

ELVO CALIXTO BURINI JUNIOR

**RACIONALIZAÇÃO NO USO DE ENERGIA
ELÉTRICA:
A LÂMPADA INCANDESCENTE**



**DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA
INTERUNIDADES DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENERGIA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO PARA
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENERGIA.**

SÃO PAULO

1993

621.31:621.326

B 958r

*Biblioteca
Prof. Fonseca Telles*

INSTITUTO DE ELETROTÉCNICA E ENERGIA USP
BIBLIOTECA Prof. Fonseca Telles

*Cópia nº 18, ao
Programa Interunidades de
Pós-Graduação em Energia da
USP.*

ELVO CALIXTO BURINI JUNIOR

**RACIONALIZAÇÃO NO USO DE ENERGIA
ELÉTRICA:
A LÂMPADA INCANDESCENTE**

**Dissertação apresentada ao Programa
Interunidades de Pós-Graduação em Energia
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Energia.**

**Área de Concentração:
Engenharia de Iluminação**

**Orientador:
Prof. Dr. José Roberto Moreira**

**São Paulo
1993**

**Às mestras e aos mestraços,
pelo quinhão do conhecimento,
silêncio e compreensão,
que sem esmorecer permitem
a transformação de ideais em
realidade.**

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares, pelo estímulo, suporte e privação de minha companhia durante este feito.

Aos meus amigos, colegas e orientadores, pelo permanente apoio, auxílio e incentivo.

A todos os que permitiram, investiram e colaboraram com a realização deste modesto trabalho.

SUMÁRIO

Lista de figuras	IV
Lista de tabelas	VI
Lista de abreviaturas	VIII
Lista de símbolos	IX
Resumo	X
"Abstract"	XI
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1 Histórico dos iluminantes	5
2.2 A fonte incandescente e os iluminantes elétricos	11
2.3 A busca da vida economicamente ótima	16
2.4 Procedimentos de cálculo	20
3 ASPECTOS TECNOLÓGICOS	29
3.1 Componentes da lâmpada	29
3.2 Qualidade e o uso de tecnologia	35
3.3 O ciclo regenerativo dos halogênios	39
3.4 O gás criptônio	42
3.5 Filtro refletor de infravermelho	45

4	RACIONALIZAÇÃO ENERGÉTICA	49
4.1	O Procedimento elaborado	51
4.2	Tensão elétrica de trabalho	53
4.3	Custo adicional para a lâmpada	56
4.4	Resultados teóricos	60
4.4.1	A vida econômica da lâmpada de 60 W	62
4.4.2	O custo unitário da luz	63
4.4.3	A variação no custo da luz pelo preço da lâmpada	64
5	CONCLUSÕES	66
5.1	Eficiência otimizada	67
5.2	Custo da luz	67
5.3	Expectativa de vida	69
5.4	Um programa para as lâmpadas	69
5.5	Preço da lâmpada	70
5.6	Recomendações específicas	70
5.6.1	Normalização	71
ANEXOS		73
A	CRONOLOGIA	73
B	PREÇO DE LÂMPADA	74
C	PREÇO DA ENERGIA ELÉTRICA	76
D	CONSUMIDOR MÉDIO DE ENERGIA ELÉTRICA	78
E	TENSÃO ELÉTRICA DE TRABALHO E QUEDA ADMISSÍVEL	82
F	DADOS DE LÂMPADAS AO LONGO DE 16 ANOS	86
G	DADOS DE LÂMPADAS AMERICANAS	87

H	DEMONSTRAÇÃO DO PROCEDIMENTO ELABORADO	88
I	A DIMENSÃO DO MERCADO	93
J	EXPOENTES E IDENTIFICAÇÃO DE LÂMPADAS	95
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

