

**HELIO HEE HAN**

**IMPACTO DA REDUÇÃO DO NÍVEL DE TENSÃO NA ILUMINAÇÃO  
RESIDENCIAL EM UMA REDE INTELIGENTE**

**HELIO HEE HAN**

**IMPACTO DA REDUÇÃO DO NÍVEL DE TENSÃO NA ILUMINAÇÃO  
RESIDENCIAL EM UMA REDE INTELIGENTE**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador : Prof. Dr. Daniel J. B. S. Sampaio

Guaratinguetá  
2015

H233p

Han, Helio Hee

Impacto da redução do nível de tensão na iluminação residencial em uma rede inteligente / Helio Hee Han – Guaratinguetá, 2015.

46 f : il.

Bibliografia: f. 46

Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015.

Orientador: Prof. Dr. Daniel J. B. S. Sampaio

Coorientador: Prof. Dr. Samuel Euzédice de Lucena

1. Redes inteligentes de energia 2. Lâmpadas incandescentes 3. Diodos emissores de luz I. Título

CDU 621.3.011.7

IMPACTO DA REDUÇÃO DO NÍVEL DE TENSÃO NA ILUMINAÇÃO RESIDENCIAL EM  
UMA REDE INTELIGENTE


**HELIO HEE HAN**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
**GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. Leonardo Mesquita  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. DANIEL JULIEN BARROS DA SILVA SAMPAIO  
Orientador/UNESP-FEG

  
Prof. Dr. SAMUEL EUZÉDICE DE LUCENA  
UNESP-FEG

  
Prof. Dr. TEÓFILO MIGUEL DE SOUZA  
UNESP-FEG

Dezembro de 2015

“É preciso ter um caos dentro de si para dar à luz uma estrela cintilante.”

Friedrich Nietzsche

HAN, H. H. **Impacto da redução do nível de tensão na iluminação residencial em uma rede inteligente**. 2015. 46 f. Trabalho de graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

## RESUMO

Neste trabalho, apresentaremos uma visão geral da rede inteligente definindo os três sistemas principais que a compõem: infraestrutura inteligente, gestão inteligente e proteção inteligente. Conceituaremos uma aplicação da gestão inteligente, a conservação pela redução de tensão, citando seus benefícios e sua história de aplicação. E, por fim, abordaremos um teste em que reduzimos as tensões nominais sobre as lâmpadas incandescentes, CFL e LED, no âmbito da iluminação residencial, e sobre as lâmpadas LED e HPS, no âmbito da iluminação pública. O teste objetiva verificar se a redução de tensão afeta negativamente as fontes de iluminação medindo-se manualmente a temperatura com uma câmera de imagem térmica FLIR e a iluminância com um medidor LUX. Os dados referentes ao fator de potência, distorção harmônica total, e potência de entrada serão coletados automaticamente através do analisador de qualidade de energia Fluke 345 com uma sonda Fluke Hall Effect Current. No âmbito residencial, verificou-se que ambos CFL e LED tiveram bom desempenho com as menores variações na iluminância. Entre ambos, as fontes LED tiveram as menores distorções harmônicas e os menores consumos de potência, já as lâmpadas incandescentes tiveram um mal desempenho como esperado. As fontes de iluminação pública também tiveram um bom desempenho e obtiveram fatores de potência dentro dos padrões, ao contrário das lâmpadas CFL e LED de âmbito residencial. Os dados coletados mostram claramente a viabilidade para reduções de tensão nominal. Mesmo com pequenas reduções, existem possibilidades de economia que podem ser repassadas para os utilitários e consumidores.

**PALAVRAS-CHAVE:** Rede inteligente. Conservação pela redução de tensão. Iluminação residencial. Iluminação pública.

HAN, H. H. **Impact of voltage reduction on residential lighting in the smart grid.** 2015. 46 f. Trabalho de graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

### **ABSTRACT**

In this paper, we will present an overview of the smart grid defining the three main systems that compose it: smart infrastructure system, smart management system and smart protection system. We will conceptualize a functionality of smart management system, the conservative voltage reduction, citing its benefits and its history of application. And, finally, we'll cover a test in which we reduce the nominal voltages on incandescent bulbs, CFL and LED, in the context of residential lighting, and on LED and HPS, in the context of public lighting. The test aims to check whether the voltage reduction adversely affects sources of lighting by measuring the temperature manually with a thermal imaging camera FLIR and illuminance with a LUX meter. The set of power factor, total harmonic distortion, and input power values will be collected automatically through the power quality Analyzer Fluke 345 with a probe Fluke Hall Effect Current. For residential lighting, it was found that both CFL and LED had good performance with the smallest variations in illuminance. Between both, the LED source had the lowest harmonics and the lowest power consumption, on the other hand incandescent bulbs had a bad performance as expected. Public light sources also had a good performance and obtained power factors within the standards, as opposed to the CFL and LED residential sources. The data collected clearly shows the feasibility for nominal voltage reductions. Even with small reductions, there are possibilities of savings which can be passed on to the utilities and consumers.

**KEYWORDS:** Smart grid. Conservative voltage reduction. Residential lighting. Public lighting.

## SUMÁRIO

<b>1 REDE INTELIGENTE .....</b>	<b>7</b>
1.1 Introdução .....	7
1.2 Visão geral .....	8
1.3 Gestão inteligente .....	12
<b>2 GESTÃO INTELIGENTE PELA REDUÇÃO DE TENSÃO.....</b>	<b>15</b>
2.1 A conservação pela redução de tensão .....	15
2.2 Benefícios da CRT .....	17
2.3 História da redução de tensão .....	18
<b>3 TESTE DA VIABILIDADE DE REDUÇÃO DE TENSÃO.....</b>	<b>21</b>
3.1 Introdução .....	21
3.2 Procedimento de teste .....	22
3.2.1 Coleta de dados automatizada .....	23
3.2.2 Coleta de dados manual .....	24
3.3 Resultados.....	24
3.3.1 Distorção harmônica total.....	24
3.3.2 Iluminância .....	25
3.3.3 Características térmicas .....	26
3.3.4 Fator de potência .....	26
3.3.5 Potência de entrada .....	27
<b>4 CONCLUSÃO.....</b>	<b>28</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>30</b>
<b>APÊNDICE A - GRÁFICOS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS TOTAIS .....</b>	<b>31</b>
<b>APÊNDICE B - DADOS DAS ILUMINÂNCIAS E TEMPERATURAS .....</b>	<b>33</b>
<b>APÊNDICE C - GRÁFICOS DOS FATORES DE POTÊNCIAS.....</b>	<b>43</b>
<b>APÊNDICE D - GRÁFICOS DAS POTÊNCIAS DE ENTRADAS .....</b>	<b>45</b>



# 1 REDE INTELIGENTE

## 1.1 Introdução

Não aconteceram inovações significativas no fornecimento da energia elétrica ao consumidor, desde a criação da primeira rede de energia elétrica. Muitas das tecnologias usadas naquela época ainda continuam em uso.

Nas últimas décadas, as redes não acompanharam os desafios das mudanças modernas. Medidas de segurança, usos de energia alternativa e intermitente, economia de energia, redução de picos de demanda e controles digitais para aumentar a confiabilidade e agilizar a restauração são alguns exemplos de desafios que serão enfrentados nos próximos anos.

O pior cenário em uma rede elétrica é o corte de fornecimento. Em alguns casos esses cortes se prolongam por várias horas, sejam eles por incapacidade de atender à demanda, ou de detectar rapidamente a falha. Essa situação prejudica toda a economia, fazendo com que áreas de produção, de prestação de serviços e trânsito sofram impactos negativos.

Em tempos de modernidade, as empresas de distribuição dependerem dos clientes para serem notificadas do local aproximado da falha é surpreendente.

De acordo com a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), a média de perdas elétricas no Brasil é de 16 %. A redução dessas perdas permite o adiamento de investimentos em geração e o aumento dos investimentos em infraestrutura, melhorando a qualidade do fornecimento.

Diante dessas necessidades, surge o conceito de Rede Inteligente, considerada a próxima geração da rede elétrica, usa fluxos bidirecionais de eletricidade e informações para criar uma rede de fornecimento de energia amplamente distribuída e automatizada.

Neste trabalho, apresentaremos uma visão geral da rede inteligente com foco em uma de suas aplicações, a conservação pela redução de tensão.

O objetivo deste trabalho é a pesquisa e a discussão da viabilidade de redução de tensões nominais, analisando os efeitos que essas mudanças terão sobre uma variedade de fontes de iluminação.

## 1.2 Visão geral

Comumente, o termo rede é usado para um sistema de eletricidade que pode suportar todas ou algumas das seguintes quatro operações: geração de energia elétrica, transmissão de eletricidade, distribuição de eletricidade e controle da eletricidade. (Fang; Misra; Xue; Yang, 2012)

Uma rede inteligente (RI) é uma evolução da rede elétrica do século XX. As redes tradicionais geralmente são usadas para transportar a energia de alguns poucos geradores centrais para um grande número de usuários ou clientes. Em contraste, a RI usa fluxos bidirecionais de eletricidade e informações para criar uma distribuída rede de fornecimento de energia avançada e automatizada. A tabela 1 dá uma breve comparação entre a rede existente e a RI. (Fang; Misra; Xue; Yang, 2012)

Utilizando modernas tecnologias de informação, a RI é capaz de fornecer energia de forma mais eficiente e respondendo às amplas gamas de condições e eventos. Amplamente afirmado, a RI pode responder aos eventos que ocorrem em qualquer lugar na rede, tais como geração, transmissão, distribuição e consumo de energia, e adotar as estratégias correspondentes. (Fang; Misra; Xue; Yang, 2012)

Tabela 1 - Comparação entre a rede existente e a inteligente

Rede existente	Rede inteligente
Eletromecânico	Digital
Comunicação unidirecional	Comunicação bidirecional
Geração centralizada	Geração distribuída
Poucos sensores	Sensores em todas as partes
Monitoração manual	Auto monitoração
Restauração manual	Auto restauração
Falhas e blecautes	Adaptabilidade e ilhamento
Controle limitado	Controle amplo
Poucas opções aos clientes	Várias opções aos clientes

Fonte: (Fang; Misra; Xue; Yang, 2012)

Por exemplo, uma vez que uma falha em um transformador de média tensão ocorra na rede de distribuição, a RI pode automaticamente alterar o fluxo de energia e recuperar o fornecimento de energia. Vamos considerar outro exemplo de definição de perfil de demanda. Uma vez que diminuir a demanda de pico e suavizar a demanda reduzem, de uma forma geral, os requerimentos de custos de capital e de planta; no período de pico, o utilitário elétrico pode usar preços em tempo real, para convencer alguns usuários a reduzirem suas demandas de

energia, para que o perfil de demanda total cheio de picos possa ser moldado para um perfil de demanda bem suavizado. (Fang; Misra; Xue; Yang, 2012)

Mais especificamente, a RI pode ser considerado como um sistema elétrico que usa a informação nos dois sentidos, as tecnologias de comunicação seguras, e inteligência computacional de forma integrada em toda a geração de eletricidade, transmissão, subestações, distribuição e consumo, para alcançar um sistema que é limpo, seguro, confiável, flexível, eficiente e sustentável. Esta descrição cobre todo o espectro do sistema de energia, da geração para os pontos finais de consumo da eletricidade. A RI final é uma visão. É uma integração de componentes complementares, subsistemas, funções e serviços sob o controle abrangente de sistemas de gestão e controle altamente inteligentes. (Fang; Misra; Xue; Yang, 2012)

