para solucionar, ou pelo menos mitigar os efeitos.

Como a energia elétrica faz parte do dia a dia das pessoas, é de se esperar que cada vez mais exista preocupação sobre a Qualidade da Energia Elétrica (QEE) para que não haja interrupção no fornecimento ou uma má distribuição da mesma.

Dentro desse contexto, e com foco na QEE, esse trabalho se preocupará com o fenômeno da flutuação da tensão, que é perceptível visualmente ao ser humano nas lâmpadas, que cintilam frente a esta situação.

O fenômeno de flutuação da tensão é definido como uma variação sistemática ou randômica que ocorre no sistema, manifestado nas formas de ondas da tensão, onde suas magnitudes permanecem na faixa de 0,9 a 1,1 p.u [1]. Tais flutuações podem ser causadas por rápidas ou contínuas variações da corrente na carga. Como tais variações provocam a cintilação das lâmpadas, esse fenômeno é conhecido como *flicker* [2].

Normalmente a flutuação da tensão ocorre onde os sistemas estão fracos em relação à quantidade de potência requerida pela carga, resultando em uma baixa potência de curto-circuito [1]. Isso, combinado com consideráveis variações de corrente em um período curto de tempo, resulta no *flicker*.

Logo, é de interesse da comunidade técnico-científica o estudo da flutuação da tensão buscando sempre uma melhor operação do Sistema de Distribuição (SD) como um todo, o que refletirá em garantir uma correta operação e desejada vida útil dos equipamentos e/ou dispositivos agregados.

No contexto apresentado, esta pesquisa possui como objetivo a realização de um estudo da flutuação de tensão em SEP. Busca-se pela mesma um melhor entendimento dos indicadores diretamente aplicados à análise da qualidade da energia elétrica, com especial atenção aos SD de energia elétrica no Brasil. Diversas situações referentes à flutuação de tensão serão simuladas via o *software Multisim*, da *National*

Instruments. Todas as informações e considerações, bem como os resultados decorrentes desta análise serão devidamente reportadas no documento que segue.

1.1 Objetivos da pesquisa

A pesquisa teve como objetivo estudar o comportamento dos sistemas de distribuição frente ao distúrbio da flutuação de tensão no contexto da QEE.

Frente ao estudo e análises decorrentes sobre o assunto, pretendeu-se também apontar indicadores que possam ser usados para qualificar e quantificar o problema manifestado no contexto da QEE, com o intuito de melhor analisá-lo e de propiciar recursos buscando diminuir ou mesmo extinguir os efeitos causados pela flutuação de tensão.

1.2 Estrutura do documento

O documento está dividido nos seguintes tópicos:

No capítulo 2 é abordada a parte conceitual, bem como a metodologia aplicada para o estudo de flutuação da tensão.

No capítulo 3 é apresentado um estudo investigativo sobre o assunto tratado e as normas atualizadas dos países onde o tema flutuação da tensão possui pesquisa avançada.

No capítulo 4 é apresentado um estudo investigativo de alguns trabalhos e artigos divulgados pela comunidade técnico-científica interessada no assunto.

Já no capítulo 5 são apresentadas as considerações adotadas para a simulação de um gerador de *flicker*, tendo como objetivo um melhor entendimento e análise do problema em destaque, bem como alguns dos resultados decorrentes.

No capítulo 6, são realizados os cálculos da potência na carga considerando diferentes tipos de chaveamentos, e também será indicado como se realiza o cálculo dos indicadores quando se tem acesso às normas e ferramentas necessárias.

Por fim, no capítulo 7, têm-se as conclusões acerca do trabalho desenvolvido,

segundo-se de uma lista das referências bibliográficas consultadas para o desenvolvimento do trabalho como um todo.

2 Metodologia e Conceitos Básicos

2.1 Metodologia

A metodologia adotada e a ser mais bem delineada neste documento pode ser dividida em duas principais fases.

A primeira fase compreende uma revisão do estado da arte abordando os regulamentos, padrões, e/ou normas que tratam do assunto, assim como o registro e a avaliação dos principais trabalhos técnico-científicos realizados no exterior. Como meta para esta primeira fase, buscou-se apontar e/ou sugerir através do estudo bibliográfico realizado indicadores que possam ser utilizados para avaliar o distúrbio de flutuação da tensão no âmbito da distribuição de energia elétrica no Brasil.

A segunda fase foi direcionada a modelagem de um sistema de distribuição sendo que a partir deste, foram geradas inúmeras situações para caracterizar o distúrbio de flutuação da tensão. O banco de dados formado foi capaz de dar suporte à caracterização dos indicadores encontrados e/ou apontados por esta pesquisa, bem como poderá servir como base para futuros trabalhos relacionados ao tema.

2.2 Conceitos Básicos

O fenômeno da flutuação de tensão consiste na variação sistemática da tensão envolvida, ou uma série de variações randômicas na mesma. Sua magnitude normalmente não excede as taxas de tensão de 0.9 a 1.1 p.u [1].

Cargas que podem exibir rápidas ou contínuas variações na magnitude da corrente podem causar variações na tensão que são usualmente denominadas por *flicker*. O termo é derivado do impacto que o fenômeno da flutuação da tensão causa nas lâmpadas, que é perceptível ao olho humano. O olho humano é mais sensível a flutuações de luminescência de 5 a 10 Hz. Para frequências mais altas ou mais baixas, o olho humano é mais tolerante às flutuações [3].

Diante do exposto, tecnicamente, a flutuação da tensão é um fenômeno eletromagnético, enquanto o *flicker* é um indesejável resultado da flutuação da tensão em algumas cargas. No entanto, os dois termos são frequentemente unidos nos padrões.

Um das causas mais comuns para tal fenômeno é o arco voltaico manifestado

nos sistemas de distribuição e de transmissão de energia, ou decorrente dos acionamentos de grandes máquinas, visto que, em grandes máquinas, a corrente de partida é muito maior do que a nominal, o que pode causar flutuações de tensão e corrente [3].

Da literatura técnico-científica consultada, tem-se que a IEC (*International Electrotechnical Commission*) 61000-4-15 define a metodologia e especificações da instrumentação para a medida do *flicker* [4]. O IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) adota essa metodologia para sistemas de potência de 60 Hz na América do Norte [4]. A medição simula a função transferência envolvendo a lâmpada/olho/cérebro e produz uma medida fundamental chamada de Pst (*short term flicker sensation*). Este valor é normalizado para 1.0 para representar o nível de flutuação de tensão suficiente para causar um *flicker* notável ao olho humano para 50% de um grupo observador.

Outro termo aplicado a este contexto é o Plt (*long-term flicker sensation*). Este é usado com o propósito de verificar a complacência com níveis compatíveis estabelecidos por padrões e usados em contratos relacionados à energia elétrica. Este valor é uma média de 12 amostras consecutivas de valores de Pst em um período de duas horas [5].

O *flicker*, resultante da flutuação de tensão, pode ser separado em dois tipos: cíclico e não cíclico [6].

O *flicker* cíclico é resultado de periódicas flutuações da tensão no sistema, como, por exemplo, as ocasionadas por máquinas de solda e forno a ar [6]. Já o não cíclico é resultado de flutuações da tensão ocasionais, sendo causado principalmente na partida de motores de grande porte e por máquinas de solda [6].

Normalmente o *flicker* ocorre onde os sistemas estão fracos em relação à potência requerida pela carga, resultando em uma baixa potência de curto-circuito. Isso, combinado com consideráveis variações de corrente em um período curto de tempo, resulta no fenômeno. Com o aumento da carga, também há elevação na corrente de linha, e com isso aumenta a queda de tensão na linha. E a depender da mudança de magnitude da tensão e frequência da ocorrência, pode ser observado o *flicker*. Uma situação comum de flutuação de tensão ocorre quando uma grande planta industrial é construída no final de uma linha de distribuição “fraca”, com baixo nível (potência) de curto-circuito [6].

As flutuações na tensão são dependentes dos seguintes parâmetros [7]:

- Impedância do sistema;
- Frequência das flutuações de tensão resultantes; e
- Capacidade/potência (VA) da fonte potencial produtora da cintilação.

Uma carga pode causar *flicker* decorrente da existência de um arco-voltaico, pois estes são não lineares, e oriundos de cargas que variam com o tempo, frequentemente causando grandes flutuações de tensão e distorção harmônica [8]. Por exemplo, na operação de um forno a arco, em determinada fase do processo, pedaços de aço sucateado podem preencher o espaço entre os eletrodos, resultando em um curto-circuito (altamente reativo) no secundário do transformador. Esse fenômeno pode resultar em um *flicker* com uma taxa de 1 a 10 Hz [2].

Grandes máquinas de indução, quando na partida ou com cargas variando em uma considerável proporção também podem produzir flutuações de tensão no sistema. Quando um motor parte, a maior parte da potência drenada pelo mesmo é reativa, que resulta em uma grande queda de tensão através da linha de distribuição. Para reduzir o efeito do *flicker*, grandes motores são levados à velocidade desejada com técnicas de partidas suaves (*soft-start*) [2].

2.2.1 Os Danos do *Flicker* à Saúde

Os danos à saúde do *flicker* podem ser divididos naqueles que são resultantes de uma exposição imediata de alguns segundos, como ataques epiléticos, e aqueles danos decorrentes de uma exposição prolongada, como dores de cabeça e diminuição do desempenho visual no ser humano. A exposição imediata está associada com o *flicker* visível, com uma variação de frequência que varia de 3 a 70 Hz. Já os danos a longo prazo estão relacionados a modulação invisível da luz, nas quais a frequência é maior do que a descrita acima. Riscos à saúde é uma função de vários fatores, tais como: frequência, densidade da modulação e brilho [3]. Estes fatores são suscintamente descritos no que segue.

Frequência: se o *flicker* estiver em uma frequência que varia de 3 a 65 Hz, o risco de convulsão é muito alto. Se nos concentrarmos numa frequência de 15 a 20 Hz, a chance de se sofrer uma convulsão pode chegar perto de 100% [3]. A Figura 1 mostra a porcentagem de pacientes susceptíveis à convulsão em função da frequência do *flicker*. Ou seja, esta ilustra qual a porcentagem de pacientes que sentem o *flicker* em função da frequência.

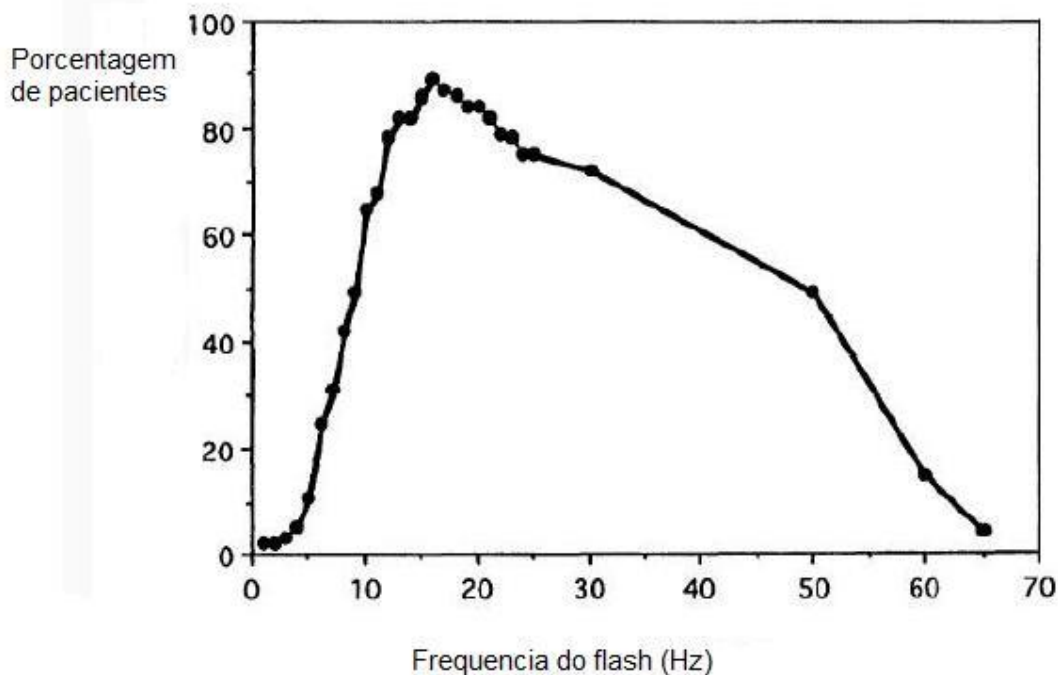


Figura 1- Pacientes fotossensíveis ao flicker.
Fonte: IEEE STANDAR P1789 [3].

a

frequência entre 50 e 60 Hz. Lâmpadas fluorescentes quando ficam velhas, podem gerar *flicker* em frequências que ultrapassam essa faixa, caracterizando o *flicker* invisível. Nesse caso, a retina do olho humano “resolve” esse problema de frequência. Contudo, quando exposto a mais de 20 minutos pode causar danos à saúde como, por exemplo, dores de cabeça, tontura ou mal-estar. No caso de exposições repetidas durante um grande período, o risco de ataque cardíaco aumenta [3].

