



**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia de Energia**

**Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica em uma
Edificação Eficiente**

**Autor: Allan Luis Augusto Redes de Oliveira
Orientador: Loana Nunes Velasco**

**Brasília, DF
2015**



Allan Luis Augusto Redes de Oliveira

Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica em uma Edificação Eficiente

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Dra. Loana Nunes Velasco

Co-Orientador: Dr. Jorge Andrés Cormane Angarita

**Brasília, DF
2015**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

Oliveira, Allan Luis Augusto Redes de.

Avaliação da Qualidade de Energia em uma Edificação Eficiente /Allan Luis Augusto Redes de Oliveira. Brasília: UnB, 2015. 103 p.37: il.; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade de Brasília
Faculdade do Gama, Brasília, 2015. Orientação: Loana Nunes Velasco

1. Qualidade da energia elétrica. 2. Eficiência energética. 3. Distorção harmônica I. Velasco, Loana. II. Dra.

CDU Classificação



Avaliação da Qualidade de Energia em uma Edificação Eficiente

Allan Oliveira

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 04/12/15 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof^a. Dra.: Loana Nunes Velasco, UnB/ FGA
Orientador

Prof. Dr.: Flávio Henrique Justiniano Ribeiro da Silva, UnB/ FGA
Membro Convidado

Prof.Dr.: Alex Reis, UnB/ FGA
Membro Convidado

Brasília, DF
2015

Dedico este trabalho aos meus pais, Lourdes e Douglas, pelo apoio e dedicação. E aos meus irmãos, pelos momentos de descontração.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Lourdes e Douglas, e aos meus irmãos, Aryadne e Douglas Júnior, por todo apoio e incentivo durante toda a minha graduação.

A Professora Loana Nunes Velasco, por dedicar o seu tempo em função da minha aprendizagem.

Ao Professor Jorge Andrés Cormane Angarita, por aceitar a me co-orientar neste trabalho.

E aos meus amigos e todos os professores que contribuíram de alguma forma para minha formação.

“A persistência é o caminho do êxito”.
Charles Chaplin.

RESUMO

Com o crescimento do interesse pelo uso racional de energia elétrica através de programas de eficiência energética, tem se cada vez mais, substituindo as cargas existentes por cargas mais eficientes, diminuindo as perdas e, conseqüentemente o consumo de energia, contudo pouco se tem falado do impacto dessas cargas no sistema no que tange a qualidade da energia elétrica. A preocupação com a qualidade do fornecimento da energia elétrica é uma questão que vem se destacando cada vez mais nos últimos anos, sobretudo devido a combinação de fatores como: um maior esclarecimento por parte dos consumidores; a grande utilização de equipamentos eletroeletrônicos nas residências, comércios e indústrias e o aumento da sensibilidade dos mesmos frente aos desvios da tensão de alimentação em relação ao padrão esperado como ideal. Tais fenômenos, dependendo de sua severidade, podem acarretar sérios danos, provocando desde a queima de eletrodomésticos até reflexos econômicos devido a paradas das linhas de produção industrial. Nesse sentido, este trabalho se propõe a analisar os parâmetros da qualidade de energia elétrica em uma instalação eficiente, realizando medições em cargas novas e antigas e comparando o seu desempenho, buscando na literatura os fatores que afetam a qualidade da energia e propondo uma metodologia para analisar esses parâmetros.

Palavras-chave: Qualidade da energia elétrica. Eficiência energética. Distorção harmônica.

ABSTRACT

With the growth of interest in the rational use of electricity through energy efficiency programs, has become increasingly replacing existing loads for more efficient loads, reducing losses and consequently energy consumption, however little has been said of the impact of these loads in the system regarding the power quality. Concern about the quality of electricity supply is an issue that has stood out increasingly in recent years, mainly due to combination of factors such as: further clarification from consumers; the wide use of electronic equipment in homes, businesses and industries and increasing the sensitivity thereof facing the supply voltage deviations from the standard expected as ideal. Such phenomena, depending on its severity, can cause serious damage, resulting from the burning of household appliances even economic consequences due to shutdowns of industrial production lines. Thus, this study aims to analyze the parameters of the power quality in an efficient building, performing measurements on new and old loads and comparing its performance, searching the literature the factors that affect power quality and proposing a methodology for analyze these parameters.

Keywords: Power quality. Energy efficiency. Harmonic distortion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de etiqueta.....	19
Figura 2: Faixas de tensão em relação à de referência.....	21
Figura 3: Arranjo experimental.	28
Figura 4: Analisador da Qualidade de Energia.	29
Figura 5: Modelos das lâmpadas. (A) Fluorescente tubular. (B) Fluorescente compacta.	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Influência do DHTi no acréscimo de corrente e na redução do fator de potência.....	26
Tabela 2: Levantamento das cargas da Faculdade UnB Gama.....	30
Tabela 3: Equivalência lâmpada 16 w e lâmpada LED.....	32
Tabela 4: Equivalência lâmpada 32 w e lâmpada LED.....	32
Tabela 5: Equivalência lâmpada 36 w e lâmpada LED.....	32
Tabela 6: Potência instalada após substituição proposta.....	33

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	-	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	-	Alternative Transients Program
Eletrobrás	-	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
INMETRO	-	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
LED	-	Light Emitter Diode
MME	-	Ministério de Minas e Energia
PBE	-	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PROCEL	-	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PRODIST	-	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
VTCD	-	Varição de Tensão de Curta Duração

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.1 Objetivos Específicos	15
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 O USO RACIONAL DA ENERGIA ELÉTRICA.....	17
2.1.1 Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE.....	18
2.1.2 Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL.....	19
2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS DISTÚRBIOS DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	20
2.2.1 Tensão em regime permanente.....	21
2.2.2 Fator de Potência	22
2.2.3 Harmônico	23
2.2.4 Desequilíbrio de Tensão.....	24
2.2.5 Flutuação de Tensão.....	24
2.2.6 Variação de Tensão de Curta Duração	25
2.2.7 Variação de Frequência	25
2.3 EFEITO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA	26
3. METODOLOGIA	28
3.1 PROCEDIMENTO LABORATORIAL	28
3.2 MODELAGEM COMPUTACIONAL.....	29
4. RESULTADOS	30
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	34
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35

1. INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos têm se mostrado eficazes em diversas áreas, desde as aplicações aeroespaciais até o entretenimento. Muitos desses avanços são de responsabilidade da Eletrônica de Potência. Porém, é necessário levar em consideração como e quanto esse avanço tecnológico pode estar influenciando na geração, na transmissão, na distribuição e no consumo da energia elétrica.