Devido à imensidão referente à pesquisa da RI, diferentes pesquisadores podem expressar visões diferentes sobre a RI devido aos diferentes focos e perspectivas. Exploraremos três sistemas principais da RI de uma perspectiva técnica:

- Infraestrutura inteligente: A infraestrutura inteligente é a infraestrutura de energia, informação e comunicação subjacente à RI, que suporta:
  - 1) Geração, fornecimento, e consumo de energia avançada;
  - 2) Medição, monitoração e gestão de informações avançadas;
  - 3) Tecnologias de comunicação avançadas.
- Gestão inteligente: O sistema de gestão inteligente é um subsistema na RI que fornece gestão e serviços de controle avançados.
- Proteção inteligente: O sistema de proteção inteligente é um subsistema na RI que fornece análise de confiabilidade da rede avançada, proteção contra falhas e serviços de proteção de segurança e privacidade. (Fang; Misra; Xue; Yang, 2012)

Os benefícios esperados e requerimentos da RI são os seguintes:

- 1) Melhorar a qualidade e a confiabilidade da energia;
- 2) Otimizar a utilização de instalações e evitar a construção de usinas de energia reservas (pico de carga);
- 3) Aumentar a capacidade e a eficiência das redes elétricas existentes;
- 4) Maior flexibilidade às interrupções;

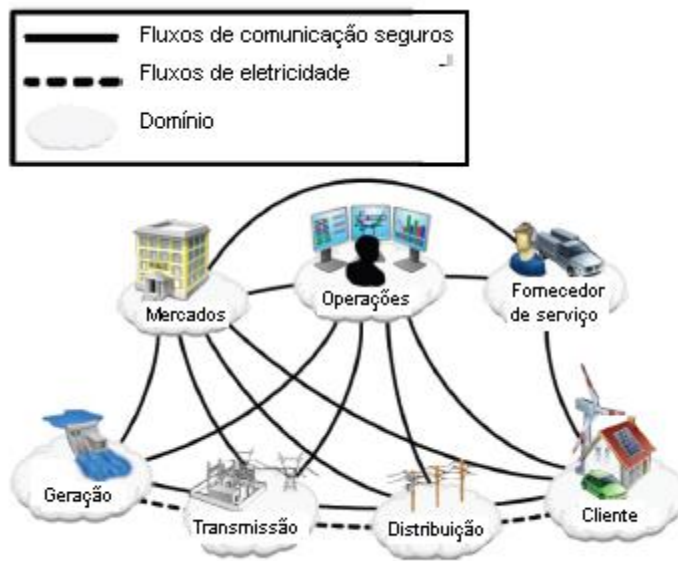
- 5) Permitir manutenções e respostas automáticas de correção, previsíveis aos distúrbios do sistema;
- 6) Facilitar a expansão da implantação de fontes de energia renováveis;
- 7) Acomodar fontes de energia distribuídas;
- 8) Automatizar manutenção e operação;
- 9) Reduzir emissões de gases de efeito estufa, permitindo veículos elétricos e novas fontes de energia;
- 10) Reduzir o consumo de petróleo, reduzindo a necessidade de geração ineficiente durante períodos de pico;
- 11) Apresentar oportunidades para melhorar a segurança da rede;
- 12) Permitir a transição para os veículos elétricos carregáveis e novas opções de armazenamento de energia;
- 13) Aumentar a escolha do consumidor;
- 14) Permitir novos produtos, serviços e mercados. (Fang; Misra; Xue; Yang, 2012)

Para se compreender este novo paradigma de rede, a NIST (National Institute of Standards and Technology) forneceu um modelo conceitual (como mostrado na Figura 1), que pode ser usado como referência para as várias partes do sistema elétrico onde ocorram trabalhos de padronização da RI. Este modelo conceitual divide a RI em sete domínios. Cada domínio abrange um ou mais atores da RI, incluindo dispositivos, sistemas ou programas que tomam decisões e trocam informações necessárias para a execução de aplicações. As breves descrições dos domínios e atores são dadas na Tabela 2. Observe que a NIST propôs este modelo a partir das perspectivas dos diferentes papéis envolvidos na RI. (Fang; Misra; Xue; Yang, 2012)

Em contraste, o nosso trabalho, que olha para a RI de um ponto de vista técnico, divide a RI em três sistemas principais: infraestrutura inteligente, gestão inteligente e proteção inteligente.

1) Infraestrutura inteligente: A infraestrutura inteligente é a infraestrutura de energia, informação e comunicação subjacente à RI. Ela suporta fluxos bidirecionais de informação e de eletricidade. Note que é simples de entender o conceito de "fluxo bidirecional de informações." "Fluxo bidirecional de eletricidade" implica que o fornecimento de energia elétrica não é mais unidirecional. Por exemplo, na rede elétrica tradicional, a eletricidade é gerada pela planta de geração e então movida pela rede de transmissão, rede de distribuição e, finalmente, entregue aos usuários. Em uma RI, a eletricidade pode também ser recolocada

Figura 1 - O modelo conceitual da NIST, para a RI



Fonte: (Fang; Misra; Xue; Yang, 2012)

na rede por usuários. Por exemplo, os usuários podem ser capazes de gerar eletricidade usando painéis solares em casas e colocá-lo de volta para a rede, ou veículos elétricos podem fornecer energia para ajudar a equilibrar cargas "cortando o pico" (enviar energia de volta à rede quando a demanda é alta). Este fluxo de volta é importante. Por exemplo, pode ser extremamente útil em uma microrrede que foi ilhada, devido às falhas de energia. A microrrede pode funcionar, embora a um nível reduzido, com a ajuda da energia alimentada de volta pelos clientes. Nesta pesquisa, podemos dividir ainda mais essa infraestrutura inteligente em três subsistemas: o subsistema de energia inteligente, o subsistema de informação inteligente e o subsistema de comunicação inteligente.

- O subsistema de energia inteligente é responsável pela geração de eletricidade avançada, fornecimento e consumo.
- O subsistema de informação inteligente é responsável por medições avançadas de informações, monitoração e gestão no contexto da RI.
- O subsistema de comunicação inteligente é responsável pela transmissão de informações e conectividade de comunicação entre sistemas, dispositivos e aplicações no contexto da RI.

2) Gestão inteligente: O sistema de gestão inteligente é um subsistema, na RI, que fornece serviços e funcionalidades avançadas de gestão e controle. A razão crucial, para que a RI possa revolucionar a rede, é a explosão de funcionalidades baseada em sua infraestrutura inteligente. Com o desenvolvimento de novas aplicações e serviços de gestão que podem

alavancar os avanços de tecnologia e capacidade permitidos por esta avançada infraestrutura, a rede vai continuar ficando “mais inteligente”. O sistema de gestão inteligente aproveita a infraestrutura inteligente para alcançar vários objetivos de gestão avançada. Até agora, a maioria dos objetivos estão relacionados com a melhoria da eficiência energética, balanço de oferta e demanda, controle de emissões, redução de custos operacionais e maximização da utilidade.

Tabela 2 – Domínios e atores no modelo da RI, conceitual, da NIST

Domínio	Atores no domínio
Clientes	Os usuários finais de eletricidade. Podem gerar, armazenar, e gerenciar o uso de energia
Mercados	Os operadores e participantes nos mercados de eletricidade
Fornecedores de serviço	As organizações fornecendo serviços para clientes e utilitários elétricos
Operações	Os gerenciadores do movimento da eletricidade
Geração	Os geradores de eletricidade em grandes quantidades. Podem armazenar energia para posterior distribuição
Transmissão	Os carregadores das grandes quantidades de eletricidade sob grandes distâncias. Podem armazenar e gerar eletricidade
Distribuição	A distribuição de eletricidade para e dos clientes. Podem armazenar e gerar eletricidade

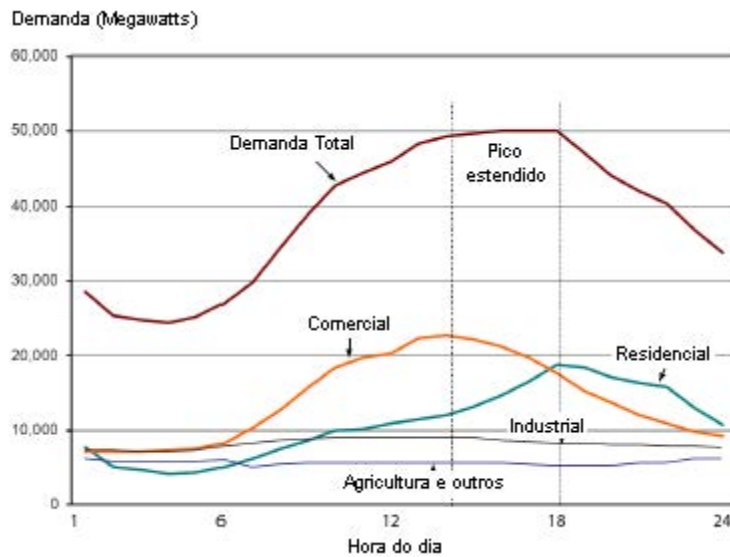
Fonte: (Fang; Misra; Xue; Yang, 2012)

3) Proteção inteligente: O sistema de proteção inteligente é o subsistema, na RI, que fornece análise avançada de confiabilidade de rede, proteção contra falhas e serviços de proteção de segurança e privacidade. Tirando proveito da infraestrutura inteligente, a RI deve não só realizar um sistema de gestão mais inteligente mas também fornecer um sistema de proteção mais inteligente que pode mais eficazmente e eficientemente apoiar mecanismos de proteção de falha, abordar questões de segurança cibernética e preservar a privacidade. (Fang; Misra; Xue; Yang, 2012)

### 1.3 Gestão inteligente

Na RI, fluxos bidirecionais de informações e eletricidade são suportados, o que estabelece a base para a realização de várias funções e objetivos de gestão, tais como a melhoria da eficiência energética, redução de custos de operação, balanço de demanda e fornecimento, controle de emissões e maximização da utilidade. (Fang; Misra; Xue; Yang, 2012)

Figura 2 - Perfil de carga total, da Califórnia, de um dia quente, em 1999



Fonte: (Fang; Misra; Xue; Yang, 2012)

Vamos considerar a resposta à demanda, um dos conceitos mais importantes suportados pela RI. Tradicionalmente, as empresas de energia elétrica tentam igualar o fornecimento à procura de energia. No entanto isto pode ser não só caro mas também impraticável, talvez impossível a longo prazo. Isso ocorre porque a quantidade total de demanda de energia pelos usuários pode ter uma distribuição de probabilidade muito ampla, o que exigiria plantas geradoras reservas no modo de espera para responder às variações bruscas de uso de energia. (Fang; Misra; Xue; Yang, 2012)

Os últimos 10% da capacidade de geração podem ser necessários em mero 1% do tempo. As tentativas para suportar a demanda poderiam falhar, resultando em quedas de tensão, blecautes (ou seja, falta de energia elétrica) e até mesmo falhas em série. Na RI, a resposta à demanda gerencia o consumo de eletricidade de clientes em resposta às condições de fornecimento. Mais especificamente, usando resposta à demanda, a RI não precisa igualar a oferta à demanda, mas em contraste, igualar a demanda ao fornecimento disponível usando tecnologia de controle ou convencendo os consumidores (por exemplo, por meio de preços variáveis), alcançando assim uma melhor utilização da capacidade. (Fang; Misra; Xue; Yang, 2012)