3 Normas e Padrões Pertinentes ao Assunto

Para o estudo sobre flutuação de tensão, foi realizada uma pesquisa bibliográfica refletindo as normas e regulamentos nacionais e internacionais que tratam do assunto.

As normas e regulamentos nacionais foram encontrados no módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) no site da ANEEL [5].

A Tabela 1 mostra a terminologia para a sensação de cintilação, conforme encontrado em [5].

Tabela 1 - Terminologia para a flutuação de tensão [5].

Grandeza	Símbolo
Severidade de Curta Duração	Pst
Severidade de Longa Duração	Plt
Valor diário do Pst que foi superado em apenas 5% dos registros em um período de 24h	PstD95%
Valor semanal do Plt que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos em um período de 24h	PltS95%
Fator de Transferência	FT

O indicador Pst representa a severidade da cintilação luminosa associada a flutuação de tensão em um período contínuo de dez minutos. Em um período de 24 horas de medição, obteremos valores de Pst que nos levarão ao valor para PstD95%. Ou seja, o PstD95% é o valor no qual o indicador Pst foi superado 5% das vezes. De modo análogo ao Pst, o Plt mostra os níveis de cintilação luminosa verificada em um período contínuo de duas horas, em 12 medições consecutivas. Com uma semana de registro conseguem-se 7 medidas do PltS95%. Destes, utiliza-se como indicador o maior valor encontrado.

A Tabela 2 mostra os valores de referência que são utilizados para que se possa avaliar o desempenho de um SD referente à flutuação de tensão. Existem 3 faixas de classificação para os indicadores. Ainda segundo a referência [5], essa tabela serve de base para o planejamento elétrico em termos da QEE.

Tabela 2 - Valores de referência para Pst e Plt [5].

Valor de Referência	PstD95%	PltS95%
Adequado	< 1 p.u. /FT	<0,8 p.u. /FT
Precário	1 p.u. – 2 p.u. /FT	0.8 – 1.6 p.u /FT
Crítico	>2 p.u. / FT	>1.6 p.u. /FT

O valor de referência é calculado entre o valor do PltS95% do barramento do SD e o valor do PltS95% do barramento da tensão secundária de baixa tensão de distribuição eletricamente mais próximo.

Com base nos valores da tensão nominal de um determinado barramento, a Tabela 3 mostra os valores do FT que podem ser aplicados e considerados sobre um SD [5].

Tabela 3 - Fatores de transferência [5].

Tensão Nominal do Barramento	FT
Tensão > 230kV	0,65
69kV < Tensão < 230kV	0,80
Tensão < 69kV	1,0

Já em relação às normas e padrões internacionais, coloca-se inicialmente que, as mesmas não são de livre acesso, e o custo associado para obtê-las é elevado.

Sendo assim, apenas alguns comentários simplificados serão apresentados sobre as recomendadas pelo PRODIST, IEC e pelo IEEE.

Segundo o PRODIST “A flutuação de tensão é uma variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz da tensão. A determinação da qualidade da tensão de um barramento do sistema de distribuição quanto à flutuação de tensão tem por objetivo avaliar o incômodo provocado pelo efeito da cintilação luminosa no consumidor, que tenha em sua unidade consumidora pontos de iluminação alimentados em baixa tensão”.

As normas do IEC em questão e de interesse para esta pesquisa são: IEC 61000-4-15, IEC 61000-3-3, IEC 61000-3-5 e IEC 61000-3-7.

Alguns apontamentos referentes às mesmas são:

IEC 61000-4-15: define a metodologia e especificações da instrumentação para a medida do *flicker* e indica o correto nível de percepção do mesmo para quaisquer formas de onda de flutuação de tensão [4].

IEC 61000-3-3: Contém o padrão internacional do *flicker* para sistemas de baixa tensão. Especifica os limites que a tensão pode variar nos sistemas de distribuição [4].

IEC 61000-3-5: Dispõe sobre a emissão de perturbações devido a flutuações de tensão e *flicker* [4].

IEC 61000-3-7: Avaliação dos limites de emissão para a conexão de instalações flutuantes de média e alta tensão. Especifica quais são os limites aceitáveis de tensão que podem variar nos sistemas de potência [4].

Já pelo IEEE, este define o *flicker* como sendo uma rápida e repetitiva mudança no tempo no brilho da luz. E a modulação observada na forma de onda da tensão é uma medida da variação da luz que é comumente aplicada para 20 variações periódicas [7]. Ainda segundo o IEEE, tem-se o *flicker* visível (fenômeno que pode ser perceptível pelo olho humano) e o *flicker* invisível (fenômeno que não pode ser perceptível pelo olho humano) [3].

4 Avaliação de Alguns Estudos Encontrados

4.1 Modelagem da Fonte de Flutuação de Tensão

Em sistemas de distribuição, a capacidade de prever e limitar a flutuação de tensão, e, em consequência o *flicker*, está ganhando importância. Em indústrias alimentadas em baixa tensão um método baseado no valor RMS (*root mean square*) foi desenvolvido, tornando possível um grande número de simulações com cargas flutuantes [3]. Com a integração do módulo IEC61000-4-15 é possível calcular o *flicker* em quaisquer pontos da rede. O sistema foi testado e aplicado em várias indústrias para simular uma fonte de *flicker* usando um controle de tempo com chaveamentos para controlar a potência ativa (P) e reativa (Q) que permanecem constantes. Como P e Q permanecem constantes, o método envia respostas confiáveis [4].

Existem basicamente dois modelos para a simulação de flutuação da tensão.

- a) Modelo simples: O jeito mais simples de simular uma fonte de *flicker* é usando controle de tempo que apresenta P e Q constantes. Com isso o sistema fica estável e o método apresenta grande precisão. Contudo, o método não é útil para cargas variáveis.
- b) Modelo avançado: A potência na maioria das cargas que originam *flicker* é variável. Como exemplos das situações que geram *flicker* têm-se a utilização de máquinas de solda e a partida de grandes motores. O método simples não é preciso quando se trata de cargas não lineares que apresentam funções caóticas. Vários novos métodos estão sendo estudados para modelar e simular o *flicker* em cargas não lineares [4].

Uma máquina de solda pode ser modelada com reatância constante e resistência variável. As equações 1 e 2 descrevem esta modelagem [6]:

$$P = \frac{U^2}{R^2 + X^2} R \quad (1)$$

$$Q = \frac{U^2}{R^2 + X^2} X \quad (2)$$

Onde P é a potência ativa, Q a potência reativa e R a resistência.

Como o *flicker* é causado pela rápida variação da tensão, é muito importante simular o tempo de subida e de descida de P e Q. A chave para uma boa representação é simular corretamente a subida e a descida da curva [4].

4.2 Implementação de um Gerador de *Flicker*

Para a modelagem de um sistema de distribuição que contenha *flicker*, será necessária a implementação de um gerador do mesmo ou de um sistema que o contenha para que o estudo seja feito.

Como anteriormente já apresentado, *flicker* é um problema de QEE resultante das flutuações de tensão causadas por variações randômicas da potência ativa e reativa que acontecem devido a presença de fornos a ar elétricos, máquinas de solda, etc. Como consequência, essa variação de tensão, muda a intensidade das lâmpadas. Ainda, conforme anteriormente apresentado, o *flicker* pode ser dividido em duas categorias: o cíclico e o não cíclico. O *flicker* cíclico é repetitivo e causado por variações periódicas na tensão. O não cíclico corresponde a variações ocasionais como a partida de grandes motores [6].

O *flicker* é causado por pesadas flutuações nas cargas. Devido a essa característica, esse comportamento pode ser cíclico ou estocástico, como um arco voltaico. A tensão de flutuação é definida como [6]:

$$V(t) = \sqrt{2}V[1 + m(t)] \cos(2\pi ft) \quad (3)$$

Onde V é o valor RMS da tensão; f é a frequência fundamental e $m(t)$ é a modulação da amplitude.

O motivo principal de ter um gerador em laboratório é aplicar o fenômeno em diferentes tipos de carga. A Figura 2 ilustra como uma carga pode ser conectada à estrutura de um gerador de *flicker*. Onde a primeira ilustração mostra como o gerador é implementado no SD, e a segunda a carga.

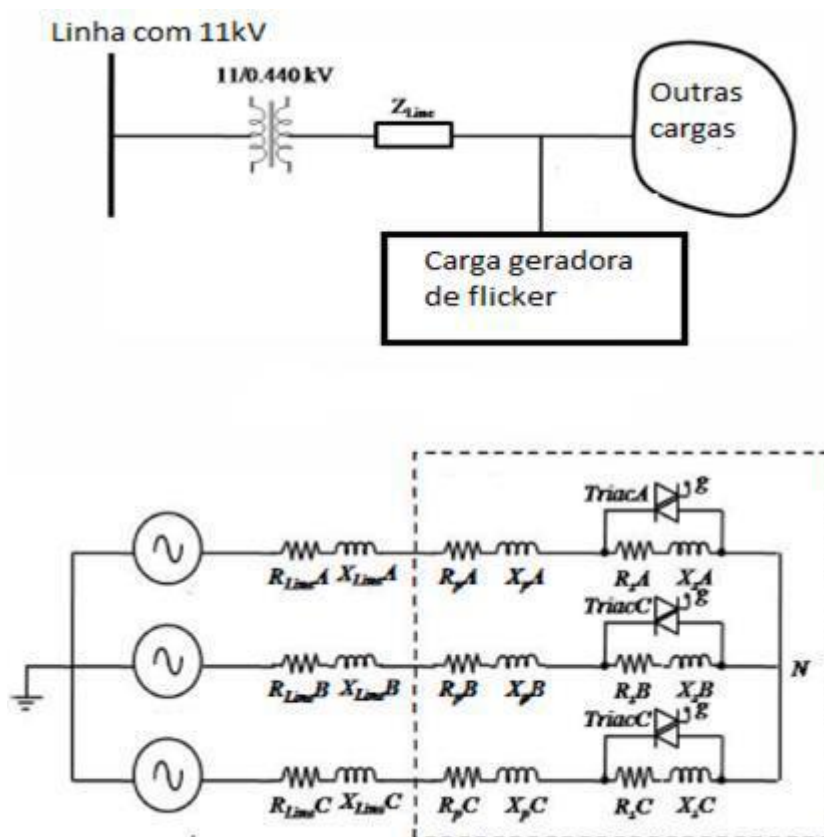


Figura 2 - Exemplo de um gerador de *flicker*.
Fonte: Virulkar e Aware [6].