A maioria dos equipamentos eletrônicos são providos de fontes chaveadas, mesmo sendo eles alimentados diretamente na rede elétrica de corrente alternada, no interior dos mesmos a corrente e a tensão que circulam são adaptadas às suas necessidades. Ao alterar a forma de onda da tensão e da corrente, esses equipamentos provocam na rede de corrente alternada distorções harmônicas de corrente e, em consequência, distorções harmônicas de tensões. Porém, os equipamentos responsáveis por tais distúrbios na rede são extremamente sensíveis aos mesmos, podendo atuar de forma indesejada, ou não funcionarem, caso a energia elétrica fornecida não seja de boa qualidade (VELASCO, 2007).

O termo “Qualidade de Energia” é amplamente divulgado, discutido e estudado, sendo que os principais causadores dos distúrbios na qualidade têm sido investigados, assim como as consequências desses distúrbios e as diversas técnicas para mitigá-los. A falta de energia ou sua qualidade inadequada ao funcionamento dos equipamentos elétricos pode ocasionar perdas, que podem gerar prejuízos econômicos para os consumidores e concessionárias. Cada um dos fenômenos tratados na qualidade da energia elétrica, sejam classificados como qualidade dos serviços prestados ou qualidade do produto (relacionado à forma de onda), provoca efeitos sobre equipamentos e consumidores (CRUZ, 2007).

Devido às grandes transformações das cargas instaladas nos consumidores e a preocupação cada vez mais acentuada pela qualidade de energia elétrica, agências reguladoras no mundo inteiro vêm lançando normas e resoluções de forma a regulamentar os indicadores de qualidade deste produto. No Brasil, foi criado pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, o Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST, responsável por estabelecer os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço.

Há alguns anos atrás quando se falava em qualidade de energia preocupava-

se com a continuidade do serviço. Se a energia fosse entregue de forma que os desligamentos fossem os menores possíveis, considerava-se uma distribuição de energia de qualidade, mas à medida que tais consumidores tornam-se mais sofisticados sob o ponto de vista tecnológico, outros fatores começam a ser considerados. Atualmente, entende-se por energia elétrica de boa qualidade, uma energia entregue de forma ininterrupta, com frequência estável, formas de onda senoidais compatíveis com as instalações elétricas e sistemas elétricos de distribuição (MEHL, 2013; VELASCO, 2007).

Segundo Dugan *et al*, existem quatro razões principais que contribuem para a crescente preocupação com a qualidade da energia:

1. Os novos equipamentos elétricos estão mais sensíveis às variações da qualidade da energia do que os equipamentos usados no passado.
2. A crescente ênfase na melhoria da eficiência dos sistemas de potência com objetivo de obter ganhos de produtividade contribui com suas ações para aumentar os níveis de harmônicas nos sistemas de potência.
3. A crescente conscientização dos usuários finais de energia elétrica a respeito dos problemas relacionados com a qualidade da energia.
4. Muitos sistemas estão interconectados em rede. Uma falha em qualquer componente nestes processos integrados tem uma consequência muito mais importante do que nos sistemas isolados.

Após as crises do petróleo na década de 1970, o uso racional de energia passou a ser encarado como uma opção vantajosa, com isso, começou a se falar em redução do consumo de energia, aplicada à mudança de hábitos de pessoas e indústrias, mas nesta época relacionado não só a diminuição do consumo como à perda de conforto. Com o passar do tempo o avanço tecnológico proporcionou equipamentos cada vez mais eficientes e o conceito de eficiência energética passou a vigorar no cotidiano (OLIVEIRA, 2009).

No que tange ao uso racional de energia elétrica, para se combater os desperdícios pode-se atuar na conscientização e educação do consumidor e na melhoria do rendimento de equipamento, sistemas e processos. No Brasil, uma das iniciativas foi o desenvolvimento do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - PROCEL, em 1985, que tem como objetivo principal promover o combate ao desperdício de energia elétrica, na produção e no consumo (ELETROBRÁS / PROCEL, 2006).

A constante preocupação com o uso racional da energia elétrica afeta a qualidade deste produto, pois com um maior interesse na eficiência dos sistemas são empregados equipamentos para redução das perdas, que, entretanto, levam a um aumento do nível de harmônicas (NUNES, 2007). Esse crescimento de cargas não lineares, aliada às exigências do novo modelo do setor elétrico brasileiro, tem contribuído para tornar mais rígidos os requisitos de qualidade para fornecimento da energia elétrica (CRUZ, 2007).

Devido ao potencial de prejuízos possíveis, fica evidente a importância de uma análise e de um diagnóstico da qualidade da energia elétrica, com o objetivo de determinar as causas e as consequências dos fenômenos que afetam a qualidade de energia do sistema, além de apresentar medidas técnicas e economicamente viáveis para solucionar o problema.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é analisar os parâmetros de qualidade de energia elétrica em uma edificação eficiente, utilizando para tal as orientações do Módulo 8, nas instalações elétricas da Faculdade de Engenharia UnB Gama.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Realizar um levantamento das principais cargas encontradas nas instalações da Faculdade UnB Gama;
- Propor uma metodologia para análise dos indicadores de qualidade de energia;
- Comparar o desempenho entre as cargas atuais e as novas cargas, mais eficientes.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

- Introdução: apresenta uma visão geral do trabalho, onde se aborda as razões para o desenvolvimento da pesquisa e os objetivos gerais e específicos do trabalho.
- Referencial teórico: apresenta-se uma breve revisão da literatura sobre temas importantes para o desenvolvimento deste trabalho, tratando sobre

a conservação e racionalização da energia, os parâmetros de qualidade da energia elétrica citados no módulo 8 do PRODIST e os efeitos da conservação na qualidade da energia elétrica.