Por exemplo, a Fig. 2 mostra o padrão de uso de energia total, durante um período de vinte e quatro horas, para um dia quente típico na Califórnia (1999). Como podemos ver, a demanda total de 14:00 a 18:00 é muito maior do que a média. Em uma RI, a gestão inteligente por um medidor inteligente pode reduzir consumos de energia desligando-se

dispositivos não essenciais durante o tempo de pico de uma forma que a demanda total de pico possa ser reduzida. (Fang; Misra; Xue; Yang, 2012)

Dentro da estrutura da RI, muitos dos objetivos de gestão, que são difíceis e possivelmente inviáveis para serem realizados na rede elétrica convencional, se tornam possíveis e fáceis. Até agora, as obras para o gerenciamento inteligente focam principalmente nestes três objetivos:

- 1) eficiência energética e melhoria do perfil de demanda;
- 2) otimização de custos e do utilitário e estabilização de preço;
- 3) controle de emissão. (Fang; Misra; Xue; Yang, 2012)

As maneiras usuais para modelar o perfil de demanda são mudança, agendamento ou redução de demanda, com o objetivo de remodelar o perfil de demanda cheio de picos para um perfil de demanda bem alisado ou reduzir a proporção de pico à média ou a demanda de pico da demanda de energia total. Como discutido antes, uma vez que sistemas de geração elétrica e transmissão são geralmente feitos sobre medida para corresponder à demanda de pico, reduzir a demanda de pico e alisar o perfil de demanda reduz os requisitos de custo da planta total e de capital e também aumenta a confiabilidade do sistema. (Fang; Misra; Xue; Yang, 2012)



## **2 GESTÃO INTELIGENTE PELA REDUÇÃO DE TENSÃO**

### **2.1 A conservação pela redução de tensão**

A conservação pela redução de tensão (CRT) tem sido proposta como um método para economizar energia, reduzindo o nível de tensão do sistema de distribuição de energia elétrica. A CRT deverá ter consideráveis benefícios ambientais, pois a redução do consumo de energia levará a menos emissões de CO<sub>2</sub> associadas com a produção de energia. (ELLENS; BERRY; WEST, 2012)

A CRT não é uma nova medida de conservação de energia; testes já tinham sido feitos em 1973. Porém desenvolvimentos recentes, no campo da rede inteligente, têm chamado uma nova atenção para a CRT, chamada agora, também de otimização de tensão. O controle variável de tensão integrado, que é uma característica importante da futura rede, permite a aplicação da CRT. Tradicionalmente, a tensão da subestação é estabelecida na máxima tensão permitida para garantir um nível de tensão mínima aos usuários no final das linhas de distribuição. Nas redes de energia do futuro, será possível controlar o nível de tensão ao longo das linhas de distribuição a fim de fornecer a todos os clientes, aproximadamente, a mesma tensão de tal modo que as subestações de baixa tensão poderão operar perto do nível de tensão mínima sem expor os clientes, no final das linhas, à condição de subtensão. (ELLENS; BERRY; WEST, 2012)

Para a CRT ser eficaz, as cargas dos alimentadores devem ter uma componente significativa de impedância constante, ou seja, cargas que tenham uma característica predominantemente resistiva. A carga de impedância constante mais comum é a iluminação. À medida que a tensão fornecida para uma lâmpada incandescente é diminuída, a corrente através do filamento diminui. Portanto a energia utilizada pela lâmpada incandescente é reduzida. Enquanto o efeito de uma única lâmpada é insignificante, um alimentador servindo vários megawatts de carga de impedância constante apresenta uma oportunidade para alisamento do pico de demanda. (MCCARTHY; JOSKEN, 2003)

Um requisito óbvio para se realizar a redução de tensão em um alimentador é que o alimentador deve ter um perfil de tensão suficientemente acima do nível de fornecimento de tensão mínima aceitável. Em uma escala de 120 V, os limites superiores e inferiores comuns do perfil de tensão são de mais ou menos 5 %, ou de 114 V para 126 V. Se a tensão no final da linha é apenas ligeiramente acima do limiar de 114 V durante condições de pico, então

reduzir ainda mais a tensão para reduzir a demanda não é prático por estas normas. (MCCARTHY; JOSKEN, 2003)

A redução de pico de carga é mais importante hoje do que nunca. Existem muitos locais onde a energia gerada é aproximadamente igual à carga. Se a carga não for reduzida, os clientes poderão receber tensão abaixo dos níveis mínimos declarados ou poderão enfrentar interrupções estendidas porque o utilitário deverá reduzir a carga para permanecer estável. O preço normal de energia no mercado livre é de aproximadamente \$30 a \$50 por MWH. Em picos recentes de verão, os preços subiram a alarmantes \$7500 por MWH. Reduzindo a demanda de pico, um utilitário pode evitar pagar preços exorbitantes na compra de energia, ou ele pode vender o excesso de geração a um preço alto. Utilitários pegos desprevenidos, nestes tempos de pico, sofreram uma penalidade financeira considerável. (MCCARTHY; JOSKEN, 2003)

Georgia Power desenvolveu um método para fazer a CRT funcionar em muitos dos seus circuitos fortemente carregados que sofrem de uma queda de tensão significativa no fim da linha. Adicionando capacitores em vários locais, nos alimentadores de distribuição, o perfil de tensão é suportado onde ele é mais necessário, permitindo a redução de tensão da subestação quando necessário. Em alimentadores de distribuição fortemente carregados (por exemplo, 18 MVA de carga), o programa tem tido sucesso na redução de pico de aproximadamente 500 KW por circuito. (MCCARTHY; JOSKEN, 2003)

Um requisito para uma CRT eficaz é um perfil de tensão relativamente plano. Se a tensão no final da linha é muito menor do que a tensão da subestação, então de acordo com ANSI 84,1 - 1989 a tensão da subestação não deveria ser diminuída para além do ponto que resulta em uma tensão de fim de linha inferior a 114 V em uma escala de 120 V. (MCCARTHY; JOSKEN, 2003)

Para alimentadores que têm um perfil de tensão relativamente plano à plena carga e em períodos em que a CRT é desejada, a tensão da subestação pode ser simplesmente reduzida. Infelizmente, um alimentador com um perfil de tensão plano à carga máxima muito provavelmente indica que o alimentador não esteja fortemente carregado. Um alimentador fortemente carregado produzirá muito mais economia em KW da CRT do que de um alimentador levemente carregado. (MCCARTHY; JOSKEN, 2003)

Alimentadores fortemente carregados são mais propensos a terem uma significativa baixa de tensão da subestação para o fim da linha. Esta é uma melhor oportunidade para aplicar capacitores para achatar o perfil de tensão e maximizar os benefícios da CRT. (MCCARTHY; JOSKEN, 2003)

## 2.2 Benefícios da CRT

Os dois principais benefícios da CRT são a redução do pico de carga e a redução no consumo de energia anual. Quando o pico de carga é reduzido, menos unidades geradoras são necessárias, especialmente as mais caras, enquanto que a redução anual de energia requer menos consumo de combustível primário. (SCHNEIDER et al. 2010)

Uma limitação com a maioria dos esquemas de CRT atuais é que eles dependem de medições remotas de um punhado de locais e assumem que elas são representantes de todo o sistema. (SCHNEIDER et al. 2010)

Em geral, é evidente que a CRT tem o potencial para reduzir a demanda de pico em alimentadores de distribuição. A capacidade de reduzir a demanda de pico de um alimentador pode ser aumentada por meio de melhorias como substituição do condutor e instalação de reguladores de tensão a jusante. (SCHNEIDER et al. 2010)

De acordo com uma simulação feita por KP Schneider:

1) A CRT proporciona redução de pico de carga e redução de energia anual de aproximadamente 0,5 % a 3 %, dependendo do específico alimentador.

2) Quando extrapolados para um nível nacional, pode ser visto que uma implantação completa da CRT (100% dos alimentadores de distribuição) fornece uma redução de 3,04 % no consumo de energia anual.

3) Se implantada somente em alimentadores de distribuição de alto valor (40% dos alimentadores de distribuição), o consumo anual de energia é ainda reduzido em 2,4 %.

4) Em uma implantação prática de CRT, alimentadores de alta voltagem fortemente carregados deveriam ser alvejados.

5) Redução das perdas não é um benefício significativo da CRT. (SCHNEIDER et al. 2010)

Há outros benefícios econômicos e de confiabilidade por reduzir o pico de carga dos alimentadores de distribuição. Muitos utilitários cooperativos e municipais pagam uma taxa de demanda com base no uso de pico, então pode haver também um incentivo econômico para reduzir a demanda de pico. Vivida em algumas áreas do país, é possível que a carga se aproxime ou exceda a geração total disponível. Isto leva a preços elevados no mercado de energia elétrica e pode levar alguns clientes a experimentarem paralisações devido à falta de geração. (MCCARTHY; JOSKEN, 2003)

Em algumas situações, a CRT pode ser implementada para temporariamente reduzir a demanda de carga em alimentadores individuais. Reduzir a tensão da subestação, para alisamento de pico, pode ser feito sem comprometer a qualidade de energia, se as linhas de distribuição forem devidamente compensadas com correção de fator de potência e/ou reguladores de tensão. (MCCARTHY; JOSKEN, 2003)

Além das vantagens óbvias da conservação de energia, existem outros benefícios da CRT. Uma vantagem, para os clientes do utilitário, é que as lâmpadas incandescentes e os aquecedores de água elétricos terão uma vida mais longa. Não é incomum lâmpadas incandescentes e aquecedores de água falharem bem antes de sua validade em horas. Maiores vidas úteis das lâmpadas, dos elementos e dos aparelhos também beneficiam o meio ambiente. (WILSON, 2002)

Os consumidores se beneficiam de contas de energia mais baixas e uma resposta mais rápida à falta de energia. (WILSON, 2002)

Utilitários se beneficiam de menores perdas, maior vida útil do transformador e aumento do conhecimento da condição atual do seu sistema. Os custos operacionais são reduzidos durante faltas de energia devido à uma melhor compreensão da posição da falta. As informações fornecidas podem formar a base de um sistema de manutenção preditiva. (WILSON, 2002)

Utilitários podem controlar a quantidade de conservação e demanda ajustando rapidamente pontos estabelecidos. (WILSON, 2002)

De um modo geral, enquanto os resultados variam de circuito para circuito e de utilidade para utilidade, uma conclusão comum é que a carga é diminuída em aproximadamente 1,0 % para cada 1,0 % de diminuição na tensão da subestação. (MCCARTHY; JOSKEN, 2003)

### **2.3 História da redução de tensão**

A redução da tensão para a diminuição do pico de carga não é uma ideia nova. Foi usado na Califórnia, na primavera de 1948, quando devido ao clima muito seco, à falta de geração hidrelétrica e à falta de capacidades, tanto a tensão e a frequência foram reduzidas pela Pacific Gas and Electric Company (PG & E) a fim de reduzir a carga do sistema durante períodos de pico de carga. (MATAR, 1990)