Os parâmetros R_{line} e X_{line} representam a resistência e reatância da linha, R_p e X_p a carga que está sendo alimentada pelo sistema e R_s e L_s a resistência e reatância do gerador de *flicker*. Dependendo dos parâmetros selecionados, a corrente da carga irá variar resultando na variação da carga. Se o *flicker* for considerado como uma máquina de solda, então teremos 440 V e 50 Hz. Os parâmetros da carga são apresentados na Tabela 4 e as variações de potência ativa e reativa com a máquina de solda ligada e desligada na Tabela 5.

Tabela 4 - Parâmetros da carga [6].

R_s (ohm)	5	10	15	20
R_p (ohm)	5	10	15	20
L_s (mH)	5	10	15	20
L_p (mH)	5	10	15	20

Tabela 5 - Variações de Potência [6].

	P	Q	S
Sem solda	6,45 kW	5,36 kVAr	8,38 kVA
Com solda	12,9 kW	10,26 kVAr	16,48 kVA

4.3 Impactos da Flutuação de Tensão

Qualquer tipo de geração distribuída pode produzir flutuação de tensão no sistema de potência [8]. Por exemplo, saídas arco-voltaicas podem rebaixar de 100% até 20% a potência nominal em menos de um minuto [8]. A geração convencional pode também se rebaixar a qualquer momento, mas com menos frequência. Esses eventos produzem flutuação de tensão. Esses eventos podem ser quantificados usando diferentes parâmetros, tais como:

- P_{st} e Plt ;
- Aumento no número de regulações em um período de tempo. Ou seja, grande número de mudanças no SD em um período curto; e
- Aumento no número de chaveamento de capacitores.

A medição do *flicker* pelo IEC é considerada como uma função da frequência para produzir um valor de saída, para também embutir as características da lâmpada incandescente. Conforme já apresentado, o período do P_{st} é definido com um período de 10 minutos. Um período de severidade maior (Plt) é definido com um período de 2 horas, ou seja, 12 vezes consecutivas o P_{st} . Esse método produz uma saída para a flutuação de tensão com uma prévia de duas horas [7].

Testes do IEC especificam que o P_{st} deve ficar entre 0,95 e 1,05 p.u. durante as mudanças de tensão descritas abaixo em um sistema de 60 Hz [7]:

- 1 por minuto: 3,166%
- 2 por minuto: 2,568%
- 7 por minuto: 1,695%
- 39 por minuto: 1,044%
- 110 por minuto: 0,841%

- 1.620 por minuto: 0,547%
- 4.800 por minuto: 0,483%

Cada período de flutuação produz duas mudanças, uma para cima e outra para baixo. Ou seja, prejudica a forma de onda tanto em seu pico positivo como no negativo. Por exemplo, na partida de um grande motor, irá ocorrer um degrau de tensão, que depende da força do curto-circuito no ponto de acoplamento [7]. Se as flutuações de tensão precisam de mais regulações e um número maior chaveamento de bancos de capacitores, a vida útil dos equipamentos diminuirá. Grande aumento no chaveamento dos capacitores pode também causar transientes de sobre tensão [7].

4.4 Avaliação do *Flicker* em Condições Reais

O efeito do *flicker* é um dos mais complexos fenômenos estudados no âmbito da QEE. Envolve modelagem da flutuação de tensão, comportamento das lâmpadas e o atividade entre o olho e o cérebro [9]. Primeiramente, a causa do *flicker* era modelado em termos da modelagem da amplitude da tensão, com forma senoidal ou retangular. Essa é a principal razão pela qual essas formas de onda foram adotadas para avaliar o desempenho do *flicker* pelo IEC [9]. Mas, infelizmente, em condições reais, a flutuação de tensão assume formas mais complexas. Mas pode acontecer de se obter resultados diferentes com a mesma tensão de entrada. Esse fenômeno pode ocorrer devido ao uso de diferentes tipos de implementação do IEC *flicker*.

Os atuais padrões do IEC definem os requisitos de implementação e performance apenas em casos de amplitudes senoidais e retangulares [10]. Mas em casos reais, o *flicker* pode ser causado por outros motivos, como harmônicos superpostos ou por outras variações de tensão que não estão sincronizadas com a rede.

O indicador Pst é definido pelo padrão 61000-4-15 do IEC onde $P_{0,1}$, P_1 , P_3 , P_{10} e P_{50} são quando os níveis de tensão são excedidos durante 0,1%, 1%, 3%, 10% e 50% respectivamente, durante um certo período de observação.

Para que o teste do *flicker* possa atingir resultados que sejam interpretados para condições reais, as tipologias para teste propostas são as seguintes:

- A variação da frequência fundamental influência no teste;

- Altas frequências influenciam no teste (*aliasing*);
- Teste da linearidade;
- O componente inter harmônico influencia no teste;
- A mudança de fase influencia no teste; e
- A interrupção do suprimento da tensão influencia no teste.

Estes testes complexos e sistemáticos foram introduzidos para sistematicamente representar uma flutuação de tensão real que possa ser medida. Diferentes padrões de tensão foram propostos para nos aproximarmos das três cargas que mais produzem *flicker*: Trituradora de madeira, laminador e o forno a ar [9].

A Figura 3 representa os primeiros 60 segundos de uma sequência de pulsos retangulares com frequência de 1-15 Hz, com variação de 1% a 3%.

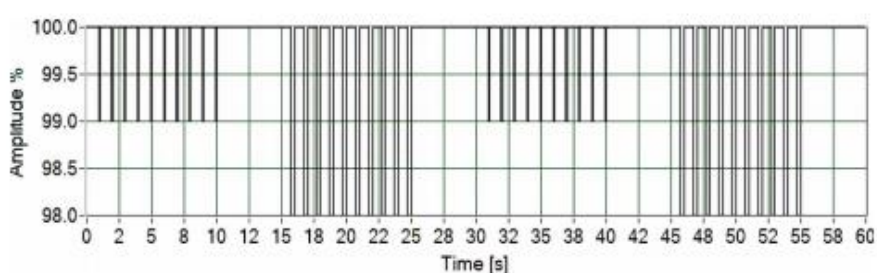


Figura 3 - Pulsos retangulares de 1 a 15Hz.
Fonte: Bucci, Fiorucci, Ciancetta [9].

4.5 Emissão do *Flicker* em Turbinas Eólicas Durante Operação Contínua.

Dentre as utilidades da energia eólica, a mesma é as vezes considerada uma fonte ruim quando entramos no contexto da QEE. Devido às conexões fracas em longas linhas de transmissão e produção irregular na quantidade de energia são na maioria das vezes os fatores apontados para tal afirmação. Mas outro fator também pode ser apontado para o problema em questão: o *flicker* [11]. O *flicker* não é apenas emitido durante a partida das turbinas eólicas, mas também durante a operação contínua das mesmas. Essa emissão produzida devido à operação contínua é consequência das variações na produção de energia devido à variação na velocidade do vento [11]. Em

áreas onde a tecnologia na produção de energia eólica está crescendo, algumas providências estão sendo tomadas.

O IEC está constantemente trabalhando nas exigências para redes conectadas às turbinas eólicas. Esse trabalho resultou no comitê IEC 61.400-21. Este comitê inclui a quantificação a serem especificadas para caracterizar QEE em turbinas eólicas e medições que possam qualificar tais características. O padrão proposto dá atenção especial para o *flicker*. Em complemento aos padrões genéricos, o *flicker* pode se tornar um sério limitante para a produção de energia eólica quando temos redes fracas.

Assim, o *flicker* em turbinas eólicas se tornou um assunto com grande importância. Um estudo realizado em diferentes turbinas eólicas concluiu que em certos casos, o *flicker* pode passar as especificações limites. Para se conseguir prever o surgimento do *flicker* em turbinas eólicas, ferramentas de *software* estão sendo desenvolvidas. A referência [11] tem o propósito de prover uma consistente revisão das análises e modelagem do *flicker* em turbinas eólicas durante operação contínua.

O cálculo do *flicker* leva em conta a resposta das lâmpadas incandescentes a flutuação de tensão e também a resposta do cérebro/olho humano em perceber tal variação. A Figura 4 descreve a arquitetura da medição do *flicker*.

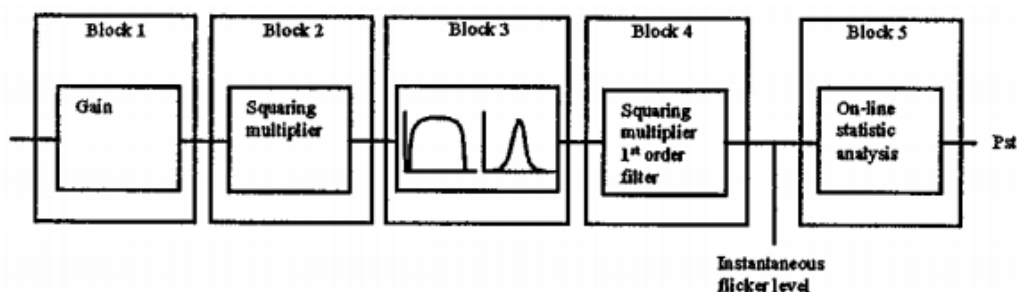


Figura 4 - Diagrama de bloco do *flicker*.
Fonte: Larsson [11].

Embora esse diagrama seja constituído por 5 blocos, o medidor de *flicker* pode ser dividido em 2 partes principais: 1) simulação da resposta da cadeia lâmpada-olho-cérebro e 2) uma análise estatística do sinal do *flicker* e apresentação dos resultados. Os blocos 2, 3 e 4 realizam a primeira parte, e o bloco 5 a segunda.

O comitê do IEC 61400-21 sugere que o *flicker* de uma única fonte não deve ser determinado por medições na tensão. Essa sugestão é feita para evitar o distúrbio devido a antecedentes flutuações de tensão na rede. O procedimento de medição é exibido a seguir:

Medições na corrente são usadas para calcular as variações na tensão segundo a equação 4 [12].

$$u_{fic}(t) = u_o(t) + R_{fic}(t) * i_m(t) + L_{fic}(t) * \frac{di_m(t)}{dt} \quad (4)$$

Onde: $u_o(t)$ é uma fonte de tensão ideal, R_{fic} e L_{fic} são a resistência e indutância da rede fictícia, respectivamente, e $i_m(t)$ é a medida da corrente instantânea. A fonte de tensão ideal é dada por:

$$u_o(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} U_n \text{sen}(\alpha_m(t)) \quad (5)$$

Onde: U_n é o valor RMS nominal da tensão na rede, e $\alpha_m(t)$ é o ângulo elétrico da fundamental [11].

A Figura 5 mostra o *flicker* em diferentes frequências de corte para uma turbina eólica com velocidade fixa e para uma turbina com velocidade variável.

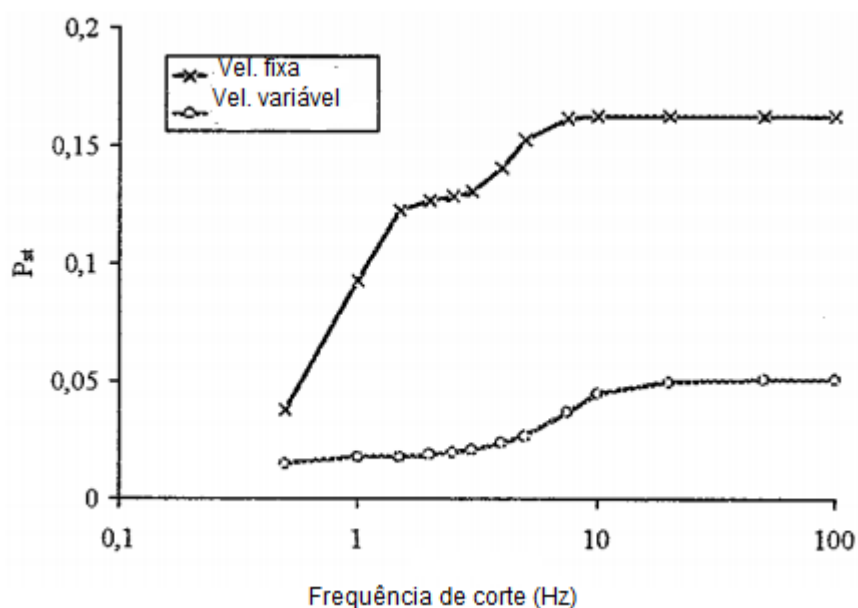


Figura 5 - Pst de uma turbina eólica com frequência fixa e outra variável. A frequência de corte apresenta escala logarítmica.