LISTA DE FIGURAS

1.0 - O custo da luz para o mercado americano	2
3.1.1 - Componentes da lâmpada na fase de montagem	30
3.1.2 - Emissividade espectral de materiais à 2000 K	32
3.1.3 - Distribuição da energia emitida por filamentos de tungstênio de mesma potência mas com temperaturas diferentes	33
3.2.1 - Uma lâmpada incandescente montada	36
3.3.1 - Mecanismo simplificado do ciclo regenerativo do iodo	41
3.5.1 - Lâmpada incandescente com filamento à 2800 K emite 8 % da potência de entrada na forma de luz. a) bulbo convencional com significativa emissão de calor. b) bulbo com "IRF": emitindo a mesma quantidade de luz que o bulbo convencional e consumindo 30 % menos eletricidade	47
4.0 - O desenvolvimento das lâmpadas	50
4.2.1 - Eficiência e tensão de projeto para lâmpadas incandescentes com filamento de tungstênio (100 W e 40 W)	54
4.5.1 - Vida otimizada ao longo do tempo obtida pelo método original discutido no capítulo 4	63
4.5.2 - Custo da luz para a população	64
4.5.3 - Variação no custo da luz para a população em função da variação no preço da lâmpada de 60 W	65
5.3 - Diferença de custo da luz para a sociedade	68
B.1 - Preço das lâmpadas (≤ 60 W) ao longo do tempo	75
C.1 - Preço da energia elétrica para o setor residencial, estratificado por faixa de consumo, em função do tempo	76
J.1 - Características da lâmpada incandescente em torno da sua tensão nominal. Fonte: Levantamento experimental realizado pelo autor	95
J.2.1 - Variação da resistência elétrica do filamento em função da tensão elétrica aplicada - filamento de carbono sem tratamento	97
J.2.2 - Variação da resistência elétrica do filamento em função da tensão elétrica aplicada - filamento de carbono "metalizado"	98

J.2.3 - Variação da resistência elétrica do filamento em função da tensão elétrica aplicada - filamento de tungstênio . . .	99
--	-----------

LISTA DE TABELAS

2.1.1 - EVOLUÇÃO DA EFICIÊNCIA EM LÂMPADAS CONVENCIONAIS, PRINCIPALMENTE DE POTÊNCIA NOMINAL DE 100 W . . .	13
2.1.2 - EFICIÊNCIA EM LÂMPADAS COM "NOVAS TECNOLOGIAS" E POTÊNCIA NOMINAL DIFERENTE DE 100 W	14
4.5.1 - RAZÃO ENTRE O CUSTO DE LÂMPADA PELO CUSTO UNITÁRIO DA ENERGIA ELÉTRICA, PARA ALGUNS NÍVEIS DE CONSUMO - VALORES EM (US\$/US\$/kWh) kWh	60
4.5.2 - RAZÃO ENTRE OS VALORES DA TABELA 4.5.1 PELA POTÊNCIA NOMINAL DE LÂMPADA. PARÂMETRO: ALGUNS NÍVEIS DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA	61
4.5.3 - RESULTADOS DOS CÁLCULOS TEÓRICOS PARA A VIDA OTIMIZADA DE LÂMPADAS INCANDESCENTES VALORES EM HORAS	62
A - CRONOLOGIA	73
B.1 - VARIÇÃO NO PREÇO DAS LÂMPADAS DO MERCADO LOCAL EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA NOMINAL	74
D.1.1 - CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA - CLASSE RESIDENCIAL - 1989	78
D.1.2 - CONSUMO MÉDIO DE ENERGIA ELÉTRICA	79
D.1.3 - PANORAMA ATUAL DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA - VALORES EM TWh	81
E.1 - TENSÕES NOMINAIS E LIMITES, OFICIALMENTE ESTABELECIDOS NO BRASIL	82
E.3 - TENSÕES DE TRABALHO PARA USO NO SETOR RESIDENCIAL SEGUNDO AS QUEDAS DE TENSÕES	84
F - RESULTADOS DE MEDIÇÕES E DETERMINAÇÕES DE CARACTERÍSTICAS DE LÂMPADAS	86
G - COMPÊNDIO DE LÂMPADAS AMERICANAS(CARACTERÍSTICAS)	87
I.1 - QUANTIDADE DE LÂMPADAS INCANDESCENTES VENDIDAS NO MERCADO BRASILEIRO NOS ÚLTIMOS ONZE ANOS . . .	93
I.2 - PRODUÇÃO DE LÂMPADAS INCANDESCENTES POR TIPO - BRASIL - 1991	93
I.3 - PRODUÇÃO DE LÂMPADAS POR POTÊNCIA E NECESSIDADE DE SUPRIMENTO DEMANDADO	94

I.4 - MERCADO BRASILEIRO DE LÂMPADAS INCANDESCENTES
DIVIDIDO ENTRE AS MARCA MAIS VENDIDAS 94

J.1 - COEFICIENTES DE EXPOENTES DADOS NA LITERATURA E
OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE DE LÂMPADAS
INCANDESCENTES DO MERCADO BRASILEIRO 96