Em 1973, durante o embargo do petróleo árabe, a Comissão de serviço público do estado de Nova York solicitou a todas as empresas de energia elétrica, sujeitas à sua autoridade, que reduzissem suas tensões de distribuição como meio de reduzir o consumo de energia. Os sistemas afetados por esta ordem foram Consolidated Edison, Niagara Mohawk, New York State Electric and Gas, Rochester Gas and Electric, Orange e Rockland, Central Hudson e Long Island lighting. A redução de tensão variou de 3 % para 5 %. Aparentemente, estes utilitários não tentaram quantificar as economias de energia resultantes da redução da tensão, nem manter um limite de tensão mais baixo de 114 volts a todos os pontos de fornecimento. Com o fim do embargo de óleo, utilitários de Nova York foram autorizados a retornar ao nível de tensão de serviço elétrico anterior. (MATAR, 1990)

Com o advento do embargo do petróleo em 1973 e subsequente cobertura da mídia da escassez de petróleo e o aumento dos preços, o conceito de redução de tensão como meio de reduzir o consumo de energia foi concebido. A mídia igualou a redução na demanda devido à tensão reduzida com uma redução no consumo de energia. Em resposta a este equívoco, American Electric Power (AEP) realizou um estudo de um ano para determinar e analisar o impacto da redução de tensão na utilização de energia e nível de demanda dentro de seu sistema. Os resultados deste estudo, em que a tensão foi reduzida em 5 % por um período de quatro horas todos os outros dias da semana, indicaram uma redução mínima total no uso de energia, de cerca de seis décimos de um por cento, e uma redução na demanda de três a quatro por cento. A AEP concluiu que essa redução de tensão como um meio de reduzir o uso de energia não era uma abordagem viável para o seu sistema, devido ao extenso investimento de capital necessário para implementar o programa e as mínimas economias em energia. (MATAR, 1990)

Em setembro de 1979, a AEP iniciou um segundo teste para avaliar o impacto de uma redução de tensão de 24 horas sobre o uso de energia e o nível de demanda. Neste teste, durante o qual a tensão foi reduzida em cinco por cento por um período de vinte e quatro horas, todos os dias, a AEP utilizou os mesmos circuitos de distribuição e seguiu o mesmo procedimento do primeiro estudo em 1973. Os resultados dos testes mostraram que a economia de energia proporcionada pela redução da tensão teve uma média de 3,55 % por um período de redução de vinte e quatro horas. Além disso, o teste mostrou que uma redução na demanda de aproximadamente 4.0 % foi realizada por um período de redução de tensão de vinte e quatro horas. (MATAR, 1990)

Em 1976 a Comissão de serviços públicos da Califórnia (CPUC) solicitou às empresas de energia elétrica, sujeitas à sua regulação, que instituíssem um programa de redução de

tensão ao cliente com a finalidade de reduzir picos de carga do sistema. Escassez de combustível, com o aumento dos preços e severas restrições sobre a construção de novas usinas geradoras, indicavam que esforços vigorosos de conservação eram necessários para evitar faltas de capacidade de energia. A Comissão baseou sua ação sobre a tática que tinha sido usada anteriormente, no leste e centro oeste para aliviar faltas de capacidade na década de 1950 e 1960. Enquanto essas reduções de tensão de emergência forem destinadas principalmente a reduzir os picos de carga do sistema, a Comissão acreditou que a conservação de energia a longo prazo poderia ser obtida, mantendo menores médias de tensão de serviço. Como resultado, a Comissão ordenou às empresas elétricas regulamentadas para reduzir a tensão de serviço de 126 volts para 122 volts, onde quer que esta redução pudesse ser implementada, sem qualquer despesa de capital extensa. A tensão de serviço mínima permaneceu em 114 volts. Para San Diego Gas and Electric Company, foi possível fazer reduções em 60 por cento dos circuitos de distribuição. De acordo com o San Diego Gas and Electric Company, "essas reduções foram feitas fora do horário de pico, uma vez que o mínimo de 114 volts já existia em condições de pico de carga". (MATAR, 1990)

Em 1979 uma nova gama de tensão de serviço foi instituída pelo CPUC, determinando uma tensão de serviço máxima de 120 volts. Isto foi uma redução de 6 V ou de 5 % sobre a faixa de tensão antiga de 114 a 126 volts. Utilitários afetados por esta ordem analisaram seus circuitos de distribuição e fizeram mudanças econômicas de modo a trazê-los para a conformidade. (MATAR, 1990)

A onda de calor do verão de 1988, juntamente com a seca e um crescimento econômico estável, levou o terminal de saída elétrico total dos E.U.A. às alturas, começando em junho e persistindo até o fim de agosto. Durante este período, os utilitários atenderam à alta demanda por reduções de tensão ligeira e incentivando medidas de conservação voluntária. Além disso, o elevado grau de integração de transmissão entre os diferentes sistemas dos utilitários ajudou no comércio de energia entre sistemas de utilitários vizinhos. (MATAR, 1990)

### 3 TESTE DA VIABILIDADE DE REDUÇÃO DE TENSÃO

#### 3.1 Introdução

O objetivo deste teste é descobrir se reduzir tensões nominais afeta negativamente fontes de iluminação residencial e pública. Em uma visão ampliada, este projeto visa validar pensamentos e dados existentes sobre a diminuição de tensões de distribuição.

Para aplicações residenciais, o teste será feito em lâmpadas CFL, LED e incandescentes. Os testes de iluminação pública só incidirão sobre o desempenho de fontes LED versus fontes de sódio de alta pressão (HPS), uma vez que são mais comumente usados. Testes serão realizados com as tensões nominais comuns para a maioria das casas no Brasil, que são 220 V ou 110 V. Testes de iluminação pública com LED usarão 240 V. Estes testes irão operar nas escalas de tensões nominais apropriadas, delineadas pela agência nacional de energia elétrica do Brasil (AGÊNCIA NACIONAL, 2008). Se houver pouco ou nenhum impacto significativo na qualidade da luz, distorção harmônica de corrente, fator de potência ou consumo de energia, seria benéfico para concessionárias e consumidores implementar essa medida.

O teste consistirá de análise de harmônicos, fator de potência, iluminância, potência de entrada e temperatura. Estes serão os fatores a serem considerados ao avaliar a eficiência e a viabilidade da fonte de luz.

Quando testamos as lâmpadas LED e CFL, o monitoramento de harmônicos e fator de potência é muito importante, uma vez que ambos os dispositivos são não lineares e podem criar correntes altamente distorcidas, que criam problemas de qualidade de energia.

O fator de potência de um sistema elétrico AC é definido como a razão entre a potência real fluindo pra carga e a potência aparente no circuito, e é um numero adimensional no intervalo fechado de -1 a 1. Um fator de potência menor que 1 significa que as ondas de tensão e corrente não estão em fase, reduzindo o produto instantâneo das duas ondas ( $V \times I$ ). A potência real é a capacidade do circuito de trabalhar em um tempo particular. A potência aparente é o produto da corrente e da tensão do circuito. Devido à energia armazenada na carga, enviada de volta à fonte, ou devido à uma carga não linear que distorce a forma de onda da corrente extraída da fonte, a potência aparente será maior do que a potência real. Um fator de potência negativo ocorre quando o dispositivo (que é normalmente a carga) gera energia que flui de volta para a fonte (normalmente considerado o gerador).

Em um sistema de energia elétrica, uma carga com um fator de potência baixo requer mais corrente do que uma carga com um alto fator de potência para a mesma quantidade de

energia útil transferida. As correntes mais elevadas aumentam a energia perdida no sistema de distribuição e exigem maiores fios e outros equipamentos. Devido aos custos de equipamentos maiores e desperdício de energia, utilidades elétricas geralmente irão cobrar um custo maior para os clientes industriais ou comerciais em que haja um baixo fator de potência.

Para resolver esse problema, os padrões são definidos para a iluminação de estado sólido de baixa e alta potência. Este trabalho seguirá o padrão nacional americano para os limites de emissões harmônicas. Essas normas podem ser vistas abaixo na tabela 3. A iluminação incandescente não precisa atender às normas de emissões harmônicas ANCI, uma vez que essas fontes são totalmente resistivas e não criam os mesmos problemas de qualidade de energia. Muito mais importante, a iluminância será usada como um indicador da eficácia à uma determinada tensão. A iluminância é a medida do fluxo de luminosidade total incidindo sobre uma superfície, por unidade de área e é medida em lux (lx).

Tabela 3 - Padrões de fator de potência e THD<sub>i</sub> para fontes compactas de luz

Potência de entrada (W)	Fator de potência mínimo	Máxima THD de corrente de linha (fundamental)
Potência ≤ 35W	0.5	200%
35W < Potência ≤ 60W	0.8	80%
60W < Potência ≤ 100W	0.9	50%
Potência > 100W	0.9	20%

Fonte: (N. E. M. ASSOCIATION, 2002)

### 3.2 Procedimento de teste

Para fontes de iluminação residencial, tensões nas faixas de 220 V - 200 V e 110 V - 95 V serão utilizadas, uma vez que estes são os intervalos de tensões nominais adequados, fornecidos ao consumidor. Estas tensões são reduzidas em um volt a cada um minuto, uma vez que foi verificado que não houve alteração significativa nos dados, em períodos de teste mais longos. As fontes de iluminação pública por LED serão testadas no intervalo de 240 V - 216 V, as lâmpadas HPS serão testadas na faixa de 220 V. Períodos de coleta de dados de cinco minutos serão utilizados, uma vez que foi verificado que períodos de teste mais longos foram necessários para um intervalo de dados estável. Durante estas experiências, dados serão coletados de duas formas: em primeiro lugar através de um sistema de coleta de dados

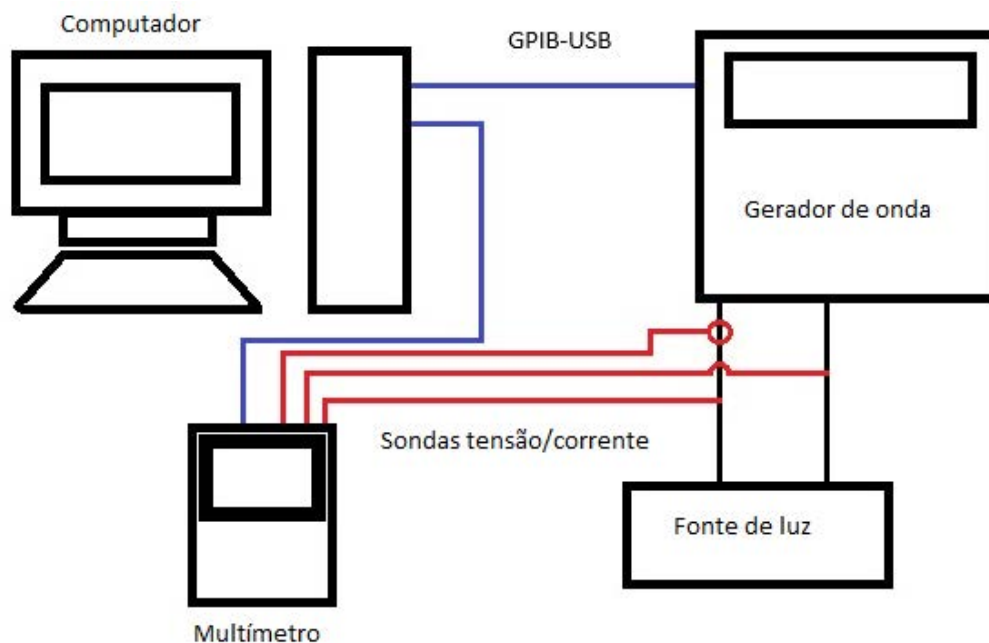


automatizada e em segundo lugar através de coleta manual. O método manual será usado para a coleta de características térmicas e de iluminância, enquanto que o método automatizado coletará os dados referentes ao fator de potência, harmônicas e potência consumida, associados ao sistema.