Fonte: Larsson [11].

Pode-se notar que para velocidade fixa, tem-se valores de Pst bem mais elevados. Para ambos os casos foi usado uma taxa de curto-circuito de 20 e ângulo de fase de 45° . A taxa de curto circuito é definida como a razão entre a potência de curto-circuito da rede e a potência da turbina eólica no PAC.

Com isso foi concluído que o *flicker* acontece também durante operação contínua em turbinas eólicas. O fenômeno é causado por flutuações na potência que emanam da variação da velocidade do vento.

4.6 Impactos das Interrupções de Curta e Longa Duração no indicador Pst

A QEE tem se tornado uma área de muito interesse de pesquisa nos meios acadêmico e industrial, assim como nas entidades reguladoras e de supervisão do setor de energia. Esse aumento de interesse é devido a chegada e instalação de novas tecnologias, na maioria equipamentos eletrônicos e cargas não lineares que afetam diretamente os SEP [13]. Logo, existe a necessidade de atualizar as regulações existentes referentes à QEE, em ordem de adaptá-la para as condições atuais. Logo, é interessante que se tenha analisadores de QEE instalados em subestações que sejam capazes de medir o indicador THDV (*Total Harmonic Distortion of Voltage*), interrupções na tensão maiores que um minuto e o Pst [13].

A referência [13] trás a implementação e calibração de uma simulação para a medição do *flicker* de acordo com o padrão 61000-4-15 do IEC, que permite a análise do indicador Pst sobre o efeito de sinais de tensão com curtas e longas interrupções.

A fim de se poder estudar as implicações que podem acontecer nos SD referentes à interrupção de tensão, o indicador Pst foi analisado para diferentes sinais de tensão de 120V e 60Hz para diferentes tipos de interrupção.

Com o intuito de avaliar diversos cenários de interrupções de tensão, foram criados cenários caracterizados por interrupções de tensão, com dez minutos de intervalo entre cada situação gerada. Neste sentido, a fim de se atingir o processo estocástico de *Poisson*, é usado o seguinte procedimento:

1) Cálculo dos parâmetros para cada cenário: todo cenário compreende uma quantidade randômica de interrupções dentro de um intervalo de 10 minutos no qual o valor esperado é 'k'. Para se atingir os parâmetros tem-se:

$$\lambda_{dur} = \frac{k}{600} \quad (6)$$

$$\lambda_{esp} = \frac{1}{30} \quad (7)$$

Onde: λ_{dur} é o parâmetro para simular a interrupção com mais de 60 segundos e λ_{esp} é o parâmetro para simular o tempo entre as interrupções.

2) Cálculo da duração do tempo de interrupção: para simular 'k' interrupções dentro de 10 minutos de intervalo, a duração do tempo de interrupção é calculado por:

$$u_i \sim U(0,1) \quad (8)$$

$$IT_i = 60 + \left(\frac{-1}{\lambda_{dar}} \ln(u_i)\right) \quad (9)$$

Onde: u_i é um número aleatório uniformemente distribuído no intervalo (0,1) e IT_i é o tempo de interrupção. Como se percebe as interrupções persistem por mais de 60s.

3) Cálculo do tempo durante subseqüentes interrupções: o tempo entre interrupções é calculado da mesma maneira que o tempo de interrupção, exceto que o tempo pode ser menor do que 60 segundos.

$$v_i \sim U(0,1) \quad (10)$$

$$IT_i = \frac{-1}{\lambda_{dar}} \ln(u_i) \quad (11)$$

Onde: v_i é um número aleatório uniformemente distribuído no intervalo (0,1) e TD_i é o tempo entre subseqüentes interrupções.

4) Acumulação dentro de um intervalo de 10 minutos: os tempos IT_i e TD_i precisam ser somados.

$$T = T + IT_i + TD_i \quad (12)$$

Onde: T é o tempo total.

5) Cálculo de subseqüente interrupções: se T é menor do que 10 minutos, voltar ao passo 2 do procedimento) para calcular os tempos associados a próxima interrupção. Se T é maior ou igual a dez minutos, registrar os tempos associados e vá ao próximo passo.

A Figura 6 ilustra a interpretação dos tempos apontados.

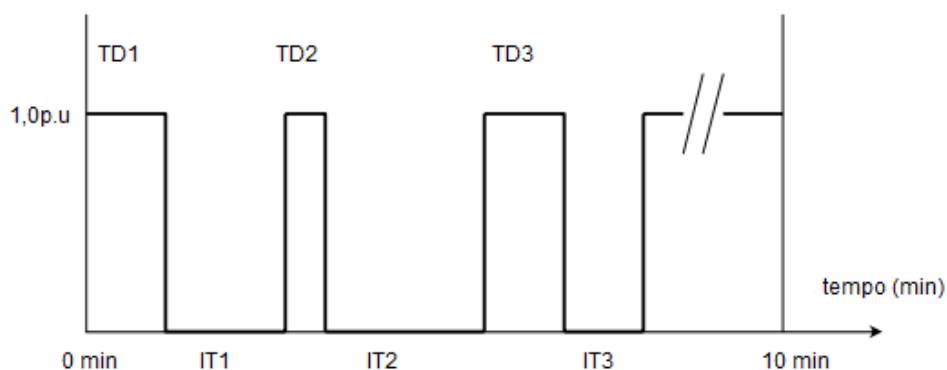
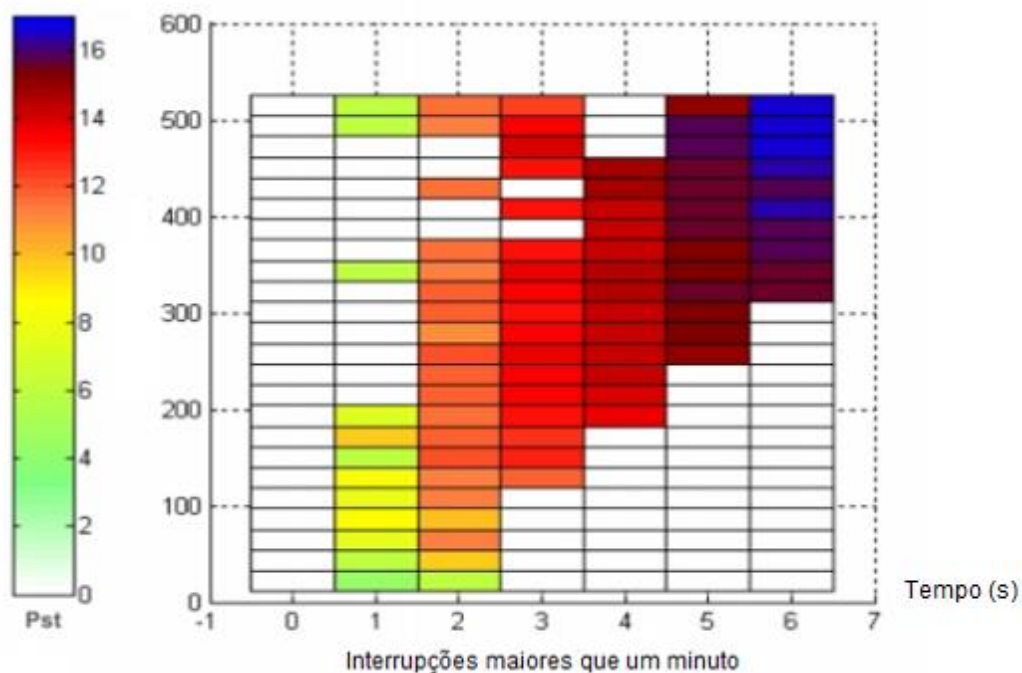


Figura 6 - Diagrama do Simulador de Medição do Pst.
 Fonte: Delgadillo *et al.* [13].

No trabalho apresentado, usando a metodologia descrita, 900 sinais foram simulados (450 de curta duração e 450 de longa duração). Esses sinais foram analisados por um simulador de medida de *flicker* a fim de obter os valores de Pst correspondentes.

Na Figura 7, o eixo X representa o número de eventos ocorridos em um intervalo de 10 minutos. Já o eixo Y representa o tempo total associados aos eventos. A Figura 7 (a) mostra o resultado para sinais com interrupções maiores que um minuto, e a Figura 7 (b) para sinais com curta duração.



(a)

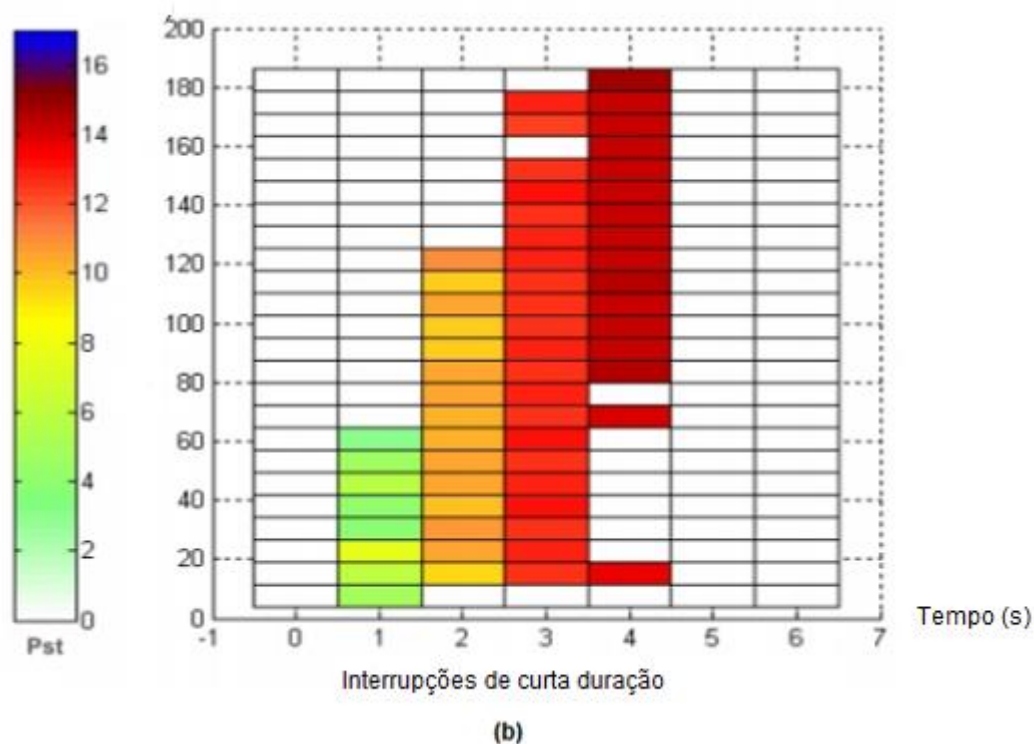


Figura 7 - Média do valor total do Pst.
Fonte: Adaptado de Delgadillo *et al.* [13].