LISTA DE ABREVIATURAS

- A.C. - antes da era cristã
- C C - corrente elétrica contínua
- Corp. - " Corporation "
- cp - " candle power "
- E - 27 - rosca (de base de lâmpada) tipo Edison
(diâmetro externo aproximado de 27 mm)
- EUA - Estados Unidos da América
- GEM - "General Electric Metallized"
- hp - "horse power"
- IES - "Illuminating Engineering Society of North América"
- INC - incandescente
- IRF - "Infrared Reflecting Film"
- LVSAP - lâmpada a vapor de sódio à alta pressão
- LVSBP - lâmpada a vapor de sódio à baixa pressão
- MCF - " Fluorescent lamps "
- MBF - " Phosphor-coated mercury lamps "
- MBI - " Metal halide lamps "
- SON - " High pressure sodium lamps "
- SOX - " Low pressure sodium lamps "
- PAR - " pressed reflector lamp "

LISTA DE SÍMBOLOS

W - watt

GW - gigawatt (10^9 W)

US\$ - unidade monetária: dólar americano

h - hora

¢ - centavo (10^{-2} de US\$)

kWh - quilowatt-hora (10^3 W.h)

% - porcentagem

TWh - terawatt-hora (10^{12} W.h)

m - metro

mm - milímetro (10^{-3} m)

nm - nanometro (10^{-9} m)

μ m - micrometro (10^{-6} m)

lm - lúmen

V - volt

\int - integral de uma função

K - grau Kelvin

Δ - diferença (delta)

ppm - partes por milhão

Kr - criptônio

Ar - argônio

ℓ - litro

mℓ - mililitro (10^{-3} ℓ)

°C - grau Celsius

≈ - aproximadamente

RESUMO

A potência elétrica instalada no Brasil, necessária para suprir a carga composta pelas lâmpadas incandescentes é significativa (16 GW) e seus custos associados em geração, transmissão, distribuição e manutenção, requerem um apreciável volume de investimentos pela sociedade.

Assim, partindo de uma análise técnico-econômica, com base em séries históricas de preços de energia elétrica e de lâmpadas, superiores a dois anos, e meta de racionalização energética em usos finais, este trabalho indica a existência de alternativas técnicas e institucionais vantajosas, a todas as partes envolvidas, a serem usadas na iluminação, pelo setor residencial.

O trabalho apresenta contribuição original quando descreve um método de cálculo da vida nominal de lâmpadas incandescentes, otimizando-a em função do custo do lúmen-hora. É feita uma revisão histórica e são apresentados resultados obtidos, a partir do método desenvolvido e da aplicação das formulações disponíveis nos métodos encontrados na literatura.

O ponto de operação e a eficiência das lâmpadas produzidas para o mercado nacional podem ser incrementados pelo uso de conhecimentos e tecnologias disponíveis. As alterações devem ser implementadas a partir da mudança de alguns requisitos mínimos, contidos na especificação brasileira.

Os cálculos indicam que 68 % dos consumidores brasileiros têm gasto médio anual de até 42×10^6 US\$ pela operação das lâmpadas de 60 W nominais fora do ponto ótimo.

Usando a prerrogativa de que não deve ser alterado o fluxo luminoso nominal prescrito em norma, este trabalho mostra que as lâmpadas incandescentes, a partir de 60 W, devem ter sua vida nominal e potência de trabalho reduzidas, sem mudança do valor da potência nominal, para evitar transtorno ao consumidor. Isto proporciona a redução do custo do benefício (luz) ao consumidor; o estado e a sociedade podem expandir os benefícios sociais advindos da utilização da energia elétrica, sem a necessidade de investimentos adicionais em geração, transmissão e manutenção; e o fabricante, que além de poder oferecer o produto com real melhora de qualidade, terá ainda receitas e o seu mercado local expandidos.

ABSTRACT

Installed electric power to feed incandescent lighting in Brazil is significant. Most of these lamps are used during the peak power demand and require 16 GW. The costs involved are very expressive and paid by the society.

Through a technical-economic analysis using historical price of electricity and lamp bulbs prices collected during the last two years and evaluation of the amount of saved energy we were able to identify cost-effective alternatives to all participants of the country economy. The analysis is directed only to the residential sector, since this is the major user of this technology.

Operational parameters and the efficiency of light bulbs produced for the Brazilian market can be optimized with the use of well known and available technologies. Some modifications must be performed with re-edition of the specification set by the Brazilian norms.