### 3.2.1 Coleta de dados automatizada

O processo de aquisição automatizada de dados de experimentos de lâmpadas utiliza uma fonte de alimentação controlável como uma fonte de tensão. Feita pela Pacific Power Source, a fonte de alimentação 435 AC/DC fornece ao usuário a capacidade de ajustar as formas de ondas e tensões na faixa de 0 V a 341 V para um, dois e três fases (PACIFIC POWER SOURCE, 2003). Controlado através de um computador usando operação GPIB, o usuário é capaz de ajustar a tensão e a frequência de saída como desejado. A coleta de dados é realizada através do analisador de qualidade de energia Fluke 345 com uma sonda Fluke Hall Effect Current. A Fluke 345 permite ao usuário entrar com dados em intervalos tão baixos quanto 30 segundos e é capaz de gravar uma grande coleção de dados. Uma vez coletados, os dados são analisados, usando o Power Log ou o MS Excel. Um esquema do equipamento pode ser visto abaixo.

Figura 3 - Esquemático da coleta de dados automatizada



Fonte: Produção do próprio autor

### **3.2.2 Coleta de dados manual**

O procedimento de coleta de dados manual é muito direto. Para testar as características de iluminância da fonte de luz, um medidor Lux é utilizado e colocado a um metro de distância da fonte de iluminação residencial e a três metros de distância de fontes de iluminação pública. O mesmo procedimento é utilizado para monitorar a temperatura. Uma câmera de imagens térmica FLIR é colocada a um ou três metros da fonte e usada para monitorar mudanças de temperatura. As medições são então registradas ao longo do teste e inseridas em uma planilha de Excel.

## **3.3 Resultados**

### **3.3.1 Distorção harmônica total**

Ao testar a iluminação residencial verificou-se que as lâmpadas de LED tiveram uma melhor desempenho, com THDis bem abaixo dos padrões. Todas as lâmpadas de LED tiveram pouco ou nenhum aumento durante o teste. A lâmpada de 5 W foi a única que teve um aumento na distorção quando testada na faixa de 110 V - 95 V. Este aumento foi visto gradativamente, à medida que a distorção oscilava aproximadamente entre 49,5 % e 54,5 %, ainda muito abaixo dos padrões da ANSI. Ao longo do teste, flutuações foram vistas em todas as lâmpadas, mas nenhuns resultados significativos puderam ser obtidos destas flutuações. Todas as lâmpadas CFL tiveram redução, mas somente as lâmpadas de 25 W e 15 W ficaram dentro dos padrões da ANSI. A lâmpada de 40 W teve valores bem fora dos padrões com um THDi em tensão nominal de 160,81 %, caindo para 155,5 %. As fontes de iluminação pública de LED e de HSP apresentaram níveis baixos de distorção. As lâmpadas LED tiveram uma tendência crescente de 10,01 % a 11,21 % para a THDi, em contraste com a tendência decrescente vista em lâmpadas de HSP.

Tabela 4 - Variações na THDi

Fonte de luz	Variação média total	Declínio médio
CFL 15W	7.84	-0.0088
CFL 25W	8.56	-0.0086
CFL 40W	5.65	-0.0054
LED 5W	1.97(110V)    0.44(220V)	0.001(110V)    -0.0008(220V)
LED 10W	0.6(110V)    1.92(220V)	-0.0007(110V)    -0.0012(220V)
LED 15W	1.44(110V)    2.54(220V)	-0.001(110V)    -0.0035(220V)
LED 70W	1.17	0.0001
HSP 170W	1.42	-0.0002

Fonte: Produção do próprio autor

### 3.3.2 Iluminância

As lâmpadas incandescentes tiveram a queda mais significativa na iluminância. Para cada redução de 1 V, houve aproximadamente uma queda de 3 lx da iluminância. A lâmpada de 150 W teve uma queda de 72 lx durante o teste inteiro e teve a menor queda total de iluminância para qualquer fonte de luz incandescente. Ambas as lâmpadas de CFL e LED tiveram uma redução gradual da iluminância. As maiores queda para ambas as fontes foram de 10,5 lx para um CFL 25 W, 110 V e de 6,3 lx para um LED 110 V, 10 W. As lâmpadas LED tiveram o melhor desempenho com uma queda média de iluminância de 2,27 lx. A iluminação pública de LED teve relativamente nenhuma alteração, com valores permanecendo ao redor de  $164,4 \pm 4$  lx. As lâmpadas de HSP tiveram uma diminuição total de 108,4 lx com uma inclinação de - 5,188 lx/s.

Tabela 5 - Variações na iluminância

Fonte de luz	Variação média total	Declínio médio
CFL 15W	6.2	-0.2926
CFL 25W	10.5	-0.6666
CFL 40W	5.7	-0.2703
LED 5W	2(220V)    2(110V)	-0.075(220V)    -0.79(110V)
LED 10W	1.9(220V)    6.3(110V)	-0.423(220V)    -0.098(110V)
LED 15W	2.5(220V)    1.1(110V)	-0.001(220V)    -0.113(110V)
INC 60W	26	-1.71
INC 100W	44.2	-2.941
INC 150W	72	-3.61
LED 70W	0.7	-0.023
HSP 170W	108.4	-5.188

Fonte: Produção do próprio autor

### 3.3.3 Características térmicas

Mudanças de temperatura na iluminação residencial tiveram dois resultados. Fontes CFL e de luz incandescente ou não experimentaram nenhuma mudança na temperatura ou experimentaram uma diminuição durante o período de teste. Em contraste, as fontes de LED tiveram aumento das temperaturas nos intervalos de 220 V e 110 V. Os aquecimentos observados em lâmpadas de LED focaram em torno do dissipador de calor. Esta área contém o lastro interno de luzes. Aumento de aquecimento nesta região pode causar problemas de longevidade com a fonte. As lâmpadas incandescentes tiveram a maior diminuição (de 10 °C para a lâmpada de 60 W). Ambas as lâmpadas de 100 W e 150 W não tiveram nenhuma mudança. Isto pode ser por causa das altas temperaturas e do tempo entre as mudanças de tensão. Semelhante às outras lâmpadas de LED, a fonte de 70 W teve um aumento de temperatura mesmo após um período de aquecimento longo, embora o aumento tenha sido de apenas dois graus sobre a totalidade do teste. Em contraste, a lâmpada HSP teve uma diminuição total de 7 graus, de 92 °C a 85 °C.

Tabela 6 - Variações na temperatura

Fonte de luz	Variação média total	Declínio médio
CFL 15W	0	-0.023
CFL 25W	5	-0.293
CFL 40W	3	0.104
LED 5W	2(220V)    2(110V)	0.151(220V)    0.287(110V)
LED 10W	11(220V)    3(110V)	0.216(220V)    0.483(110V)
LED 15W	6(220V)    2(110V)	0.073(220V)    0.237(110V)
INC 60W	10	-0.623
INC 100W	1	0.0221
INC 150W	0	0
LED 70W	2	-0.311
HSP 170W	7	0.124

Fonte: Produção do próprio autor

### 3.3.4 Fator de potência

As lâmpadas residenciais CFL e LED produziram alguns resultados interessantes. Todas as lâmpadas, com exceção da LED 15 W, 220 V e da LED 10 W, 100 V, tiveram fatores de potência fora dos padrões ANSI. Uma vez que este é o caso, o desempenho vai ser medido com base no aumento ou diminuição do fator de potência observado. As lâmpadas CFL mostraram pequenas flutuações nos valores, terminando em um aumento do fator de potência.

As flutuações começaram após 107 V para a lâmpada de 15 W, após 105 V para a lâmpada de 25 W e na lâmpada de 40 W, as flutuações começaram em aproximadamente 106 V, e continuaram no meio e fim do teste. Assim como as lâmpadas CFL, os fatores de potência das lâmpadas LED cresceram à medida que a tensão diminuía. As lâmpadas de 5 W tiveram o pior desempenho com os valores indo de 0,28 a 0,29 para 220 V e 0,40 a 0,44 para 110 V. Assim como as lâmpadas LED, as fontes de iluminação pública de LED tiveram um aumento de fator de potência de 0,82 a 0,86 e as lâmpadas de HSP tiveram uma diminuição de 0,93 a 0,91. Esses valores estão pertos ou dentro dos padrões comerciais.

Tabela 7 - Variações no fator de potência

Fonte de luz	CFL 15W	CFL 25W	CFL 40W	LED 5W	LED 10W	LED 15W	LED 70W	HPS 170W
Variação total	0.01	0.01	0	0.04(110V)  0.01(220V)	0.01(110V)  0.04(220V)	0.04(220V)	0.04	0.02

Fonte: Produção do próprio autor

### 3.3.5 Potência de entrada

Os valores de potência de entrada para as lâmpadas residenciais de CFL e de LED foram relativamente constantes. Para as lâmpadas CFL, houve uma diminuição de potência, com flutuações constantes, entre 121 segundos e 208 segundos, e a partir do fim deste intervalo, a potência permanece constante no seu menor valor durante o restante do teste. A fonte de LED 10 W testado na faixa de 110 V mostrou características semelhantes. A fonte de LED 15 W teve uma diminuição da potência de entrada ao longo do teste para ambas as faixas de tensão. As fontes incandescentes tiveram uma redução da potência de entrada sob a forma de uma função decrescente de degrau. Resultados semelhantes foram observados para a lâmpada de HPS. A fonte de 70 W teve uma flutuação de 72,83 W para 77,83 W durante o teste.

Tabela 8 - Variações na potência de entrada

Fonte de luz	INC 60W	INC 100W	INC 150W	CFL 15W	CFL 25W	CFL 40W	LED 5W	LED 10W	LED 15W	LED 70W	HPS 170W
Variação total	10.79	16.17	16.14	0	2.69	0	0(110V)  0(220V)	2  0(220V)	2  (220V)2	5	35.06

Fonte: Produção do próprio autor

## 4 CONCLUSÃO

Para aplicações de iluminação residencial, seria aconselhável reduzir tensões nominais. nenhuns ou poucos efeitos negativos significativos foram observados nas lâmpadas LED e CFL. A iluminação de estado sólido (LED) e por CFL tiveram o melhor desempenho com relação à variação de iluminância, como esperado, com variações muito menores que as experimentadas pelas lâmpadas incandescentes (variação média total máxima chega a 72 lx, para a lâmpada incandescente de 150 W). A iluminação por LED teve as menores variações nas iluminâncias, muitos menores distorções harmônicas e os maiores aproveitamentos de potências (maiores FP, de um modo geral), em comparação com a iluminação CFL.

Infelizmente, os fatores de potência para as lâmpadas LED e CFL estavam abaixo dos valores mínimos aceitáveis, mesmo para tensões nominais atuais. Embora o ocorrido, aumentos praticamente desprezíveis no fator de potência foram observados com a diminuição das tensões. A diminuição das tensões das lâmpadas LED e CFL, para o menor valor aceitável, para ambas as faixas, teria nenhum efeito visual significativo ou teria resultado em problemas de qualidade de energia (devido ao FP muito baixo).