4.7 Distúrbios Decorrentes do Forno Elétrico a Ar

Conforme apresentado em [14], todas as medidas elétricas associadas e decorrentes de um forno elétrico a ar exibem variações sobre o nível médio de operação. Em função deste, e dependendo da classe do forno e da capacidade de curto-circuito do SEP, uma flutuação de tensão com baixa frequência (0,1-15 Hz) pode ocorrer no PAC. Isso resulta em *flicker* nas lâmpadas incandescentes e problemas em áreas adjacentes do local de instalação do forno elétrico a ar.

No passado, a medição e a avaliação dos distúrbios do forno a ar eram focados apenas na medição da tensão do *flicker*. Mas, atualmente, uma medição mais apurada dos distúrbios e dos parâmetros, tem se tornado um ponto de interesse, tanto para a avaliação do desempenho geral das instalações, como para a construção de um banco de dados que possa ser usado para melhor prever o nível de distúrbio que será esperado em futuras instalações de expansão [14].

O objetivo desse artigo é revisar os métodos em tempo real que podem ser usados para medir os distúrbios causados pelo forno elétrico a ar. Para tanto, cabe lembrar que a reatância do forno elétrico a ar em SD é bem maior do que a resistência do mesmo [14]. Consequentemente, qualquer variação na potência reativa pode provocar aumento na intensidade do *flicker* em lâmpadas fluorescentes ou incandescentes. Para flutuações de tensão maiores que certo nível, o *flicker* passa a ser irritante. Um método de estimar se o *flicker* pode ser um problema é examinar o nível de curto-circuito nos PAC com outras cargas conectadas ao sistema. Em caso de grandes fornos, o nível exigido de curto-circuito é tão alto que o mesmo é possível apenas em sistemas com tensões muito altas.

Segundo [14], medidas indiretas de qualquer *flicker* podem causar problemas na identificação do caso quando o forno está em um instante em circuito aberto, e no próximo momento está sujeito à um curto-circuito trifásico. O *short-circuit voltage depression* (SCVD) obtido nesse caso é claro e simples de se calcular, dado o nível de curto-circuito e os parâmetros do circuito para o forno. Mas, ainda conforme [14], a relação entre o *flicker* e o SCVD é complexa e não é direta. O limite aceitável de magnitude pode ser obtido através de cálculos de fornos existentes e comparado com reclamações feitas por consumidores domésticos que usufruem do mesmo SD.

4.7.1 Medição do *Flicker*

Seguindo ainda a mesma referência, tem-se que o distúrbio do *flicker* causado por forno a ar e equipamentos de solda é um fenômeno muito bem conhecido no qual o principal efeito acontece nas lâmpadas incandescentes. O *flicker* pode ser periódico ou estocástico, devido a mudanças na tensão repentinas ou regulares na tensão. Ao longo dos anos, tentativas foram feitas para se estabelecer limites toleráveis para o *flicker* e desenvolver métodos de medição e instrumentação. No entanto, essa situação se tornou mais complexa com o surgimento de equipamentos que modificam o espectro amplitude-frequência das flutuações de tensão.

Neste contexto, o mais importante papel da medição do *flicker* é prover uma resposta objetiva de quando as condições do *flicker* são aceitáveis. Outro importante papel é de medir o fenômeno antes que se possa aceitar que novas cargas sejam conectadas ao mesmo SD. Isso pode ser problema devido à dificuldade de se atingir uma operação controlada do forno a ar e também de conseguir que a rede opere de forma contínua e controlada.

Também se encontra na referência comentários em relação ao tipo de função a ser escolhida para descrever o *flicker*, a qual tem que acomodar variações no espectro do mesmo. Este espectro pode variar dependendo do tipo de forno a ar, do sistema de controle e do tipo de carga. Por estas razões, será necessário relatar esta função como um modelo equivalente do forno a ar, para que sejam possíveis os cálculos que permitam prever o efeito do *flicker* nas instalações de interesse.

5 Simulação de um Gerador de *Flicker*

Neste capítulo abordaremos o circuito ilustrado no item 4.2 com mais detalhes. Como dito anteriormente, o *flicker* pode ser cíclico e/ou não cíclico. Nesse capítulo vamos abordar uma simulação de uma máquina de solda, e faremos a simulação do *flicker* cíclico.

Como o *flicker* pode ocorrer tanto em indústrias como em residências, devido, por exemplo, a presença de geladeiras e ao aumento da geração distribuída, há a necessidade de se estabelecer limites quantificados, para se desenvolver uma instrumentação que consiga medir com precisão a magnitude do mesmo, e com isso desenvolver técnicas que possam prevenir a adição de um novo *flicker* na carga.

5.1 Modulação de Amplitude

A flutuação de tensão aqui é descrita como uma modulação da amplitude da tensão fundamental, já descrita anteriormente pela equação 3, onde V é o valor RMS da tensão, f é a frequência da fundamental e $m(t)$ é a modulação da amplitude.

Já pela equação 13, tem-se que M é a amplitude da modulação, f_m é a frequência da modulação e ϕ é o ângulo de fase da amplitude.

$$M(t) = M \cos(2\pi f_m t + \phi) \quad (13)$$

Juntando-se (3) e (13) obtemos:

$$v(t) = \sqrt{2}V[1 + M \cos(2\pi f_m t + \phi)] \cos(2\pi f t) \quad (14)$$

Pela qual a flutuação de tensão pode ser descrita em função da frequência fundamental.

5.2 Máquina de solda

Uma máquina de solda industrial pode ser modelada por uma reatância constante e uma resistência variável como mostrado na Figura 8.

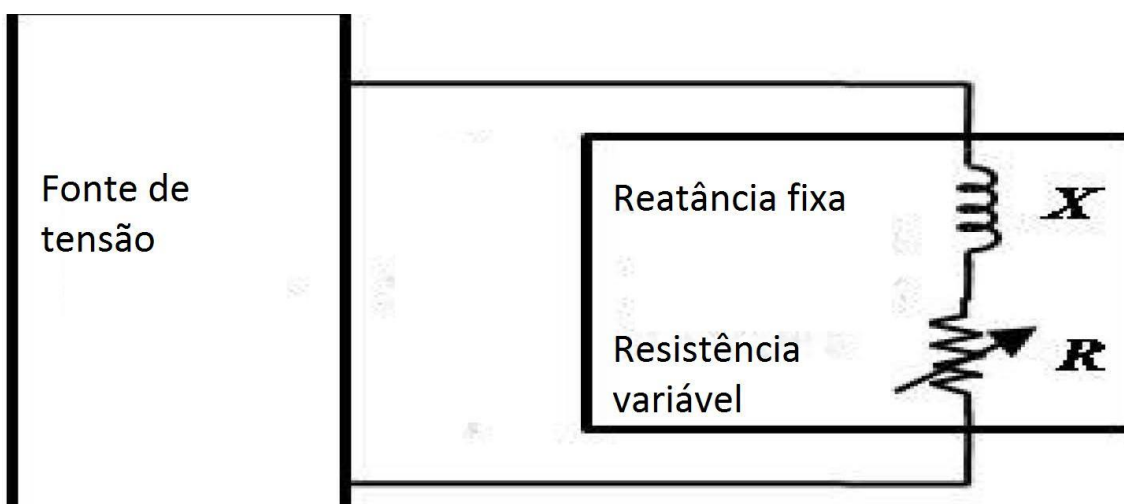


Figura 8 - Modelo de uma máquina de solda.
Fonte: Adaptado de Virulkar e Aware [6].

Dada a tensão V , podemos calcular P e Q conforme mostrado nas equações 1 e 2 já apresentadas.

Como o *flicker* é causado por uma rápida variação na tensão, é muito importante simular o tempo de subida e de descida de P e Q . Sendo assim, os fatores principais para a modelagem é representar corretamente as curvas de subida e descida. Para efeito de simplificação, algumas considerações foram adotadas neste estudo, X praticamente constante e R variando de 0 a 1 como uma função linear.

5.3 Aplicação do software *Multisim*

As próximas simulações que serão apresentadas foram obtidas via o software *Multisim*, que é um produto da *National Instruments* (<http://www.ni.com/multisim/>). A escolha desse software foi devido ao seu grande número de recursos, bem como pelo fácil uso e pela facilidade de interação com outras plataformas. A seguir serão listadas várias aplicações do *Multisim* para justificar sua escolha.

- Aplicação com sistemas e eletrônica de potência: a plataforma contém uma biblioteca de componentes e análises especializadas que permite aos usuários explorar conceitos como CA-CC (corrente alternada-corrente contínua), PWM (*pulse width modulation*), fontes CC-CC (corrente contínua-corrente contínua) chaveadas e energias renováveis [9].
- Circuitos lógicos digitais, micro controladores e FPGA (*field*

programmable gate array): “A plataforma contém portas lógicas digitais, contadores e micro controladores, que permitem reforçar o ensino dos tópicos iniciais da eletrônica digital, como a álgebra booleana. Os diagramas eletrônicos especializados de dispositivos lógicos programáveis proporcionam aos usuários a capacidade de traduzir circuitos de portas lógicas digitais em VHDL (*very high speed integrated circuits*) bruto implementado em FPGA de parceiros comerciais; dessa forma, eles podem implementar seus códigos no hardware para aprenderem fundamentos digitais sem terem de aprender sintaxes complexas” [14].

- Circuitos analógicos: com sua plataforma gráfica, o usuário pode conectar componentes eletrônicos e simular seu comportamento. Sua biblioteca contém resistores, capacitores, indutores, fontes, chaves, transistores BJT (*bipolar junction transistor*) e MOSFET (*metal oxide semiconductor field effect transistor*), possui osciloscópio e análises via o SPICE (*simulated program with integrated circuits emphasis*) [14].

Pela Figura 9, tem-se uma imagem da interface inicial do software descrito e suas principais ferramentas.

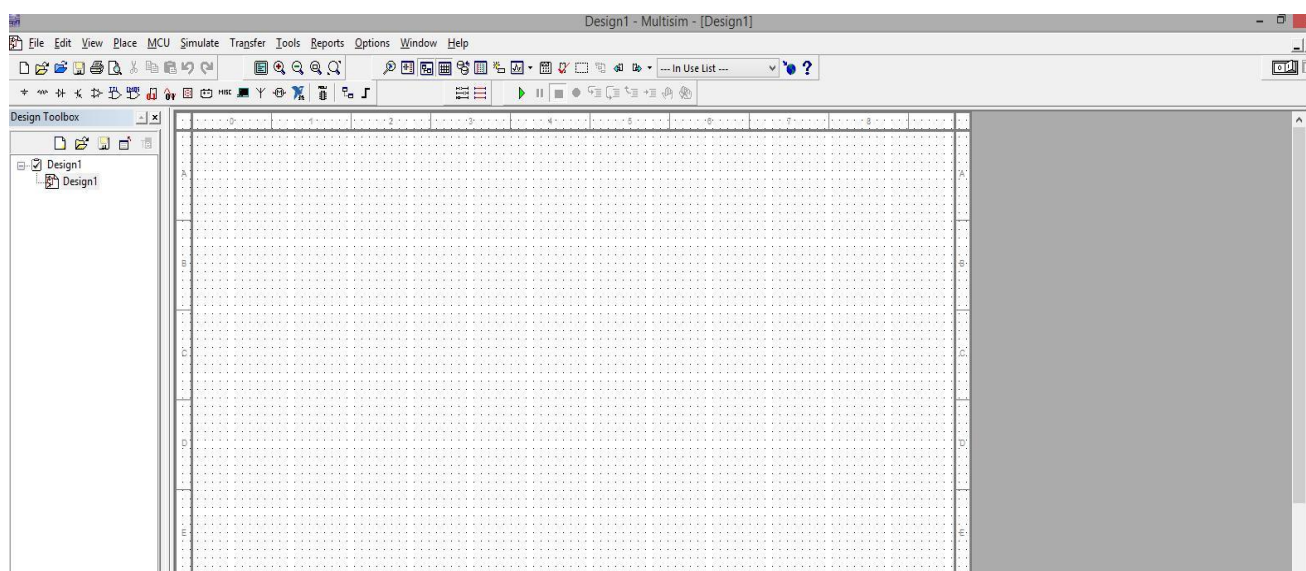


Figura 9 - Layout do Multisim.