Evaluations performed concluded that 68 % of the Brazilian electricity users are loosing up to US\$ 42 millions per year due to the operation of 60 W light bulbs out of the optimized operational point.

Assuming that the present luminous fluxes established in the Brazilian standards should be preserved, incandescent light bulbs with 60 W and up should have their nominal life and power reduced. We recommend that the nominal power should be kept on the package to avoid unnecessary difficulty to buyers. Such reduction will decrease lighting cost for the final user, and the State. Thus, society will be able to expand the social benefits of bringing electricity to new users without additional investments in generation, transmission and maintenance of the electric system. As a consequence the light bulb manufacturers will be able to produce a lamp with high quality and will see their market expanded.

1 - INTRODUÇÃO

Imbuídos da intenção de aliar conhecimentos das áreas de engenharia, energia, e economia, buscamos a partir deste estudo, apontar a existência de viabilidade técnico-econômica para um redimensionamento de algumas características das lâmpadas incandescentes em uso domiciliar no Brasil. Em especial, procuramos verificar se a vida nominal destas lâmpadas é adequada ou carece de algum ajuste, no sentido de propiciar uma melhoria da sua eficiência em serviço.

Deste modo, fizemos inicialmente levantamento bibliográfico dos trabalhos que têm como preocupação este assunto e a coleta das informações básicas e necessárias ao seu desenvolvimento, de forma a podermos balizar o desempenho destas lâmpadas incandescentes, em nível nacional e internacional.

Os dados são relativos aos preços das lâmpadas e da energia elétrica e ao comportamento das características destas lâmpadas ao longo da sua vida útil, ou seja as depreciações do seu fluxo luminoso e potência.

O uso destas informações da lâmpada, em conjunto com o método de cálculo original que desenvolvemos, pode conduzir a um valor de vida economicamente ótimo, que é a vida para a qual será mínimo o custo da luz produzida.

Nos casos em que a vida econômica calculada seja inferior à vida nominal projetada (1000 horas), poderemos sugerir, como uma contribuição à conservação de energia, e sobretudo, como um avanço na utilização deste dispositivo, a redução da vida nominal projetada para o valor calculado, mantendo-se, porém, inalterado o seu fluxo luminoso nominal.

Obter-se-ia desta forma um aumento na eficiência global e uma conseqüente redução da potência instalada, pois a lâmpada assim pretendida pode ter potência e tensão nominais inferiores àquelas atualmente normalizadas.

As características do sistema elétrico (em particular a distribuição, que hoje utilizamos) foram condicionadas segundo um compromisso entre as perdas deste e a eficiência da lâmpada incandescente. Se por algum motivo, a lâmpada incandescente não tivesse sido a primeira fonte comercial de luz a ser produzida em larga escala, seguramente as características do sistema, como frequência e tensão teriam sido estabelecidas em valores bem diferentes²⁵.

Como um exemplo, apresentamos na figura 1.0 o custo da luz elétrica, ao longo deste século, para o mercado americano.