- Metodologia: trata dos procedimentos para os ensaios que serão realizados, apresentando as principais características dos equipamentos utilizados.
- Resultados: apresenta o levantamento de cargas e um estudo prévio acerca da eficiência energética devido a substituição de algumas cargas.
- Considerações finais: apresenta as principais conclusões do trabalho e os resultados que se espera obter com a continuação do mesmo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

No âmbito da engenharia, a eficiência energética e a qualidade da energia elétrica são dois temas muito recorrentes nos últimos anos.

O uso eficiente da energia tem o objetivo de eliminar desperdício através do uso racional dos insumos energéticos, com alto rendimento dos diversos sistemas de uso final dos mesmos (OLIVEIRA, 2009). No intuito de se reduzir as perdas, as cargas existentes são substituídas por cargas mais eficientes, contudo, se torna importante analisar os impactos dessas cargas no sistema no que se refere à qualidade da energia elétrica.

A qualidade da energia elétrica tem sido um assunto muito discutido, e essa crescente preocupação se deve, principalmente, por questões técnicas e econômicas. Em princípio, a questão da qualidade da energia aparece quando um equipamento alimentado pela rede elétrica deixa de funcionar como deveria (DECKMANN, 2010).

Os equipamentos elétricos, que possuem alta tecnologia, utilizados nos diversos setores da economia, são extremamente sensíveis a qualquer tipo de perturbação, ou seja, qualquer problema manifestado na tensão, corrente ou na frequência (KAGAN, 2009). Caso haja uma falta de energia durante um pequeno intervalo de tempo, chegando a menos de um segundo, todo o processo industrial pode ser alterado, podendo gerar grandes prejuízos econômicos (CRUZ, 2007).

2.1 O USO RACIONAL DA ENERGIA ELÉTRICA

Constata-se, atualmente, uma crescente preocupação com a racionalização e aumento da eficiência do uso da energia elétrica no Brasil. A eficiência no uso da energia entrou na agenda mundial a partir dos choques no preço do petróleo dos anos 1970, quando ficou claro que o uso das reservas de recursos fósseis teria custos crescentes. Com isso, se reconheceu que um mesmo serviço poderia ser obtido com menor gasto de energia e, conseqüentemente com menores impactos econômicos, ambientais, sociais e culturais (EPE, 2010; OLIVEIRA, 2009).

Equipamentos e hábitos de consumo passaram a ser analisados em termos da conservação da energia tendo sido demonstrado que, de fato, muitas iniciativas que resultam em maior eficiência energética são economicamente viáveis, ou seja, o custo de sua implantação é menor do que o custo de produzir ou adquirir a energia cujo consumo é evitado (EPE, 2010).

Dentre os benefícios que são proporcionados com o aumento da eficiência no uso da energia, pode-se citar:

- Redução ou adiamento da necessidade de investimentos em geração, transmissão e distribuição;
- Contribuição para o aumento da confiabilidade do sistema;
- Redução de custo de energia para o consumidor final.

As ações de Eficiência energética compreendem modificações ou aperfeiçoamentos tecnológicos ao longo da cadeia, mas podem também resultar de uma melhor organização, conservação e gestão energética por parte das entidades que a compõem. Em síntese, pode-se considerar que os ganhos em eficiência energética são provenientes da modernização de equipamento e processos e com os programas voltados para o consumo consciente (MME, 2011).

Existem no Brasil diversos mecanismos de promoção à eficiência energética e conservação de energia oriundos do apoio e/ou incentivo do Ministério de Minas e Energia - MME, tanto do ponto de vista de leis e decretos, que regulamentam a matéria, quanto de programas (SOUZA, 2009). Neste cenário destacam-se o Programa Brasileiro de Etiquetagem - PBE, coordenado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO, e o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica - PROCEL, cuja coordenação executiva está a cargo das Centrais Elétricas Brasileiras S.A. – Eletrobrás (EPE, 2010).

2.1.1 Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE

O Programa Brasileiro de Etiquetagem visa prover os consumidores de informações que lhes permitam avaliar o consumo de energia dos eletrodomésticos e selecionar na sua decisão de compra, aqueles de maior eficiência em relação ao consumo, possibilitando economia nos custos de energia (MME, 2011). Para isto, o PBE atua através de etiquetas informativas, com o objetivo de alertar o consumidor quanto à eficiência energética de alguns dos principais eletrodomésticos nacionais (SOUZA, 2009).

O programa estimula a melhoria contínua do desempenho dos eletrodomésticos, buscando otimizar o processo de qualidade dos mesmos (FERREIRA, 2014). A Figura (1) mostra um exemplo de etiqueta e o significado de suas informações.