Uma vez que as lâmpadas incandescentes são completamente resistivas, não houve preocupação com o fator de potência e a distorção harmônica. Somente uma pequena queda na tensão seria recomendada para esta fonte de iluminação, uma vez que haveria uma piora significativa no desempenho.

Quando a iluminação incandescente é gradativamente eliminada ou significativamente reduzida, grandes reduções de tensão podem ser feitas com pouco impacto para o consumidor. Uma queda de 10 volts nas escalas de 220 V e 110 V provocam apenas uma queda máxima de 2,7 lx em lâmpadas de LED e uma queda de 6,3 lx em lâmpadas de CFL. Esta queda no desempenho seria comum para lâmpadas incandescentes operando perto de tensões nominais.

Houve também pouca ou nenhuma mudança nas temperaturas da fonte.

Para aplicações de iluminação pública, a iluminação por LED teve o melhor desempenho, com praticamente nenhuma mudança significativa na iluminância (a variação chegou a ser menor do que as das lâmpadas LED residenciais), pequena distorção harmônica (comparável às lâmpadas LED residenciais) e fator de potência dentro dos padrões. Do outro lado, a iluminação por HSP, apesar de apresentar pequenas distorções harmônicas e fator de potência dentro dos padrões, apresentou variação na iluminância da ordem de 100 vezes maior que a experimentada pela iluminação pública por LED. Com base nisso, a iluminação pública por LED é mais viável em termos de qualidade de energia e economia de custos, na

aplicação da CRT. Apesar disso, a fonte HSP de 170 W continua sendo uma boa opção, uma vez que sua distorção harmônica e fator de potência é comparável aos mesmos do LED de 70 W e há locais em que se exige uma maior capacidade de iluminância (no caso, uma fonte LED de maior potência e iluminância equiparável sairia bem mais caro que a fonte HSP 170 W).

Para grandes reduções em tensões nominais, recomenda-se ao consumidor trocar para iluminação CFL ou LED, uma vez que haverá um impacto negativo significativo no desempenho das lâmpadas incandescentes. Os dados coletados mostram claramente a viabilidade para reduções de tensões nominais. Mesmo com pequenas reduções, existem possibilidades de economia que podem ser repassadas para os utilitários e consumidores.

## REFERÊNCIAS

FANG, XI; MISRA, S.; XUE, G.; YANG, D. **Smart Grid - The New and Improved Power Grid:A Survey**. VOL. 14, NO. 4, 2012.

ELLENS, W.; BERRY, A.; WEST, S. **A Quantification of the Energy Savings by Conservation Voltage Reduction**. 2012.

MCCARTHY, C.A.; JOSKEN, J. **Applying Capacitors to Maximize Benefits of Conservation Voltage Reduction**. 2003.

SCHNEIDER, K.P.; TUFFNER, F.K.; FULLER , J.C.; SINGH, R. **Evaluation of Conservation Voltage Reduction (CVR) on a National Level**. 2010.

WILSON, T.,L. **Energy conservation with voltage reduction-fact or fantasy**. 2002.

MATAR, KHALIL. **Impact of voltage reduction on energy and demand**. 1990.

N. E. M. ASSOCIATION. **Harmonic Emission Limits-Related Power Quality Requirements for Lighting Equipment**. Information Handling Services/Global Engineering Documents, Englewood, CO, 2002 .

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica**. 2008.

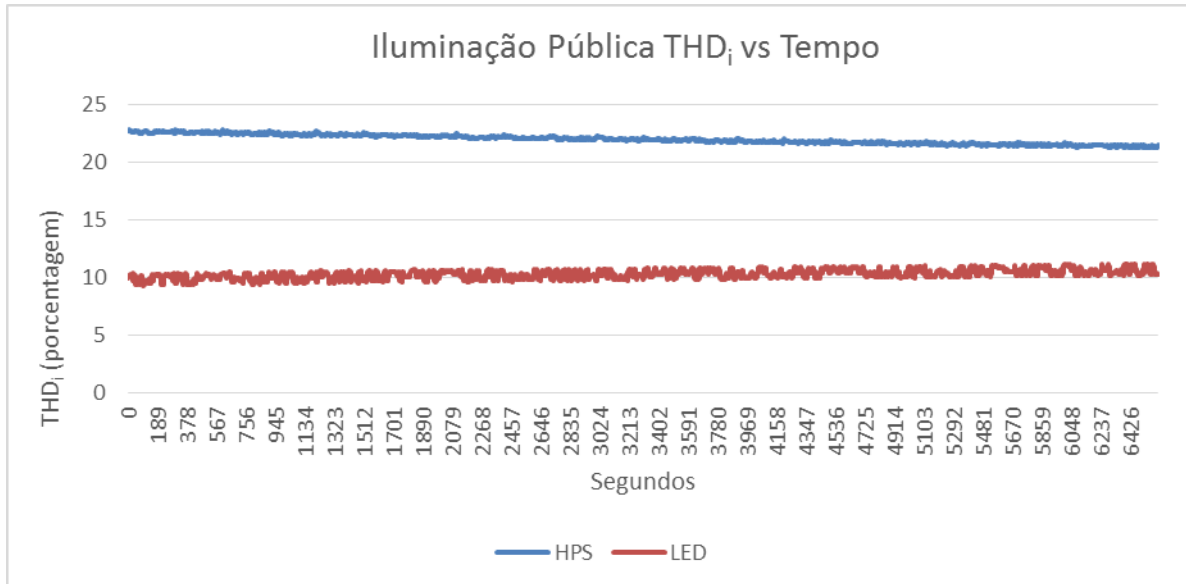
US DEPARTMENT OF ENERGY. **Applications of Automated Controls for Voltages and Reactive Power Management**. 2012.

PACIFIC POWER SOURCE, INC. **AMX-Series Operation Manual**. Irvine, California, 2003.



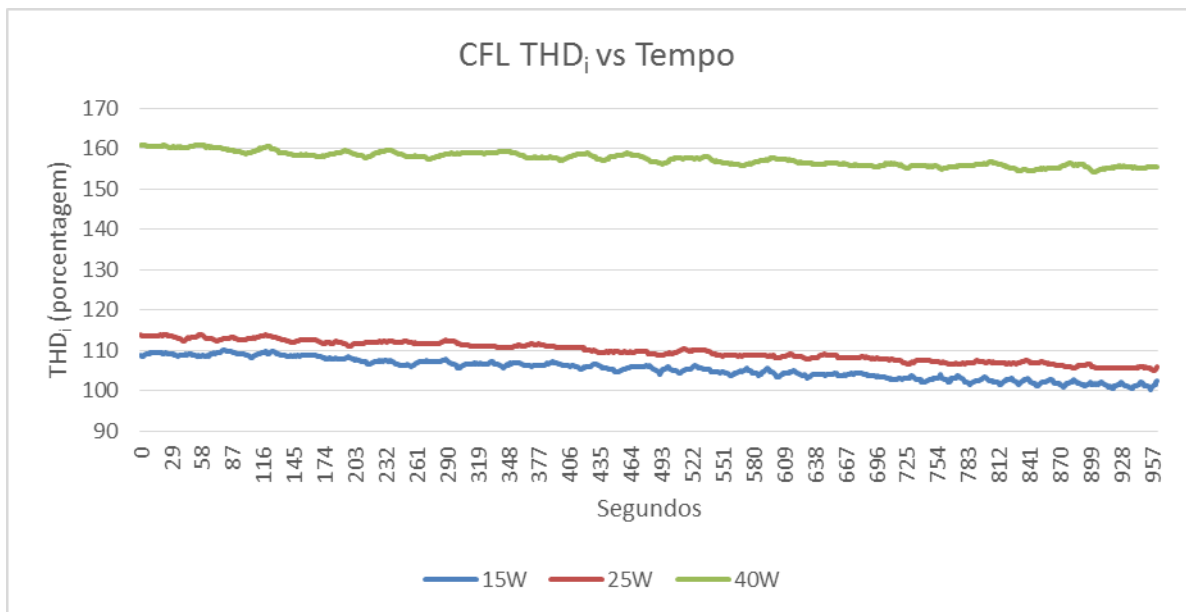
## APÊNDICE A - GRÁFICOS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS TOTAIS

Gráfico 1 - Iluminação pública x tempo



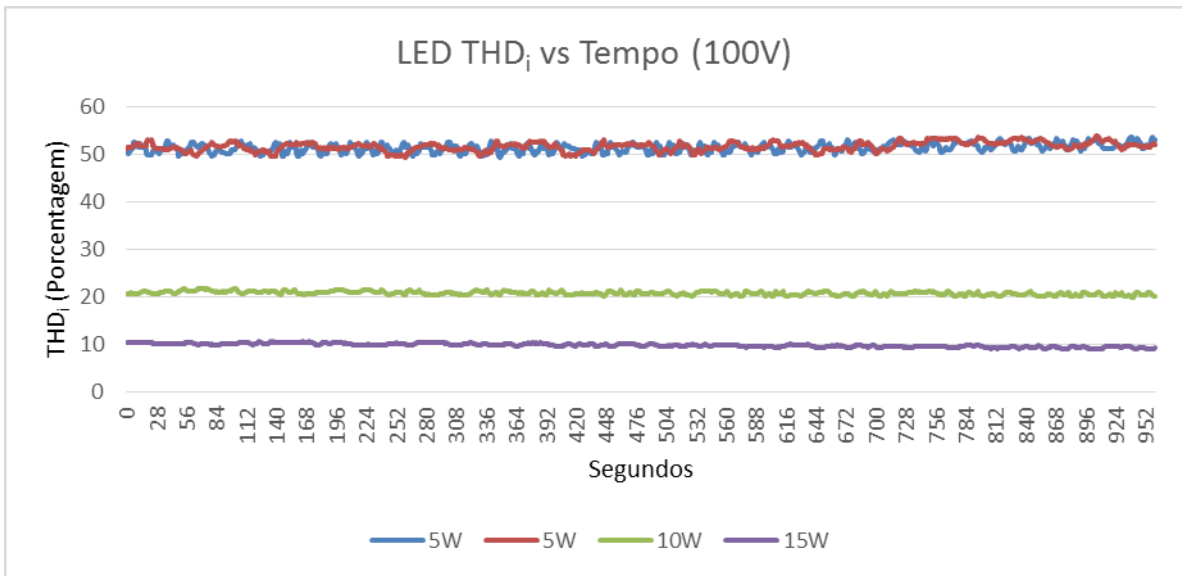
Fonte: Produção do próprio autor

Gráfico 2 - CFL x tempo



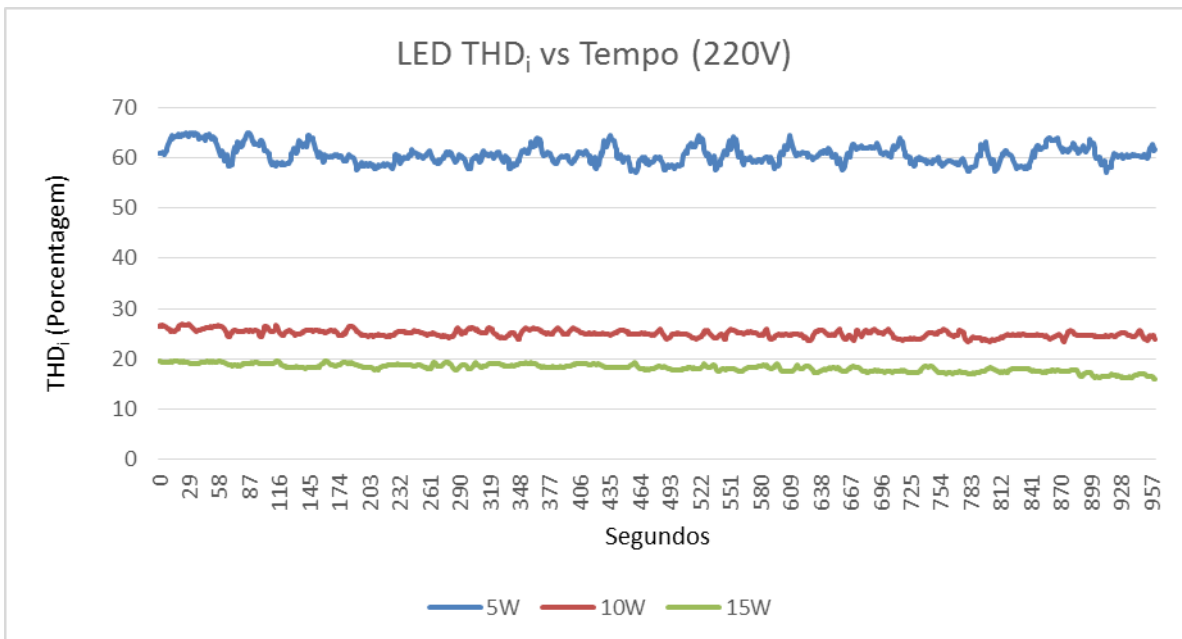
Fonte: Produção do próprio autor

Gráfico 3 - LED x tempo (100V)