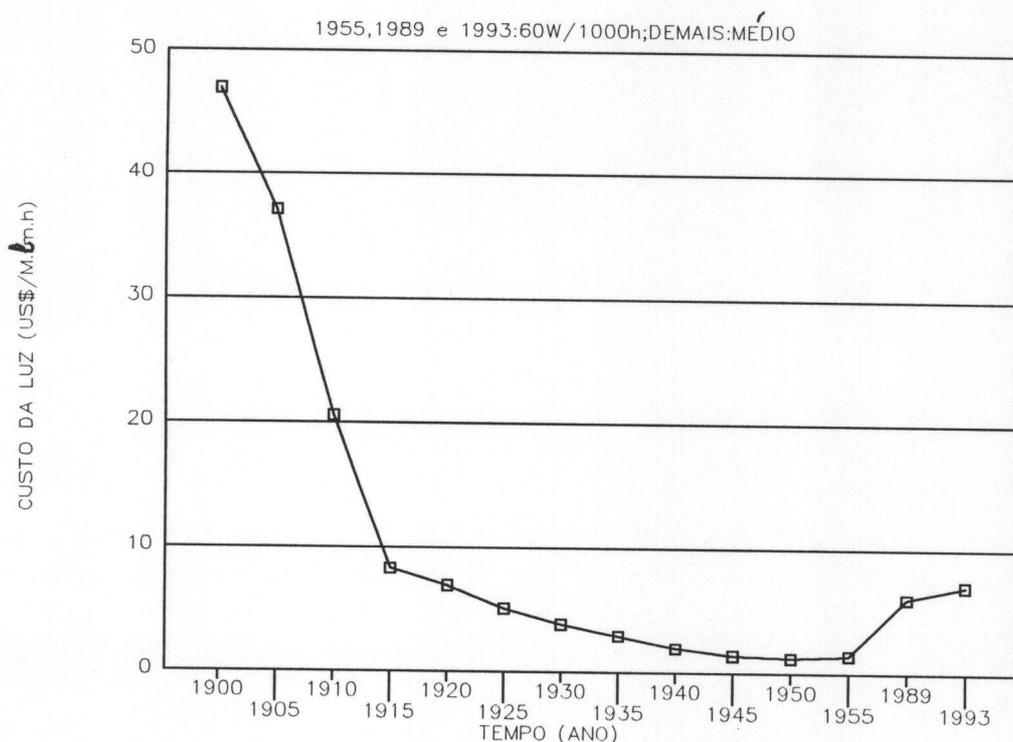


Figura 1.0 - Custo da luz elétrica para o mercado americano

Esta figura foi elaborada a partir de informações extraídas de referências bibliográficas^{25,91} e mostra, sobretudo, a preocupação americana em conhecer e acompanhar o custo da luz produzida por suas lâmpadas ao longo do tempo.

Nesta figura 1.0 podemos identificar dois períodos, a saber:

a) 1900 - 1955, com predomínio acentuado de quedas nos preços das lâmpadas (maior que 10:1, até 1945, quando tivemos preços de 10 ¢US\$ e 15 ¢US\$, para 60 W e 100 W, respectivamente) e energia elétrica (da ordem de 5:1, em 1956 com preço de 1,5 ¢US\$/kWh); e

b) 1955 - 1993, onde predominou a elevação de ambos os preços. Esta parte da figura é referente à 60 W nominais, enquanto o período anterior representa o custo médio da luz, inclusive com as demais potências e tecnologias.

Aspectos econômicos da engenharia de iluminação que consideram o desempenho do sistema iluminante como um todo, desde a escolha adequada dos condutores⁹⁴ até a definição dos intervalos de limpeza e manutenção são tratados na literatura^{19,20,23,31,39,42,43,44,56,67,79}. Sem dúvida, todos estes aspectos têm certo grau de importância, mas decidimos neste trabalho fixar nossa atenção apenas na fonte luminosa incandescente e nas alternativas^{73,77,86,87,104} de melhoria ao processo de geração de luz.

O incentivo à utilização de lâmpadas mais eficientes, como as fluorescentes e fluorescentes de base única (compactas), em substituição às lâmpadas incandescentes tem se fixado, além da economia^{68,88,100}, na redução da emissão de poluentes^{98,101}, sobretudo do mercúrio. Isto ocorre, principalmente, quando o parque de geração é basicamente térmico e queima combustíveis como o carvão ou outro combustível que também libera mercúrio neste processo.

Assim, acreditamos que a massificação da utilização de tais tecnologias, em países com este perfil de geração, é extremamente salutar. O Brasil não possui tal perfil, tão pouco existe um programa para evitar a contaminação decorrente do descarte, em quantidade apreciável, destas lâmpadas ou do mercúrio nelas contido¹⁰².

A área de certificação de produtos para iluminação ainda é muito pouco desenvolvida no Brasil, em relação aos outros países⁵⁴, principalmente por falta de investimentos. A recém criada lei de defesa do consumidor parece estar contribuindo para a conscientização dos produtores de que a certificação é necessária e também pode servir como um instrumento de defesa aos seus produtos.

Face às possibilidades deste trabalho* poder ser estendido e dada a peculiaridade dinâmica de alguns de seus resultados, resolvemos pela sua continuidade, além do desenvolvimento de um procedimento que pode ser considerado original (conforme a literatura consultada) para o cálculo da vida economicamente ótima, sob as condições correntes de preços de lâmpada e energia elétrica, e nos encorajamos a apresentá-lo como nossa dissertação ao mestrado.