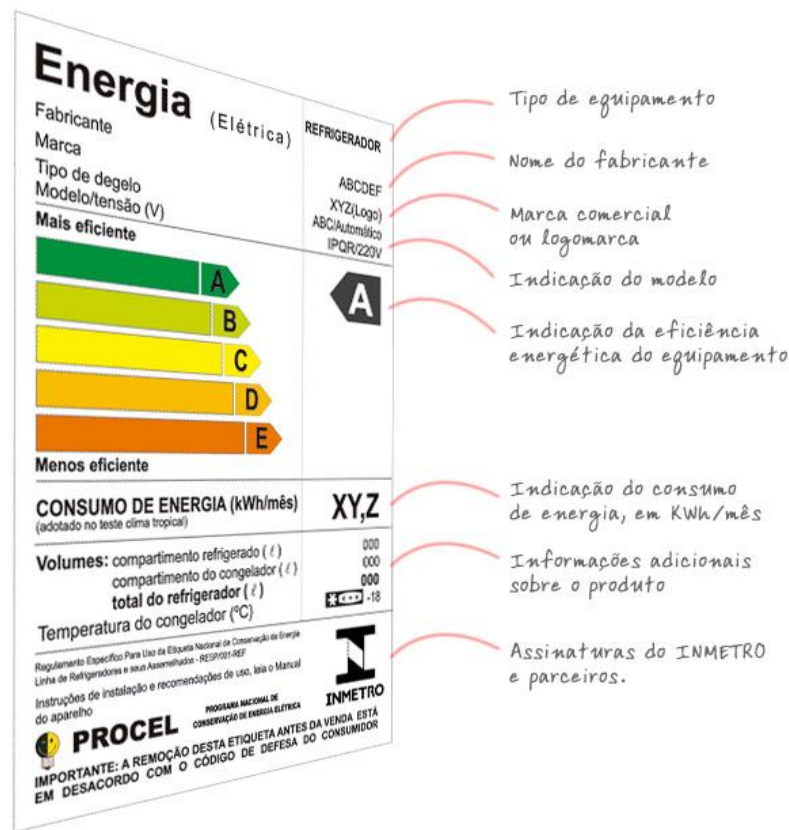


Figura 1: Exemplo de etiqueta.

2.1.2 Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL

O PROCEL é um programa do governo, criado em 1985, e tem como objetivo promover o uso eficiente da energia elétrica e combater o seu desperdício (MME, 2011). As ações do PROCEL contribuem para o aumento da eficiência dos bens e serviços, para o desenvolvimento de hábitos e conhecimentos sobre o consumo eficiente da energia.

Visto que o setor de edificações é de extrema importância no mercado de energia elétrica, representando cerca de 50% do consumo de eletricidade do País, em 2014 foi criado o PROCEL EDIFICA, que se trata de um instrumento de adesão voluntária que tem por objetivo principal identificar as edificações que apresentem as melhores classificações de eficiência energética em uma dada categoria, motivando o mercado consumidor a adquirir e utilizar imóveis mais eficientes (Site PROCEL).

2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS DISTÚRBIOS DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Antes de se determinar os parâmetros para a qualidade da energia elétrica, com o objetivo de analisar os distúrbios que afetam a qualidade deste produto, é necessário verificar quais seriam as condições ideais de operação de um sistema elétrico. Com isso, pode-se comparar as condições reais de operação com as características de um sistema ideal.

Segundo Deckmann et al (2010), um sistema elétrico trifásico ideal deve satisfazer às seguintes condições de operação em regime permanente:

- Tensões e correntes alternadas, com formas senoidais;
- Amplitudes constantes, nos valores nominais;
- Frequência constante, no valor síncrono;
- Tensões trifásicas equilibradas;

Em um sistema real não é possível satisfazer totalmente as condições ideais descritas anteriormente, pois a rede e os equipamentos elétricos estão sempre sujeitos a falhas ou perturbações que deterioram de alguma maneira as condições que seriam desejáveis para a operação.

Entretanto, as condições de operação do sistema ideal podem ser utilizadas como referência. Assim, podemos adotar como critério para avaliar a qualidade da energia elétrica o afastamento que o sistema real experimenta dessas condições ideais. Essa abordagem permite estabelecer índices que avaliam a deterioração das condições de operação, em função dos distúrbios que são impostos ao sistema (DECKMANN et al,2010).

A agência reguladora, Agência Nacional de Energia elétrica (ANEEL), no Módulo 8 do PRODIST, considera que os aspectos da qualidade do produto em regime permanente são:

- a) Tensão em regime permanente;
- b) Fator de potência;
- c) Harmônico;
- d) Desequilíbrio de tensão;
- e) Flutuação de tensão;
- f) Variações de tensão de curta duração;
- g) Variação de frequência;

Em geral, quando se fala em “Qualidade da energia” está se referindo à qualidade da tensão que está sendo suprida, pois as empresas concessionárias até o momento não têm meio para controlar a corrente que uma determinada carga absorve. Entretanto, as alterações na forma de onda das correntes que fluem pelo sistema podem causar diversos distúrbios na tensão.

2.2.1 Tensão em regime permanente

Para analisar as variações de longa duração, ou em regime permanente, deve-se lembrar que os consumidores supridos por uma barra apresentam demanda variável ao longo do dia, o que ocasionará variação na tensão da barra bem como nas demais barras do sistema. Deste modo, quando a rede não está devidamente dimensionada, podem ocorrer instantes ao longo do dia durante os quais a tensão cai abaixo dos valores aceitáveis (KAGAN, 2009).

As variações de longa duração podem ser do tipo sobretensões ou subtensões. Esses fenômenos, geralmente, não são resultados de falhas no sistema, mas são causadas pela variação de carga sobre o sistema e operação de chaveamento (DUGAN, 2003).

O termo “Conformidade de tensão elétrica” refere-se à comparação do valor de tensão obtido por medição apropriada, no ponto de conexão, em relação aos níveis de tensão especificados como adequados, precários ou críticos, baseando-se no afastamento do valor da tensão de referência (ANEEL, 2009; KAGAN, 2009). A tensão de atendimento associada às leituras deve ser classificada segundo faixas em torno da tensão de referência, conforme a Fig.(2).

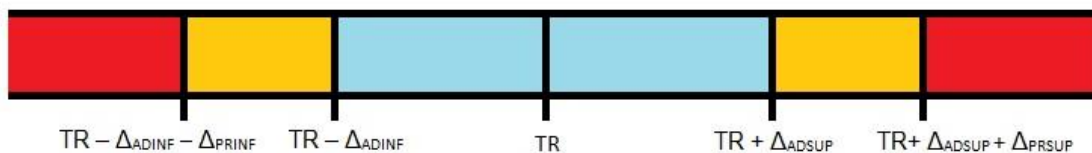


Figura 2: Faixas de tensão em relação à de referência. (ANEEL, 2009).