Clicando na ferramenta apontada pela seta (Figura 10), podemos abstrair quaisquer tipos de fontes, sejam elas controladas, digitais ou analógicas.

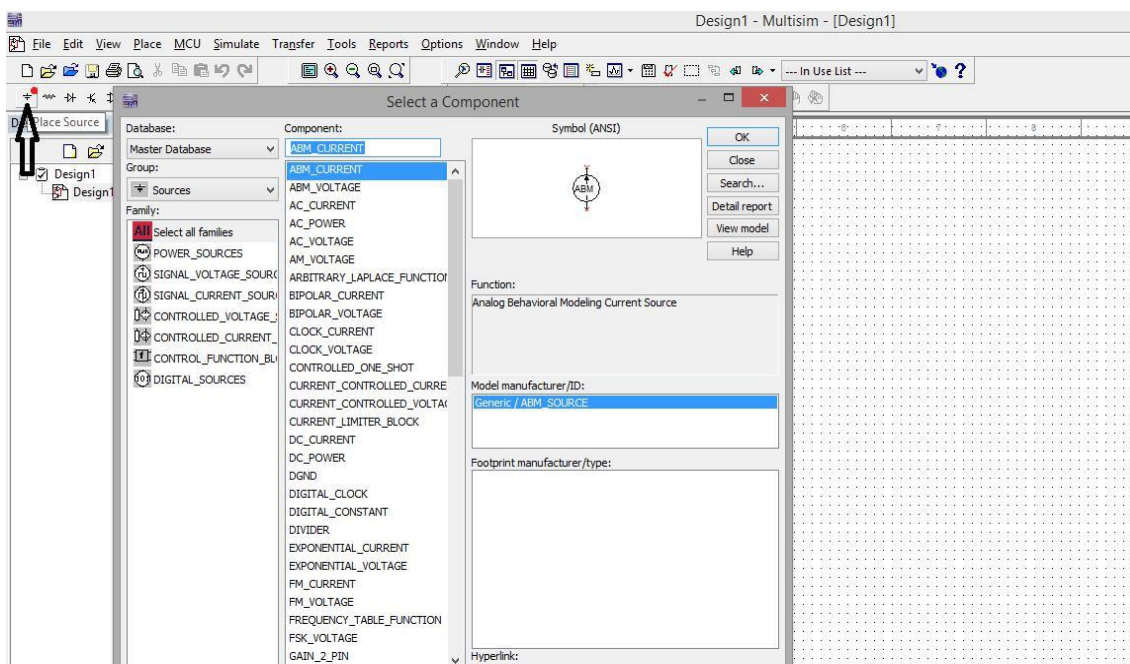


Figura 10 - Tipos de fonte do *Multisim*.

Ao utilizarmos a ferramenta apontada pela seta na Figura 11, podemos ter acesso a quaisquer tipos de resistores, capacitores, chaves controladas, transformadores lineares e não lineares, potenciômetros, entre outros.

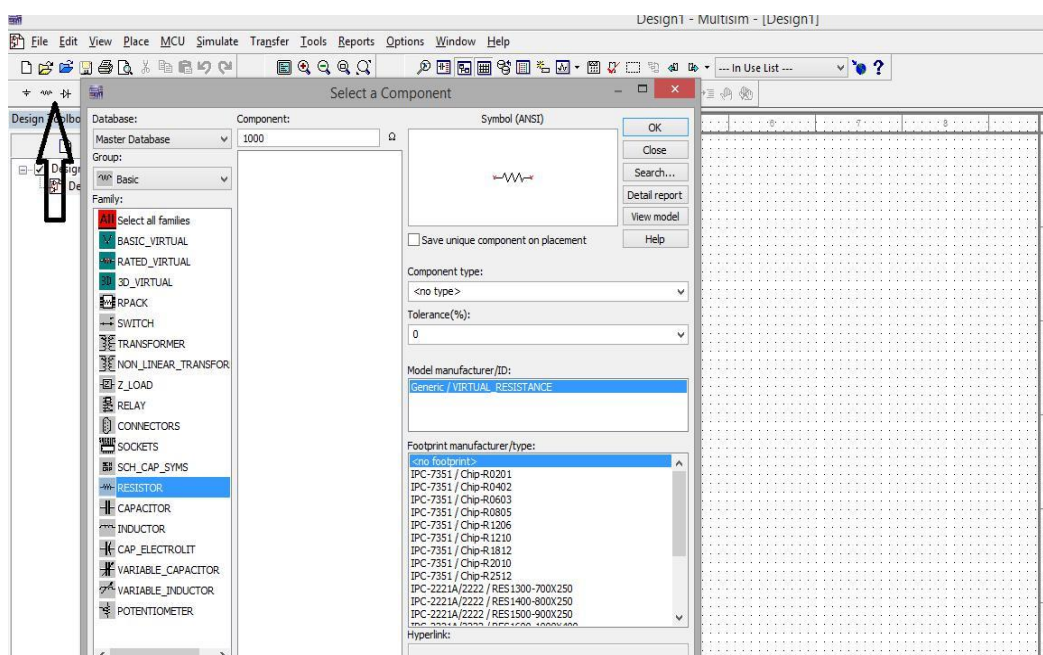


Figura 11- Ferramentas do *Multisim*.

5.4 Modelagem e Implementação do *Flicker*

O modo mais simples de emular a fonte de *flicker* é usar um controle para o chaveamento da carga, ou seja, nada mais do que ligar e desligar a mesma em intervalos pré-determinados. Com P e Q relativamente estáveis, podemos obter o *flicker* com a precisão requerida. O controle para o chaveamento é definido pela posição *ON* e *OFF* do elemento que representa uma chave no *software Multisim*.

Na Figura 12, apresenta-se a configuração do circuito elétrico empregado para gerar a situação *flicker* nesta pesquisa. Já na Figura 13, tem-se esta topologia da Figura 12 representada via o *software Multisim*.

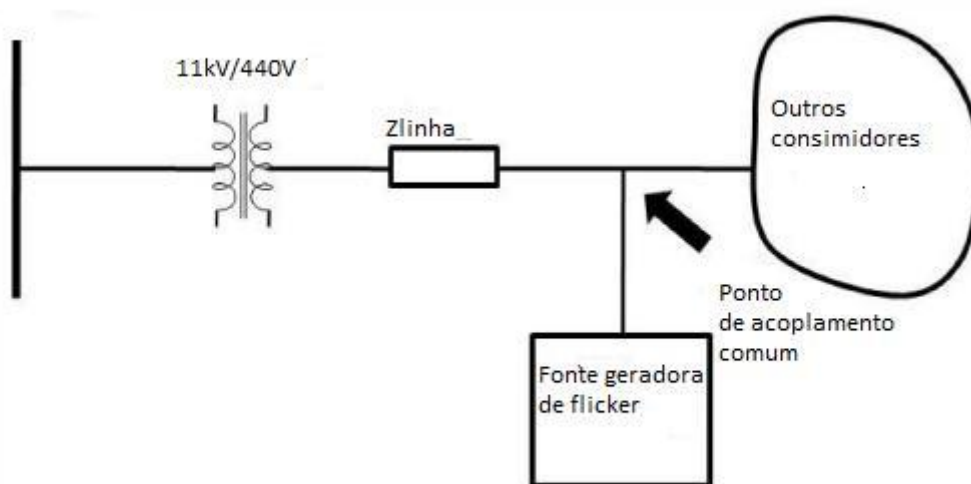


Figura 12- Gerador de *flicker*. Fonte Virulkar e Aware [6].

Na Figura 13, tem-se que R_{carga} representa os outros consumidores que estão sendo afetados pelo *flicker*, R_{lx} e L_{lx} (onde x é igual a 1, 2 e 3) representam a impedância da linha (Z_{linha}) e R_{on1} e L_{on1} e R_{off} e L_{off} representam os valores do gerador de *flicker* quando a chave está ligada e desligada, respectivamente. Ou seja, R_{on} e L_{on} representam os valores de resistência e indutância para o momento que temos a máquina de solda ligada, e, conseqüentemente, teremos o efeito do *flicker*. E R_{off} e L_{off} são valores para a máquina de solda desligada, e com isso, não teremos alteração nas formas de onda da nossa carga. Os valores de R_{on} , R_{off} , L_{on} e L_{off} foram considerados como apresentado em [6]. Para R_I e L_I foram considerados 100 ohms e 20 microhenrys e para carga 100 ohms.

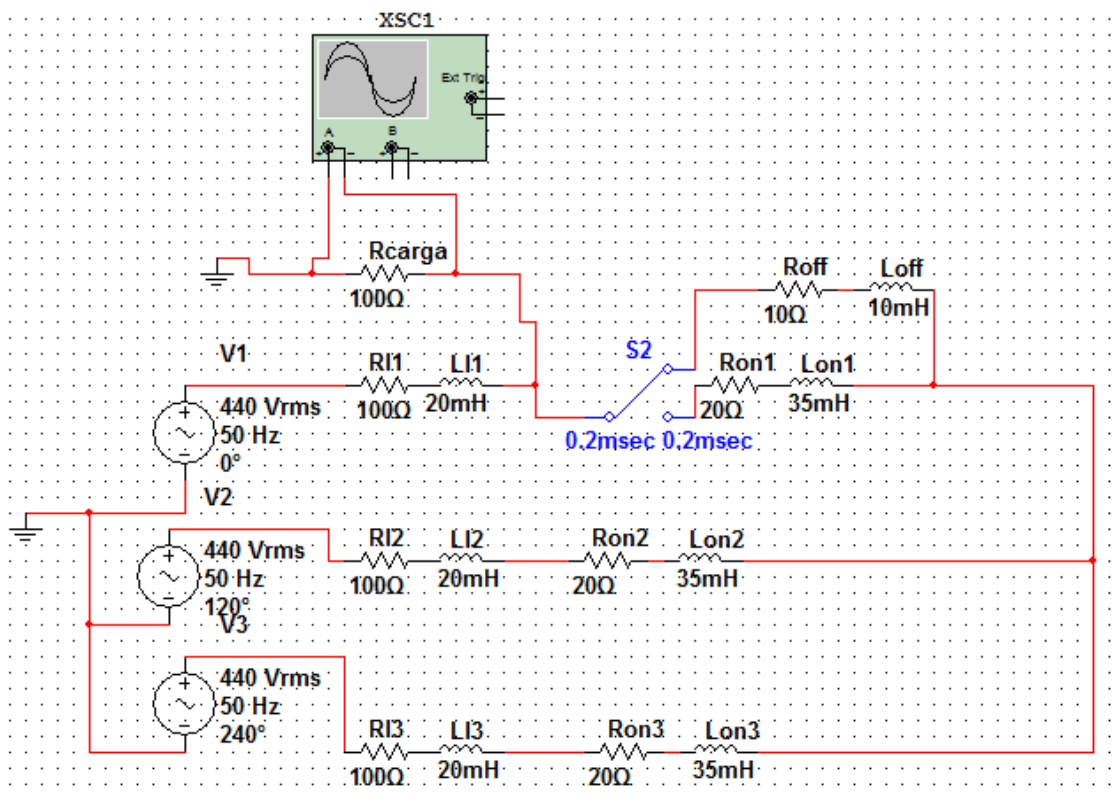


Figura 13- Circuito gerador de *flicker*.

5.4.1 Simulações de *Flicker* Cíclico

Nesta seção, o circuito descrito na Figura 13, com diferentes instantes de chaveamento foi simulado via o *software Multisim*.