Fonte: Produção do próprio autor

Gráfico 4 - LED x tempo (220V)



Fonte: Produção do próprio autor

**APÊNDICE B - DADOS DAS ILUMINÂNCIAS E TEMPERATURAS**

Tabela 9 - 70W LED

Tensão(V)	Temperatura (°C)	Iluminância (lx)
240	56	165.1
239	56	164.7
238	56	164.8
237	56	164.7
236	56	164.8
235	56	164.5
234	56	164.5
233	56	164.5
232	56	164.5
231	56	164.4
230	57	164.4
229	57	164.3
228	57	164.2
227	57	164.5
226	57	164.6
225	58	164.4
224	58	164.4
223	58	164.2
222	58	164
221	58	164.1
220	58	164.4
219	59	164.4
218	58	164.3
217	59	164.2
216	58	164.3
215	58	164.4

---

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 10 - 170W HPS

Tensão(V)	Temperatura (°C)	Iluminância (lx)
220	92	390.4
219	92	385.3
218	92	380
217	92	374.6
216	92	369
215	92	363.7
214	92	358.5
213	91	353
212	91	347.8
211	91	342.2
210	90	337.1
209	90	332
208	90	327.6
207	89	321.9
206	89	317
205	89	311.4
204	88	306.4
203	87	301.2
202	88	296.8
201	88	291.3
200	86	286.8
199	85	282

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 11 - 5W LED (220V)

Tensão(V)	Temperatura (°C)	Iluminância (lx)
220	53	43.5
219	52	43.4
218	51	43.5
217	52	43.3
216	53	43.1
215	52	43

214	53	42.9
213	54	42.8
212	43	42.7
211	53	42.7
210	53	42.6
209	54	42.6
208	55	42.5
207	55	42.4
206	54	42.4
205	55	42.3
204	55	42.2
203	56	42.2
202	56	42.1
201	56	42.1
200	56	41.8
199	55	41.7

---

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 12 - 5W LED (110V)

Tensão(V)	Temperatura (°C)	Iluminância (lx)
110	52	42.6
109	52	42.5
108	53	42.6
107	53	42.6
106	52	42.7
105	54	42.7
104	55	42.6
103	53	42.5
102	53	42.5
101	53	42.6
100	53	42.5
99	53	42.5
98	53	42.6
97	54	42.6

96	53	42.6
95	54	42.6

---

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 13 - 10W LED (220V)

Tensão(V)	Temperatura (°C)	Iluminância (lx)
220	60	97.9
219	62	97.9
218	62	97.7
217	63	97.6
216	63	97.5
215	64	97.3
214	65	97.2
213	65	97.1
212	65	97
211	66	96.9
210	67	96.9
209	67	96.8
208	67	96.4
207	68	96.1
206	68	96.3
205	69	96.3
204	70	96.2
203	70	96
202	70	96.2
201	70	96.1
200	70	96.1
199	71	96

---

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 14 - 10W LED (110V)

Tensão(V)	Temperatura (°C)	Iluminância (lx)
110	72	94
109	72	94
108	72	93.7
107	73	93.8
106	74	93.7
105	74	93.6
104	74	93.4
103	74	93.2
102	74	92.8
101	74	92.1
100	75	91.3
99	75	90.5
98	75	90
97	75	89.2
96	75	88.5
95	75	87.7

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 15 - 15W LED (220V)

Tensão(V)	Temperatura (°C)	Iluminância (lx)
220	67	161.7
219	68	161.5
218	68	161.4
217	68	161.3
216	68	161.2
215	69	161.1
214	69	161
213	70	160.8
212	70	160.7
211	70	160.6
210	70	160.5
209	71	160.5

208	71	160.3
207	71	160.2
206	71	160.1
205	72	160
204	72	159.8
203	72	159.7
202	73	159.6
201	73	159.6
200	73	159.3
199	73	159.2

---

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 16 - 15W LED (110V)

Tensão(V)	Temperatura (°C)	Iluminância (lx)
110	74	157.7
109	74	157.7
108	74	157.6
107	75	157.5
106	75	157.6
105	75	157.6
104	75	157.4
103	75	157.4
102	76	157.3
101	76	157.2
100	76	157.1
99	76	157
98	76	156.9
97	76	156.8
96	76	156.7
95	76	156.6

---

Fonte: Produção do próprio autor

---



Tabela 17 - 25W CFL

Tensão(V)	Temperatura (°C)	Iluminância (lx)
110	114	86.1
109	113	84.6
108	113	84.9
107	113	83.7
106	113	83.5
105	113	83.8
104	113	82.7
103	112	82.2
102	112	81
101	112	81.1
100	111	80
99	110	79
98	111	78.3
97	110	76.9
96	110	76.7
95	109	75.6

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 18 - 15W CFL

Tensão(V)	Temperatura (°C)	Iluminância (lx)
110	92	35.2
109	92	34.8
108	93	34.4
107	93	34.3
106	93	33.9
105	94	33
104	93	32.5
103	93	32.1
102	93	31.7
101	93	31.3
100	93	30.9
99	93	30.5

98	93	30.1
97	92	29.8
96	92	30
95	92	29

---

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 19 - 40W CFL

Tensão(V)	Temperatura (°C)	Iluminância (lx)
220	106	108.2
219	106	107
218	107	108.3
217	107	108.2
216	109	107.4
215	109	106.5
214	109	106.1
213	109	106.7
212	110	107.2
211	109	107.1
210	110	107
209	109	106.3
208	109	106
207	109	106
206	109	105.8
205	108	104.8
204	109	103.9
203	109	103.6
202	109	103
201	109	102.5
200	109	102.5

---

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 20 - 150W INC

Tensão(V)	Temperatura (°C)	Iluminância (lx)
220	150	253.4
219	150	249.5
218	150	245.7
217	150	241.8
216	150	238.0
215	150	234.1
214	150	230.4
213	150	226.7
212	150	223.0
211	150	219.2
210	150	215.6
209	150	212.0
208	150	208.4
207	150	204.7
206	150	201.4
205	150	198.0
204	150	194.6
203	150	191.2
202	150	187.9
201	150	184.6
200	150	181.4

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 21 - 100W INC

Tensão(V)	Temperatura (°C)	Iluminância (lx)
110	149	107.7
109	150	104.5
108	150	100.9
107	150	97.8
106	150	94.6
105	150	91.3
104	150	88.2

103	150	85.3
102	150	82.3
101	150	79.7
100	150	76.8
99	150	74.0
98	150	71.3
97	150	68.7
96	150	66.1
95	150	63.5

---

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 22 - 60W INC

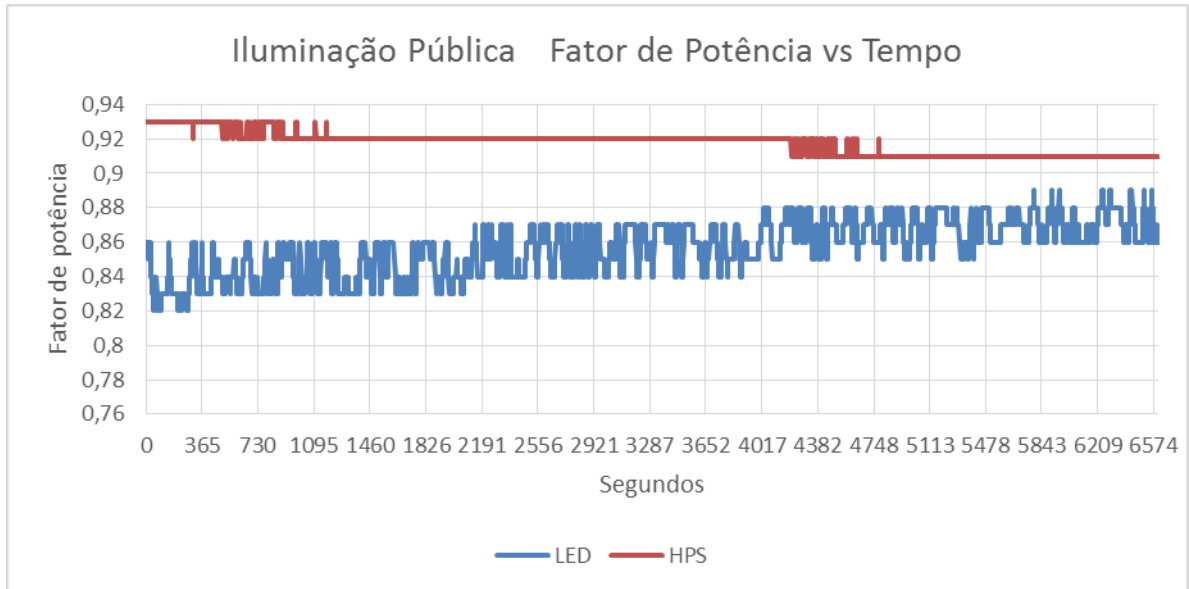
Tensão(V)	Temperatura (°C)	Iluminância (lx)
110	135	61.7
109	135	59.7
108	133	57.7
107	133	55.8
106	130	52.1
105	130	52.0
104	129	50.3
103	129	48.5
102	128	46.8
101	127	45.1
100	127	43.4
99	126	41.8
98	127	40.3
97	127	38.7
96	127	37.3
95	125	35.7