Onde:

- Tensão de Referência (TR);
- Faixa adequada de tensão ($TR - \Delta_{ADINF}$, $TR + \Delta_{ADSUP}$);

- Faixas precárias de tensão ($TR + \Delta_{ADSUP}$, $TR + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$ ou $TR - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$, $TR - \Delta_{ADINF}$);
- Faixas Críticas de tensão ($> TR + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$ ou $< TR - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$);

A partir de um conjunto de medições válidas, a ANEEL define:

$$DRP = \frac{nlp}{1008} 100 [\%] \quad (1)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} 100 [\%] \quad (2)$$

Onde:

- DRP: índice de duração relativa da transgressão para tensão precária;
- DRC: índice de duração relativa da transgressão para tensão crítica;
- nlp: Maior valor entre as fases do número de leituras situadas na faixa precária;
- nlc: Maior valor entre as fases do número de leituras situadas na faixa crítica;
- 1008: número de leituras válidas a cada 10 (dez) minutos no período de observação;

2.2.2 Fator de Potência

O fator de potência é a relação entre potência ativa e potência aparente, ou seja, é um fator de utilização entre a potência gerada e a efetivamente útil, assumindo valores de 0 a 1 (FERREIRA, 2014). O valor do fator de potência deve ser calculado a partir dos valores registrados das potências ativa (P) e reativa (Q), utilizando a seguinte fórmula:

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (3)$$

A ANEEL define que o controle do fator de potência deve ser efetuado por medição permanente e obrigatória no caso de unidades consumidoras atendidas pelo Sistema de Distribuição de Média Tensão (SDMT) e pelo Sistema de Distribuição de Alta Tensão (SDAT).

2.2.3 Harmônico

Um harmônico é um componente de uma onda senoidal de tensão, ou corrente, de frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental. As distorções harmônicas são fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes, sendo causada pela instalação de equipamentos e cargas não lineares no sistema de distribuição (ANEEL, 2009; VELASCO, 2007).

Uma carga não linear se caracteriza por uma relação não constante entre tensão e corrente. As cargas elétricas comandadas eletronicamente são exemplos de cargas não-lineares, que, além de contribuírem para a distorção harmônica ainda são sensíveis ao fenômeno (MEHL, 2013).

O grau de distorção harmônica pode ser quantificado matematicamente com base no estudo das ondas não senoidais periódicas, viabilizada por meio da série de Fourier.

Conhecidos os valores de tensões ou correntes harmônicas presentes no sistema, utiliza-se de procedimentos quantitativos para expressar a influência do conteúdo harmônico em uma forma de onda (VELASCO, 2007). Um dos mais utilizados é a “Distorção Harmônica Total”, a qual pode ser empregada tanto para sinais de tensões como para correntes, conforme as equações abaixo, respectivamente:

- Distorção Harmônica de Tensão Total (DHTV)

$$DHTV = \sqrt{\frac{\sum_{h>1}^{hmax} V_h^2}{V_1^2}} 100\% \quad (4)$$

- Distorção Harmônica de Corrente Total (DHTI)

$$DHTI = \sqrt{\frac{\sum_{h>1}^{hmax} I_h^2}{I_1^2}} 100\% \quad (5)$$

Onde:

- V_h : Tensão harmônica de ordem h ;
- V_1 : Tensão fundamental medida;
- I_h : Corrente harmônica de ordem h ;
- I_1 : Corrente fundamental medida;
- h : Ordem da componente harmônica;

2.2.4 Desequilíbrio de Tensão

A grande maioria das cargas nos consumidores residenciais e comerciais dificilmente apresenta carregamentos iguais nas três fases, ou seja, a rede irá suprir uma demanda desequilibrada, gerando um desequilíbrio nas tensões (KAGAN, 2009). A ANEEL define que o desequilíbrio de tensão é o fenômeno associada a alteração dos padrões trifásicos do sistema de distribuição

Existem vários fatores que podem vir a gerar desequilíbrios nas tensões, sendo que os mais usuais são:

- Cargas monofásicas em um circuito trifásico;
- Linhas aéreas de transmissão com disposição física assimétrica e sem transposição;
- Conexões de transformadores;
- Fornos elétricos trifásicos a arco;
- Distorção Harmônica.

A expressão para o cálculo do desequilíbrio de tensão é:

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (6)$$

Sendo,

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (7)$$

Onde:

- FD: Fator de desequilíbrio
- V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} : módulo das tensões de linha

2.2.5 Flutuação de Tensão

As flutuações de tensão correspondem a variações sistemáticas dos valores eficazes da tensão de suprimento. Essas flutuações ocorrem quando a rede não está devidamente dimensionada e não suporta a variação da carga (DUGAN, 2003).

Um dos principais efeitos nos sistemas elétricos devido as oscilações de tensão é o fenômeno de cintilação luminosa, ou efeito *flicker*, que é basicamente

constatado através da impressão visual resultante das variações do fluxo luminoso de lâmpadas (MEHL, 2013).

A determinação da qualidade da tensão de um barramento do sistema de distribuição com relação 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 (ANEEL, 2009).

2.2.6 Variação de Tensão de Curta Duração

As variações de tensão de curta duração são desvios significativos no valor eficaz da tensão em curtos intervalos de tempo. As VTCDs podem ser classificadas em afundamentos de tensão e elevações de tensão, podendo ser um distúrbio momentâneo ou temporário (KAGAN, 2009).

O PRODIST, em seu módulo 8, classifica as VTCDs em variações momentâneas de tensão, para durações até 3s, e em variações temporárias de tensão, para durações entre 3s e 3 min. No caso das elevações de tensão qualquer variação acima de 1,1 pu, com duração até 3 min, é considerada uma elevação de tensão.