A Figura 14 traz a simulação considerando um instante de chaveamento a 0,02s.

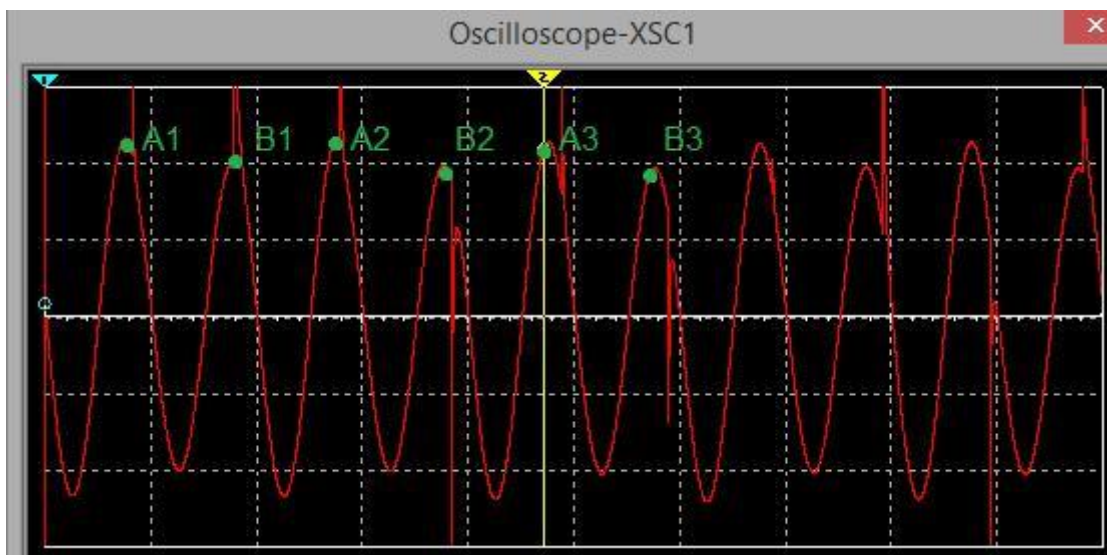


Figura 14 - Formas de onda para um chaveamento a 0,02 segundos.

Desconsiderando os transitórios ocorridos devido ao chaveamento, tem-se que os valores das tensões médias medidas no PAC e representadas pelos pontos A1, A2 e A3 na Figura 14 foram de 131 V, referentes a chave desligada. Já para os pontos B1, B2 e B3, este valor ficou em 109 V.

A Figura 15 traz a simulação considerando um instante de chaveamento a 0,04s.

Para este instante de chaveamento, tem-se que a média da tensão de pico de A1 e A2 foi de 131 V e de B1 e B2 foi de 111 V.

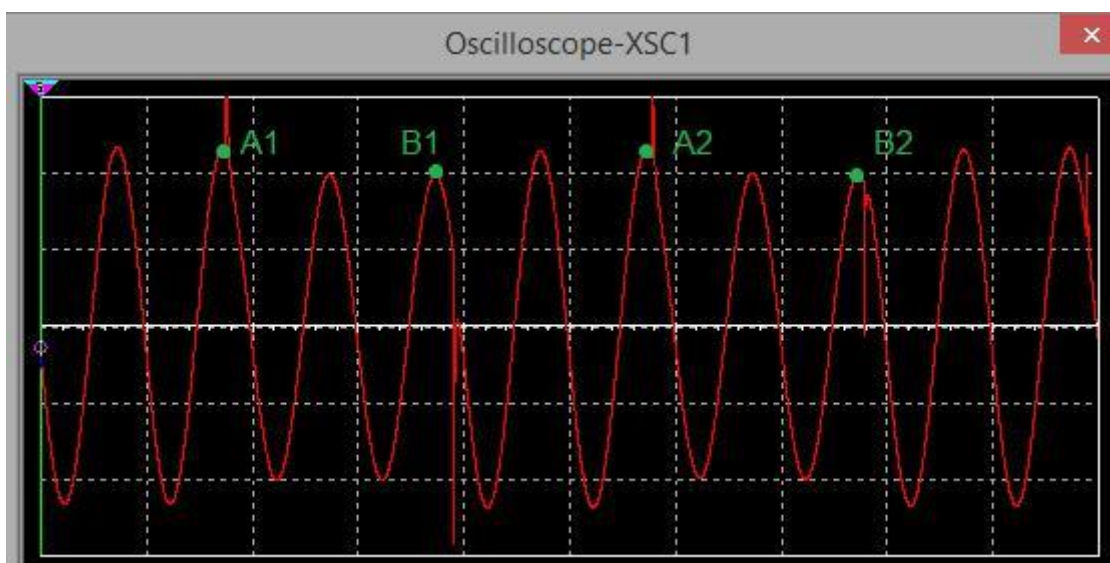


Figura 15 - Formas de onda para um chaveamento a 0,04 segundos.

A Figura 16 traz a simulação considerando um instante de chaveamento a 0,06s.

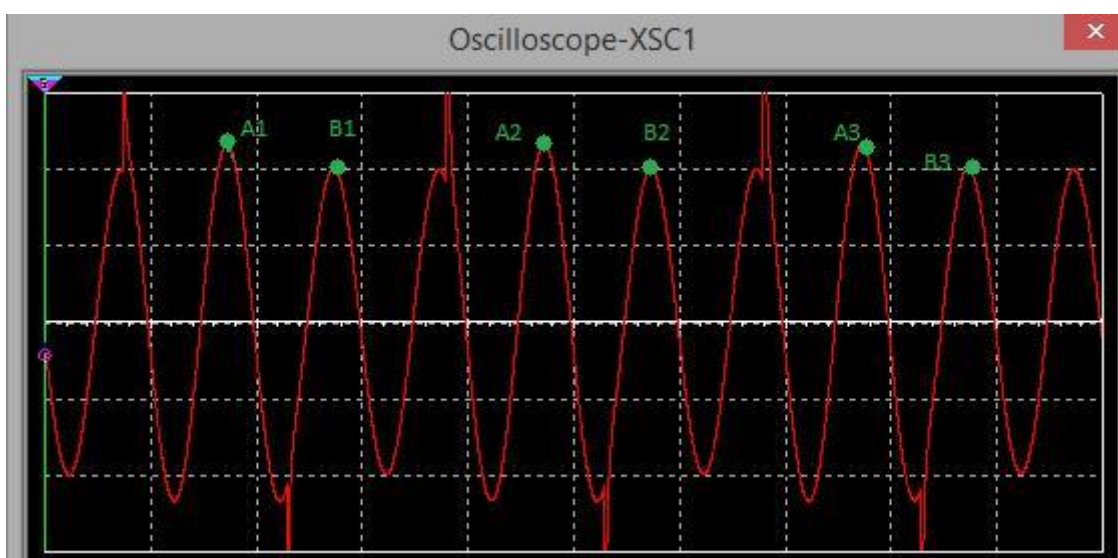


Figura 16- Formas de onda para um chaveamento a 0,06 segundos.

Observa-se que nos pontos A1, A2 e A3 tem-se uma tensão de pico média de 130 V, referente a chave desligada. Já nos pontos B1, B2 e B3 a tensão é de 114 V. Podemos então observar um *flicker* cíclico.

A seguir, na Figura 17, têm-se as formas de onda para um a chaveamento a 0,08s.

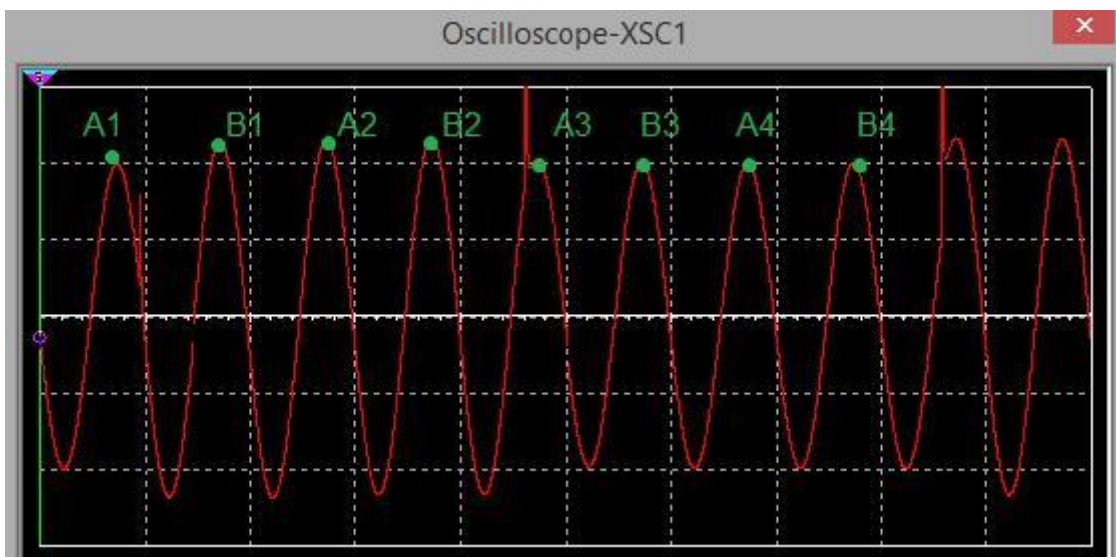


Figura 17- Formas de onda para um chaveamento a 0,08 segundos.

Podemos observar que a média da tensão nos pontos em que a chave está *off* é de 130 V. Já na posição de ligada (*on*) este valor é de 116 V.

Na última simulação cíclica, tem-se o chaveamento a 0,1s (Figura 18).

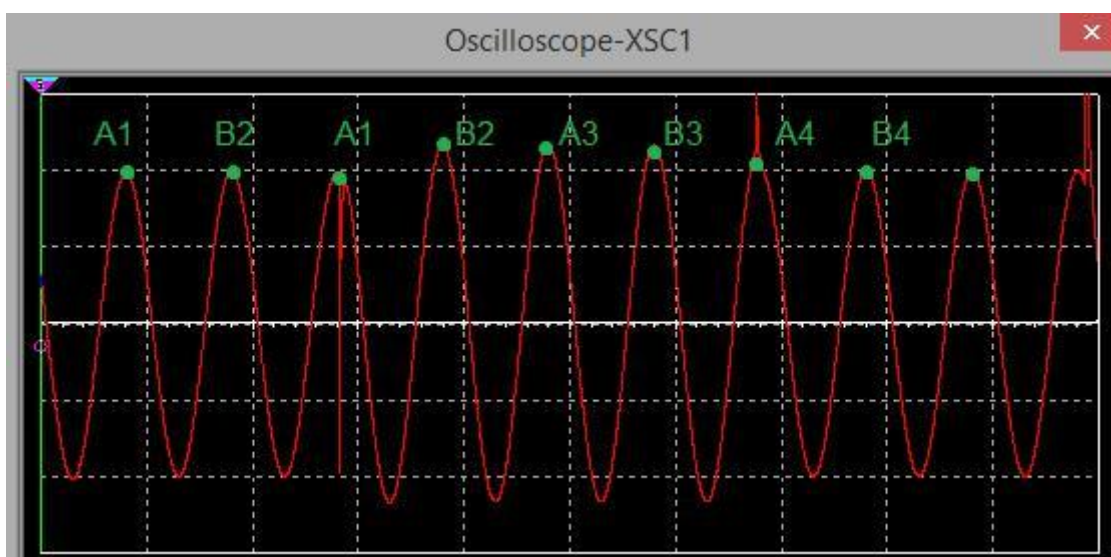


Figura 18 - Formas de onda para um chaveamento a 0,10 segundos.

Pela Figura 18, percebe-se as respectivas médias de 130 V e 117,5 V para as posições de *off* e *on* da chave.