---

Fonte: Produção do próprio autor

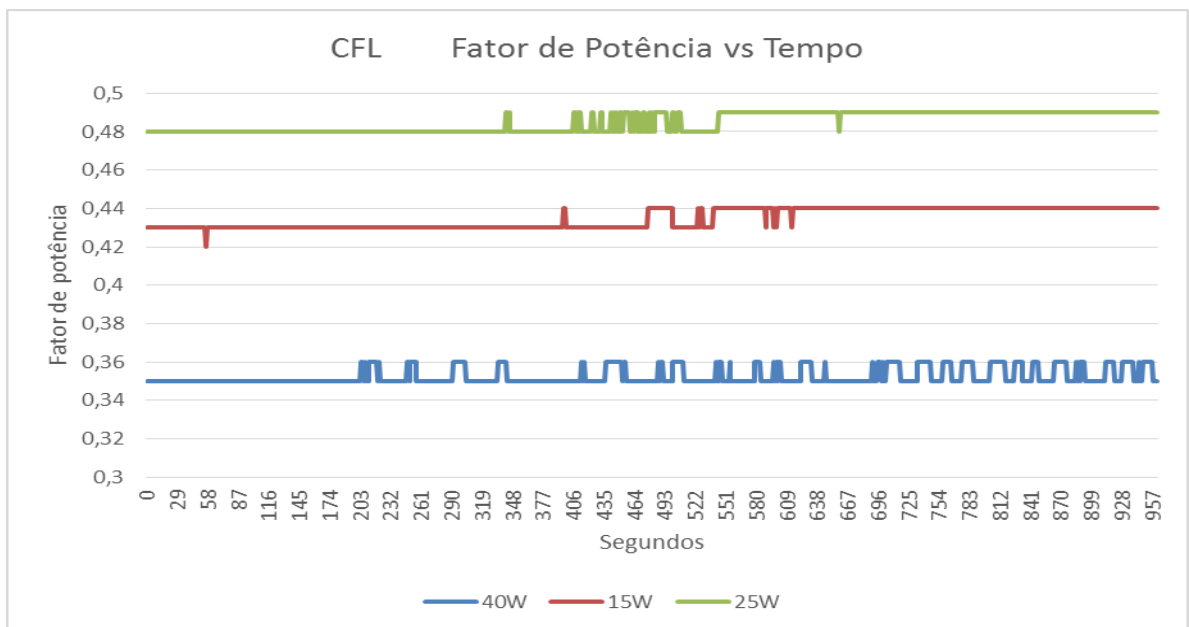
## APÊNDICE C - GRÁFICOS DOS FATORES DE POTÊNCIAS

Gráfico 5 - Iluminação pública x tempo



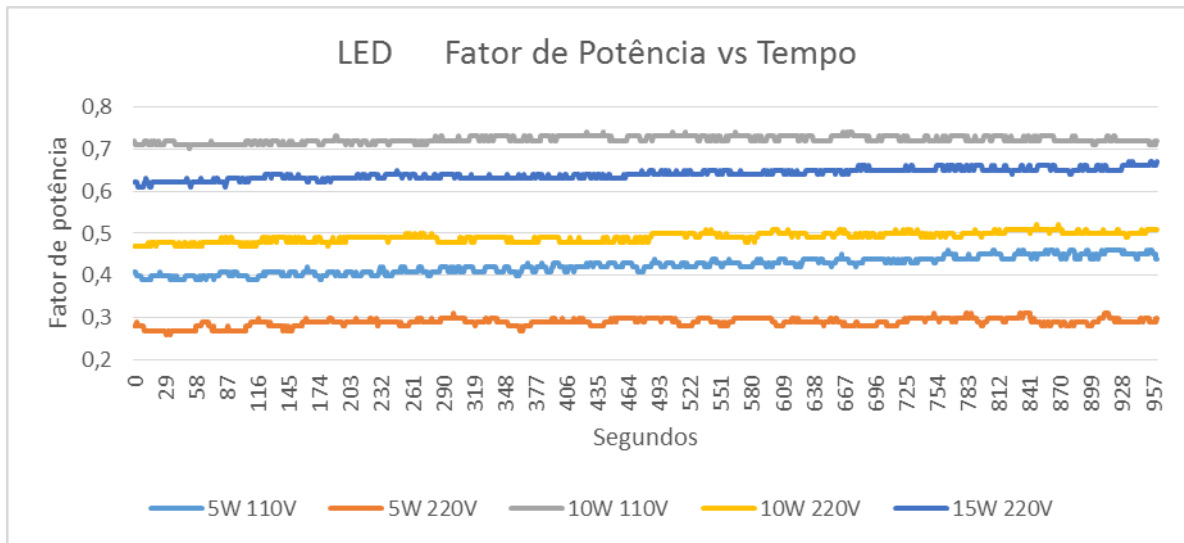
Fonte: Produção do próprio autor

Gráfico 6 - CFL x tempo



Fonte: Produção do próprio autor

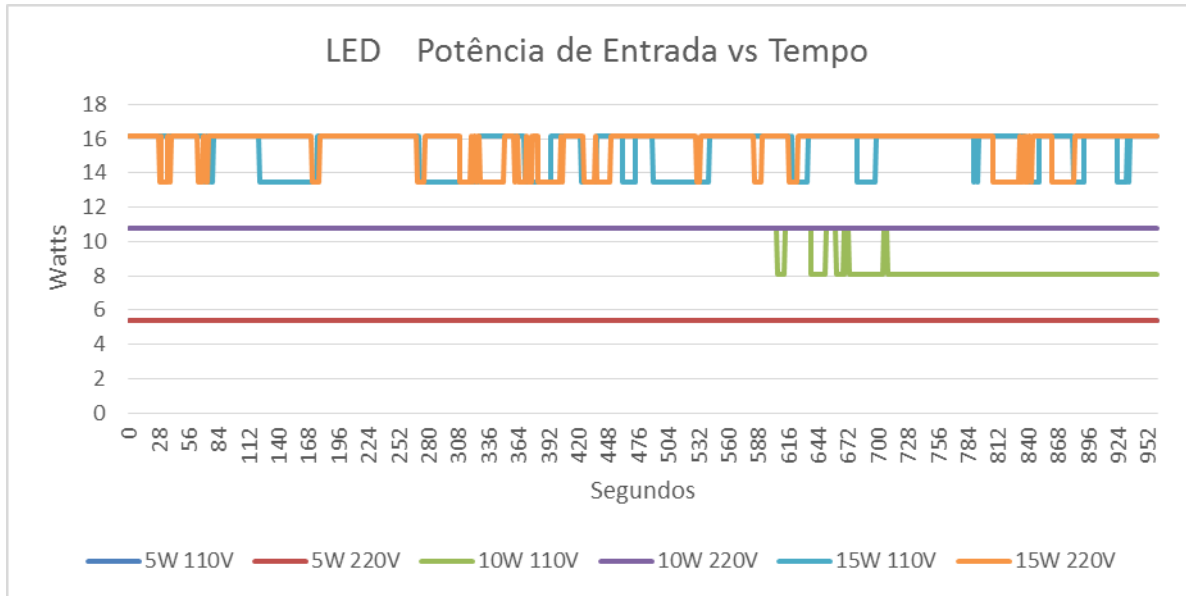
Gráfico 7 - LED x tempo



Fonte: Produção do próprio autor

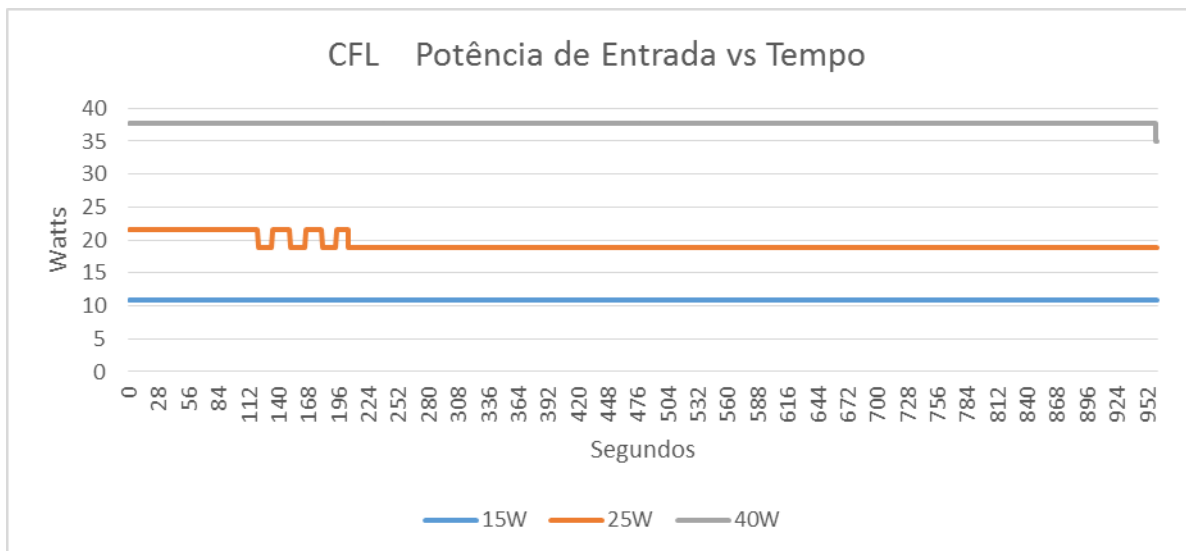
## APÊNDICE D - GRÁFICOS DAS POTÊNCIAS DE ENTRADAS

Gráfico 8 - LED x tempo



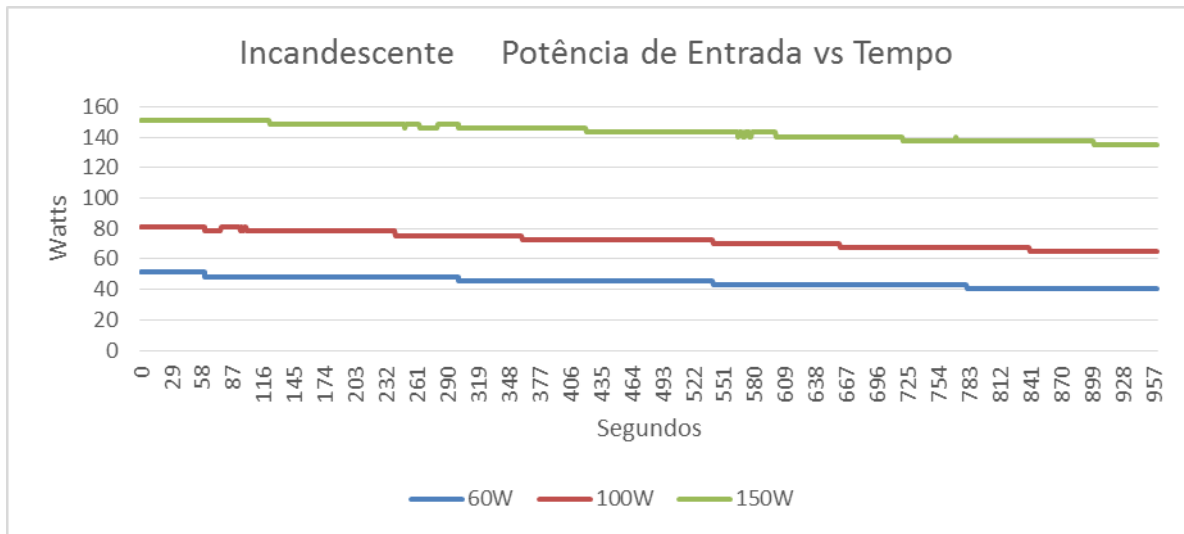
Fonte: Produção do próprio autor

Gráfico 9 - CFL x tempo



Fonte: Produção do próprio autor

Gráfico 10 - Lâmpada incandescente x tempo



Fonte: Produção do próprio autor