As VTCDs ocorrem devido a duas causas principais, quais sejam:

- Partida de grandes motores, ou conexão de cargas de grande porte no sistema, que causam quedas de tensão pronunciadas no sistema elétrico.
- Curto-circuitos, que podem provocar afundamentos ou elevações de tensão.

As VTCDs podem gerar diversos impactos sobre a carga. Alguns equipamentos são sensíveis às VTCDs e podem apresentar problemas no funcionamento, afetando, portanto, os processos onde estão inseridos.

2.2.7 Variação de Frequência

A variação de frequência é definida como um desvio da frequência fundamental do sistema de energia. A frequência do sistema elétrico está diretamente associada à velocidade de rotação dos geradores que suprem a carga

para o sistema (SILVA, 2008). A frequência constante facilita manter o sincronismo entre os diferentes geradores através de um sistema de controle da geração descentralizado, capaz de manter o equilíbrio entre a potência gerada e a potência solicitada pelas cargas (DUGAN, 2003).

As instalações de geração e o sistema de distribuição, que são conectados, devem, em condições normais de operação e em regime permanente, operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz (ANEEL, 2009).

2.3 EFEITO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

O desenvolvimento mundial da eletrônica de potência propiciou a criação de equipamentos eletrônicos cada vez mais eficientes. Estes equipamentos, apesar de permitirem uma economia de energia considerável, prejudicam a qualidade de energia no sistema elétrico (NUNES, 2007).

Com a crescente popularização de equipamentos eletrônicos nos setores residenciais e comerciais, a injeção de harmônicos na rede tende a aumentar cada vez mais. Além disso, a constante preocupação com o uso racional de energia, evidenciada com a criação do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL em 1985, e consolidada no Brasil durante e após o racionamento de energia elétrica ocorrido nos anos 2001-2002, incentivou a substituição de cargas dadas como não eficientes, na sua maioria cargas de característica linear, por cargas de menor consumo com grande utilização de eletrônica. Essa substituição melhorou a eficiência das cargas, porém aumentou a injeção de harmônicos por estas.

Na Tabela (1) é apresentada uma relação entre o aumento da corrente eficaz e a diminuição do fator de potência com o aumento da distorção harmônica total de corrente (DHT_i), causadas por cargas não-lineares.

Tabela 1: Influência do DHT_i no acréscimo de corrente e na redução do fator de potência (ELETROBRÁS / PROCEL, 2006).

DHT_i (%)	Acréscimo de corrente (%)	Fator de Potência
-------------	---------------------------	-------------------

0	0,00	1,000
10	0,50	0,995
30	4,40	0,958
50	11,80	0,894
70	22,07	0,819
100	41,42	0,707
150	80,28	0,555
200	123,61	0,447

O aumento da distorção harmônica total implica em uma redução do fator de potência e um acréscimo na corrente eficaz e, conseqüentemente, o aumento das perdas nos equipamentos (NUNES, 2007). Apesar das cargas eletroeletrônicas diminuírem a qualidade do sistema elétrico, estas são sensíveis a variações provocadas pela má qualidade do mesmo, o que evidencia uma exigência maior em relação à qualidade deste produto (MEHL, 2013).

3. METODOLOGIA

A Faculdade UnB Gama foi o local escolhido para analisar os parâmetros de qualidade de energia elétrica em uma edificação eficiente, realizando uma comparação entre as cargas atuais e cargas a serem substituídas. Dessa forma, foi realizado um levantamento de cargas no local, considerando os sistemas de iluminação e de refrigeração.

Pelo fato de no local não haver muitas unidades de ar condicionado munidos de uma tecnologia mais eficiente, por exemplo, os equipamentos dotados com a tecnologia *Inverter*, as medições das grandezas elétricas serão realizadas somente para o sistema de iluminação. Com isso, o desenvolvimento experimental deste estudo compreenderá uma análise comparativa entre dois sistemas de iluminação: um constituído por lâmpadas fluorescente e outro por lâmpadas LEDs.

O estudo será realizado em duas etapas: uma experimental e outra computacional. Na etapa experimental serão realizadas medições das grandezas elétricas dos diferentes modelos de lâmpadas. Já na etapa computacional será realizada uma simulação das cargas utilizando o *software* ATP.

3.1 PROCEDIMENTO LABORATORIAL

As medições das grandezas elétricas serão realizadas no Laboratório de Eletricidade da Faculdade UnB Gama. A Figura (3) representa o arranjo prático para determinar os distúrbios na qualidade da energia elétrica.

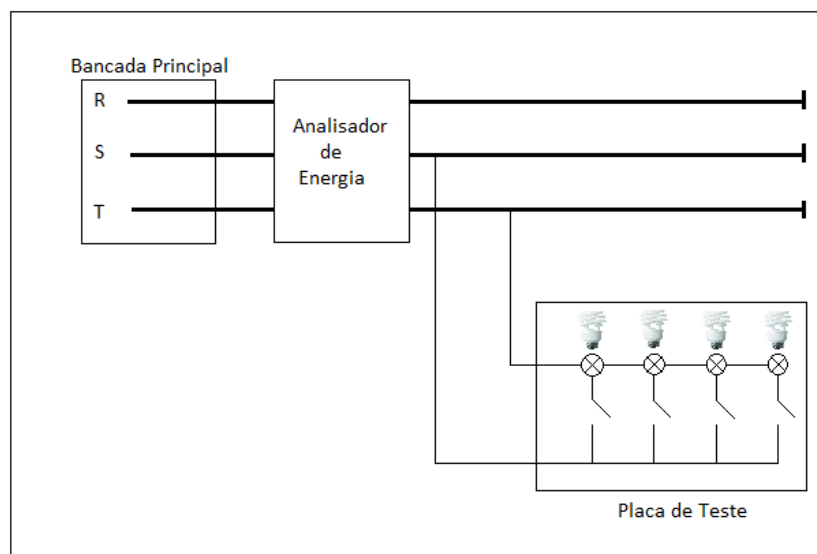


Figura 3: Arranjo experimental.