Das situações apresentadas (Figuras de 14 à 18), infere-se então que quanto menor for o instante de chaveamento, maior será a intensidade do *flicker*.

A Tabela 6 sumariza esta diferença.

Tabela 6 - Variação da tensão em função do instante de chaveamento.

Chaveamento	Voff (V)	Von(V)	Variação (%)
0,02s	131	109	16,8
0,04s	131	111	15,3
0,06s	130	114	12,3
0,08s	130	116	10,8
0,10s	130	117,5	9,6

A partir dos resultados obtidos, foi notado que com uma variação constante da carga, o *flicker* apresenta um comportamento periódico, ou seja, o mesmo apresenta intervalos regulares em sua variação. Logo o *flicker* pode ser definido como cíclico.

6. Cálculo da Potência e Indicadores

Após se obter os valores de tensão e as formas de onda caracterizando a flutuação de tensão e, em consequência, o *flicker*, pode-se analisar o comportamento da potência mediante aos diferentes instantes de chaveamento.

A Tabela 7 mostra os valores de tensão encontrados com a chave na posição “on” e “off” para o instante de chaveamento de 0,02s, a potência na carga esperada sem o *flicker*, a potência encontrada com o *flicker* e a diferença percentual entre as mesmas.

Tabela 7 - Relação das potências para o instante de chaveamento de 0,02s.

Valores encontrados (V pico)	Potência esperada sem o <i>flicker</i> (W)	Potência encontrada com o <i>flicker</i> (W)	Diferença percentual	
131,20	86,32	86,58	-0,30%	
108,40	86,32	59,10	31,53%	
131,40	86,32	86,85	-0,61%	
108,30	86,32	59,00	31,65%	
130,60	86,32	85,79	0,61%	
109,10	86,32	59,87	30,64%	
130,90	86,32	86,19	0,15%	
109,40	86,32	60,20	30,26%	
131,20	86,32	86,58	-0,30%	
109,00	86,32	59,76	30,77%	
Média	119,95	86,32	72,99	15,44%

Já a Tabela 8 mostra as mesmas variáveis para o instante de chaveamento de 0,04s.

Tabela 8 - Relação das potências para o instante de chaveamento de 0,04s.

Valores encontrados (V pico)	Potência esperada sem o flicker (W)	Potência encontrada com o flicker (W)	Diferença percentual	
131,30	86,32	86,71	-0,45%	
112,10	86,32	63,21	26,77%	
131,20	86,32	86,58	-0,30%	
111,30	86,32	62,31	27,81%	
130,60	86,32	85,79	0,61%	
110,75	86,32	61,69	28,53%	
130,70	86,32	85,92	0,46%	
110,90	86,32	61,86	28,33%	
131,10	86,32	86,45	-0,15%	
111,10	86,32	62,09	28,07%	
Média	121,105	86,32	74,26	13,97%

Já a Tabela 9 para o instante de chaveamento de 0,06s.

Tabela 9 - Relação das potências para o instante de chaveamento de 0,06s.

Valores encontrados (pico) V	Potência esperada sem o flicker (W)	Potência encontrada com o flicker (W)	Diferença percentual
130,30	86,32	85,40	1,07%
114,50	86,32	65,94	23,60%
129,40	86,32	84,22	2,43%
113,30	86,32	64,57	25,20%
129,80	86,32	84,74	1,83%
115,00	86,32	66,52	22,94%
130,30	86,32	85,40	1,07%
113,90	86,32	65,25	24,40%

	130,00	86,32	85,01	1,52%
	114,20	86,32	65,60	24,00%
Média	122,07	86,32	75,27	12,80%

Seguindo a mesma linha de apresentação, tem-se a Tabela 10 para o instante de chaveamento de 0,08s.

Tabela 10 - Relação das potências para o instante de chaveamento de 0,08s.

Valores encontrados (pico) V	Potência esperada sem o flicker (W)	Potência encontrada com o flicker (W)	Diferença percentual	
130,00	86,32	85,01	1,52%	
116,10	86,32	67,80	21,45%	
130,60	86,32	85,79	0,61%	
116,40	86,32	68,15	21,05%	
129,90	86,32	84,88	1,67%	
115,80	86,32	67,45	21,86%	
129,70	86,32	84,61	1,98%	
116,00	86,32	67,68	21,59%	
130,10	86,32	85,14	1,37%	
115,60	86,32	67,22	22,13%	
Média	123,02	86,32	76,37	11,52%

E para finalizar a sequência de apresentação, tem-se a Tabela 11 para o instante de chaveamento de 0,10s.

Tabela 11 - Relação das potências para o instante de chaveamento de 0,10s.

	Valores encontrados (pico) V	Potência esperada sem o flicker (W)	Potência encontrada com o flicker (W)	Diferença percentual
	130,10	86,32	85,14	1,37%
	118,00	86,32	70,04	18,86%
	130,40	86,32	85,53	0,91%
	117,40	86,32	69,33	19,68%
	129,90	86,32	84,88	1,67%
	117,40	86,32	69,33	19,68%
	130,10	86,32	85,14	1,37%
	117,30	86,32	69,21	19,82%
	130,30	86,32	85,40	1,07%
	117,40	86,32	69,33	19,68%
Média	123,83	86,32	77,33	10,41%

A partir desses valores é possível observar que quanto maior o tempo de chaveamento, menor será a redução no valor médio da tensão e, conseqüentemente, da potência.

No capítulo 3, foi mostrado quais são os indicadores utilizados para o cálculo da severidade do flicker. Nessa seção vamos mostrar como calcular tais indicadores e quais os recursos são necessários para os mesmos.

Para o cálculo do Pst (severidade de curta duração) é necessário se utilizar da equação 15 [5]:

$$Pst = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}} \quad (15)$$

Onde:

Pi (i = 0,1; 1; 3; 10; 50) é o nível de sensação da cintilação que foi ultrapassado durante i % do tempo. Este é obtido a partir da função de distribuição acumulada complementar, segundo o procedimento estabelecido nas normas da IEC

61000-4-15.

Como a função acumulada complementar não é fornecida sem a sua aquisição oficial por parte da IEC, apenas será comentado como são feitos os cálculos dos indicadores relativos às situações anteriormente ilustradas.

Complementarmente, o *Plt* (severidade de longa duração), é representado por 12 valores consecutivos do *Pst*, calculado pela equação 16.

$$Plt = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (Psti)^3} \quad (16)$$

Segundo as normas, o indicador *Pst* representa níveis de cintilação luminosa que são verificados em um período de 10 minutos. Assim, com 12 medições desse indicador se consegue os níveis de cintilação luminosa referentes a um período de 2 horas.

Ao final de 24 horas de medição, os valores encontrados levarão ao *PstD95%*, que representa o valor diário do indicador *Pst* que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de 24 h. De modo semelhante, se obtém ao longo de uma semana de registro os valores de *Plt*, no qual é conduzido ao valor do *PltS95%*, que representa o valor semanal do *Plt* que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos em um período de 24h [5].

Para a avaliação do desempenho, a Tabela 2 anteriormente apresentada nos fornece quais são os valores adequados de *PstD95%* e *PltD95%* referentes ao barramento no qual está sendo feito a medição. Caso os valores não atendam as especificações da mesma, agentes responsáveis devem acompanhar e/ou corrigir as situações operacionais encontradas [5].

7. Conclusão

Este trabalho primeiramente apresentou uma base teórica para o tema atrelado à flutuação de tensão, dentro do contexto da qualidade de energia elétrica. Após essa introdução foi desenvolvida uma pesquisa acerca das normas e regulamentações técnicas nacionais e internacionais sobre o assunto. A seguir realizou-se um estudo investigativo dos principais estudos realizados no exterior no contexto delineado para a pesquisa.

Na sequência foi realizada a modelagem de um gerador de *flicker* de um sistema composto por uma carga resistiva, uma carga representando um sistema de distribuição e outra carga variável representando uma máquina de solda, bem como os instantes de chaveamento da mesma sobre o sistema em análise. Para tal simulação foi utilizado o *software Multisim*, verificando-se por meio deste que é possível gerar vários tipos de *flicker*, com diferentes variações de potência.

Pelos estudos realizados, bem como pelos resultados obtidos das simulações computacionais implementadas, conclui-se que este estudo inicial forneceu uma boa alternativa para a geração do *flicker* e análise dos diferentes níveis de severidades manifestados.

Em suma, esse trabalho de conclusão de curso ajudou ao aluno obter maior compreensão e senso crítico sobre certas análises pertinentes aos sistemas elétricos de potência no contexto da qualidade da energia elétrica. Os conhecimentos adquiridos nas matérias Análise Estática e Qualidade da Energia no decorrer do seu curso de graduação auxiliaram na construção deste trabalho de conclusão de curso. As dificuldades encontradas foram na obtenção das normas e textos técnico-científicos que abordam o assunto com maior profundidade. Visto que, grande parte do material necessário, carece de uma aquisição comercial e que seria onerosa para o âmbito desta pesquisa. Como continuidade da pesquisa, sugere-se a aquisição das normas referências neste trabalho, e na sequência, o cálculo dos indicadores anteriormente apontados.

Referências Bibliográficas

[1] DUGAN, R.C; McGRANAGHAN, M.F; BEATY, H.W., “Electrical Power Systems Quality.,” 3ed. New York, 2012. Editora McGraw-Hill. ISBN-10-0071761551.

[2] YANG, X.X.; KRATZ, M., "Power System Flicker Analysis by RMS Voltage Values and Numeric Flicker Meter Emulation," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol.24, no.3, pp.1310, 1318, July 2009.

[3] IEEE STANDARD P1789, A Review of the Literature on Light Flicker: Ergonomics, Biological Attributes, Potential Health Effects, and Methods in Which Some LED Lighting May Introduce Flicker. Disponível em: <http://grouper.iee.org/groups/1789/> Acesso em: 02 dez. 2014.

[4] YANG, X.X.; KRATZ, M., “Power System Flicker Analysis and Numeric Flicker Meter Emulation,” Power Tech, 2007 IEEE Lausanne, pp.1534, 1539, July 2007.

[5] ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8.** Resolução Normativa nº 469/2011, p. 23-26. 2014. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=82>. Acesso em: Dezembro 2014.

[6] VIRULKAR, V.B; AWARE, M.V., “Power System Flicker Analysis, Modeling and Prototype Implementation,” DOI: 10.1109/IECON.2012.6389130 Conference: IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society.

[7] McDERMOTT, T., “Voltage Fluctuation Impacts,” IEEE P1547.7, September 2, 2009.

[8] ELNALDY, A; LIU, Y.F., “A Practical Solution for the Current and Voltage Fluctuation in Power Systems,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 27, no.3, pp. 1349, 1359, July 2012.

[9] BUCCI, G; FIORUCCI, E; CIANCETTA, F., “The Performance Evaluation of IEC Flicker Meters in Realistic Conditions,” IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008.

[10] EN 61000-4-15, "Flicker Meter-Functional and Design Specifications", 2003-01.

[11] LARSSON; A., "Flicker Emission of Wind Turbine During Continuous Operation," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 17 1, Mar. 2002.

[12] LAVERS, J.D; BIRINGER, P. P., "Real-Time Measurement of Electric Arc-Furnace Disturbances and Parameter Variations," IEEE Transactions on Industry and Applications, vol. 1A-22, JUL./AGO. 1986.

[13] DELGADILLO, A; BUITRAGO, L; PAVAS, A; URRUTIA, D.F; CAJAMARCA, G; GALLEGO, L; TORRES, H., "Impact of the Interruptions of Long and Short Duration in the Value of the Pst Indicator" IEEE.18-22 Jun. 2006.

[14] NATIONAL INSTRUMENTS, Softwares de Aplicação. NI Multisim. Disponível em: <http://www.ni.com/multisim/try/pt/>. Acesso em: dez. 2014.