A bancada experimental será composta pela placa de teste das lâmpadas e de um analisador da qualidade de energia. O analisador que será utilizado é o ET-5060C da Minipa, mostrado na Fig.(4). Este equipamento fornece as medidas de tensão, corrente, potências (aparente, ativa e reativa), fator de potência e distorção harmônicas. O analisador permite a visualização instantânea das informações no display, com armazenamento de dados em sua memória interna ou através de um dispositivo de armazenamento removível.



Figura 4: Analisador da Qualidade de Energia.

Durante as medições as lâmpadas serão submetidas à alimentação em tensão de 127 V e frequência de 60 Hz. O início das medições ocorrerá depois de transcorrido o tempo de estabilização das lâmpadas.

3.2 MODELAGEM COMPUTACIONAL

O programa escolhido para os estudos computacionais foi o ATP (*Alternative Transients Program*), o que é uma ferramenta com boa aceitação no setor elétrico para análises no domínio do tempo de sistemas de potência.

4. RESULTADOS

Visando a implantação de um projeto de eficiência energética e um estudo da qualidade da energia elétrica, foi realizado um levantamento de carga das lâmpadas e ar condicionados, encontrados na Faculdade UnB Gama (FGA). Na Tabela (2) são apresentados os dados coletados.

Tabela 2: Levantamento das cargas da Faculdade UnB Gama.

Equipamento	Especificação	Potência (W)	Quantidade	Potência Instalada (KW)
Lâmpadas	Lâmpada Tubular - 16W	16	1538	24,608
	Lâmpada Tubular - 32W	32	1687	53,984
	Lâmpada Fluorescente Compacta - 36W	36	305	10,98
	Lâmpada de Magnésio - 250W	250	84	21
	Lâmpada - 160W	160	70	11,2
Ar Condicionado	9000 BTU/h	2637	2	5,274
	12000 BTU/h	3516	5	17,58
	18000 BTU/h	5274	2	10,548
	24000 BTU/h	7032	10	70,32
	30000 BTU/h	8790	5	43,95
	60000 BTU/h	17580	3	52,74

A partir do levantamento realizado encontrou-se que a potência instalada das lâmpadas é 121,772 KW e dos ares condicionados é 200,412 KW, o que corresponde a 38% e 62% da carga total levantada, respectivamente. A Potência total instalada das lâmpadas demonstra a importância de um sistema de iluminação eficiente.

Um sistema de iluminação eficiente, além da redução do consumo de energia elétrica, deve ser planejado levando em consideração as características técnicas das lâmpadas utilizadas para que as condições quanto à iluminação possam ser

atendidas, sem que haja uma perda no conforto para as pessoas, dependendo das condições de uso do ambiente (OLIVEIRA, 2009). Dessa forma, visando estudar um sistema de iluminação eficiente, as lâmpadas LEDs foram escolhidas para substituírem as lâmpadas fluorescentes, pois estas apresentam uma maior eficiência luminosa agregada a uma longa vida útil.

Apesar de ser uma tecnologia emergente, já existem diversos modelos de lâmpadas LEDs que podem ser utilizadas para iluminação. Dessa forma, três parâmetros foram considerados para a escolha das lâmpadas a serem estudadas:

1. Necessidade de alteração nas instalações elétricas: definiu-se que as lâmpadas a serem estudadas são as que permitem a substituição sem a realização de grandes modificações;
2. Modelo da lâmpada (tubular, bulbo, etc.);
3. Fluxo luminoso: representa a potência fornecida por uma fonte luminosa, por segundo, em todas as direções sob forma de luz.

Portanto, neste estudo serão consideradas as lâmpadas tubulares de 16 W e 32 W, e as lâmpadas fluorescente compacta de 36 W, devido a facilidade de substituição dessas pelas lâmpadas LEDs. A Figura (5) mostra o modelo das lâmpadas fluorescente encontradas nas instalações da FGA.

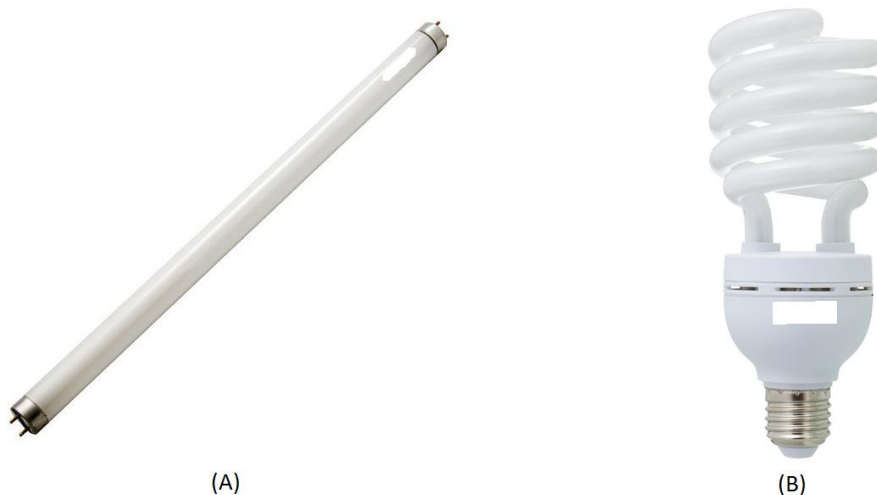


Figura 5: Modelos das lâmpadas. (A) Fluorescente tubular. (B) Fluorescente compacta.

As Tabelas (3) a (5) apresentam a equivalência entre as lâmpadas fluorescentes e as lâmpadas LEDs, considerando o fluxo luminoso das lâmpadas fornecido pelos fabricantes.

Tabela 3: Equivalência lâmpada 16 w e lâmpada LED.

Equivalência		
Modelo	Fluorescente tubular T8 – 16 W	Tubular LED
Potência	16 W	12 W
Eficiência Luminosa	75 Lm/W	110 Lm/W
Fluxo Luminoso	1200 Lm	1320 Lm

Tabela 4: Equivalência lâmpada 32 w e lâmpada LED.

Equivalência		
Modelo	Fluorescente tubular T8 – 32 W	Tubular LED
Potência	32 W	24 W
Eficiência Luminosa	77 Lm/W	105 Lm/W
Fluxo Luminoso	2470 Lm	2520 Lm

Tabela 5: Equivalência lâmpada 36 w e lâmpada LED.

Equivalência		
Modelo	Fluorescente compacta – 36 W	LED
Potência	36 W	20 W
Eficiência Luminosa	60 Lm/W	90 Lm/W

Fluxo	2160 Lm	1800 Lm
Luminoso		

Com as amostras definidas pode-se realizar um estudo prévio com relação à redução no consumo devido à substituição dessas lâmpadas. Na Tabela (6) é apresentada a potência instalada das lâmpadas a serem substituídas.

Tabela 6: Potência instalada após substituição proposta.

Equipamento	Especificação	Potência (W)	Quantidade	Potência Instalada (KW)
Lâmpadas	LED Tubular	12	1538	18,456
	LED Tubular	24	1687	40,488
	LED de alta potência	20	305	6,1
Total				65,044

A partir dos resultados, considerando o número de lâmpadas existentes, pode-se calcular uma estimativa da redução do consumo em virtude da troca das lâmpadas escolhidas. Estimou-se uma redução no consumo de 27%, comparando apenas com os 3 modelos de lâmpadas, o que resulta em uma redução de 20% considerando todo o sistema de iluminação.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve por objetivo propor uma metodologia para analisar os parâmetros de qualidade da energia elétrica em uma edificação eficiente, para tanto, foi realizado um levantamento de cargas na Faculdade UnB Gama - FGA.

Foi apresentado um estudo de um sistema de iluminação eficiente empregando lâmpadas LEDs que podem ser utilizadas sem a realização de grandes alterações nas instalações elétricas da FGA. O uso dos LEDs como fonte de iluminação se tornou atrativo devido as suas características técnicas, e principalmente por sua eficiência. Com a substituição proposta, o consumo do sistema de iluminação reduziria em 20%.

Após este estudo prévio da implantação de um sistema de iluminação eficiente nos prédios da FGA, serão estudados os efeitos da substituição das lâmpadas na qualidade da energia elétrica. Para isso serão realizadas medições com as cargas atuais e com as cargas proposta, para avaliar a distorção total harmônica e o fator de potência, em ambos os sistemas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Procedimentos de distribuição, PRODIST, 2009.
- Cruz, M. P. Metodologia para avaliação dos impactos econômicos associados a problemas de qualidade de energia. Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Florianópolis, Setembro de 2007.
- Deckmann, S. M.; Pomilio, J. A. Avaliação da qualidade de energia elétrica. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, 2010.
- Dugan, R. C.; McGranaghan, M. F.; Santoso, S.; Beaty, H. W. Electrical Power Systems Quality, 2nd edition, McGraw-Hill, 2003.
- Eletróbrás / PROCEL. Conservação de Energia: Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações. 3ª Edição, FUPAI, 2006.
- Eletróbrás. Manual de prédios eficientes em energia elétrica. Rio de Janeiro: IBAM/ELETOBRÁS/PROCEL, 2002.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Nota Técnica DEA 14/10 – Avaliação da eficiência energética na indústria e nas residências no horizonte decenal (2010-2019). Rio de Janeiro, 2010.
- Ferreira, A. R. Iluminação do estado sólido, economia potencial de energia elétrica para o país. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação da Universidade Federal do ABC, 2014.
- INMETRO, Etiqueta de eficiência energética. Disponível em: <http://www2.inmetro.gov.br/pbe/a_etiqueta.php>. Acesso em: 23 Outubro de 2015.
- Kagan, N. Estimação de indicadores de qualidade da energia elétrica/ Nelson Kagan, Ernesto João Robba, Herném Prieto Schmidt. São Paulo: Blucher, 2009.
- MEHL, E. L. M. Qualidade da Energia Elétrica. Curso de pós-graduação em engenharia elétrica, UFPR, 2013.
- MME – Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Eficiência Energética: Premissas e Diretrizes Básicas. 2011.
- Nunes, R. V. Análise da penetração harmônica em redes de distribuição desequilibradas devido às cargas residenciais e comerciais com a utilização do ATP. 2007. 162 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2001.
- Oliveira, C. G. de. Estudo sobre conservação de energia elétrica e qualidade de energia elétrica. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2009.
- PINTO, R. A. Projeto e implementação de lâmpadas para iluminação de interiores empregando diodos emissores de luz (LEDs). Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, 2008.
- PROCEL Info, O Programa. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?Team={505FF883-A273-4C47-A14E-0055586F97FC}>> . Acesso em: 23 Outubro de 2015.
- PROCEL Info, Selo Procel Edificações. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View={8E03DCDE-FAE6-470C-90CB-922E4DD0542C}>> . Acesso em: 23 Outubro de 2015.
- Silva, C. G. M. da. Diagnóstico sobre a utilização das lâmpadas fluorescentes compactas (LFC) promotoras de eficiência energética nos sistemas de iluminação

- no Brasil. Dissertação (Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação Em Energia) – EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo, 2008.
- Souza, H. M. de; et al. Reflexões sobre os principais programas em eficiência energética existentes no Brasil. Revista Brasileira de Energia, Vol. 15, n. 1, 2009, p 7-26.
- Velasco, L. N. Análise experimental de erros de medição de energia elétrica ativa em medidores eletromagnéticos tipo indução, sujeitos a distorções harmônicas de correntes e tensões, em sistemas equilibrados e desequilibrados. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, 2007.