* A base deste trabalho foi estabelecida a partir de trabalho da disciplina Conservação e Impactos, cujo título é **A eficácia da incandescência**

2 - REVISÃO DA LITERATURA

2.1 HISTÓRICO DOS ILUMINANTES

Até chegarmos à incandescência elétrica, atualmente utilizada para fins de iluminação, trilhamos caminhos de constante aprendizado, tendo alavancas tecnológicas como marcos importantes. O objetivo desta seção é esboçar esta trajetória, de forma a estabelecer um referencial histórico no desenvolvimento dos sistemas iluminantes ou das fontes artificiais de luz, até chegar a utilização comercial do princípio da incandescência.

Nos tempos primitivos, ao dominar a técnica de fazer o fogo, naturalmente emergiram as vantagens de utilizá-lo para iluminar ambientes por meio de tochas e fochos. Mais tarde, uma seção de bambu, preenchida com mechas de fibras retorcidas e gordura animal provavelmente deu origem à primeira vela.

O conceito lâmpada é posterior, pois a ele está associada a idéia de utensílio (composto, principalmente, de reservatório, que contém combustível). A lâmpada pré-histórica é de pedra entalhada, com face côncava, onde o combustível ardia.

No período da história antiga, quem primeiro utilizou lâmpadas foram as civilizações egípcia e mesopotâmica³⁴. As lâmpadas em forma de concha, fabricadas na Palestina, têm data aproximada de 1600 A.C. (aproximadamente 3600 anos de idade)³⁴. Porém, a forma clássica das lâmpadas e a generalização de seu emprego ocorreu nos tempos gregos (o bronze já era usado), em iluminação doméstica e, principalmente, nos templos como indicativo da presença de um deus³⁴.

Séculos mais tarde, entre os romanos, o tipo mais comum era feito em terracota, com pavio colocado numa abertura. Os romanos também faziam lâmpadas com metais como o ferro, o cobre, a prata e o ouro³⁴.

Em livros hebreus encontram-se menções sobre as lâmpadas domésticas, as quais variavam em forma e substância graxa aproveitada²¹. Outros registros indicam a utilização de lanternas, a gás natural, pelos chineses, alguns séculos antes da era cristã³⁴. Porém, no hemisfério ocidental, somente na segunda metade do século XVII foi que o belga Jean Baptiste Van Helmont descobriu que tanto na combustão de um sólido, quanto na fermentação há o desprendimento de uma substância invisível, a qual chamou de gás³⁴ (do grego: khaos), por analogia com a alma. Alma era tudo que se perdia na atmosfera, sendo este conceito de uso corrente, na química daquela época³⁴. Assim, ficara estabelecido que a chama é constituída por gases em combustão.

Cinqüenta anos mais tarde, em Lancashire, Inglaterra, John Clayton capturou a "alma" do carvão e acendeu-a dentro de um recipiente, demonstrando o potencial da utilização do gás como combustível e fonte luminosa³⁴.

Na mesma época (1650), Otto Van Guericke de Magdeburgo inventa a máquina de produzir eletricidade estática e descobre que a luz podia ser produzida pela eletricidade³⁴.

Em 1799, Philippe Lebon D'Humbersin patenteou um aparelho que chamou de termolâmpada (o gás era produzido pela destilação, em vaso fechado, da madeira ou da hulha), e instalou o aparelho em um palacete que alugou, transformando-o em atração paga²¹. Porém ninguém levou a sério o seu invento, e só em 1807, nas ruas de Londres, aparecem as primeiras instalações de iluminação a gás²¹.

Este exemplo dado pelos industriais ingleses serviu de motivação aos franceses que também iniciavam a utilização do gás, por volta de 1820, com esta mesma finalidade²¹.

A esta altura a fotometria já havia sido criada por Pedro Bouguer (1678-1758).

Até o final do século XVII, de forma generalizada, prevaleceram as velas de sebo e as lâmpadas de azeite, para as quais o conceito de lâmpada econômica significava aquela que podia queimar, sem fumo, toda a espécie de óleo ou gordura.

No início da década de 1780, Ami Argand inventou a lâmpada de dupla corrente de ar para iluminação a óleo²¹. Enrolou uma mecha chata em um cilindro, em cujo centro projetou uma entrada de ar, empregando pela primeira vez a chaminé de vidro para melhorar o fluxo da lâmpada. Antes dele não se havia ainda projetado alguma lâmpada possuidora de tão grande poder iluminante. A lâmpada de Argand teve muita aceitação e foi o ponto de partida para a evolução dos métodos na iluminação pública e doméstica.

Argand tirou pouco proveito da invenção. Um farmacêutico de Paris, Quinquest, em 1785, atribuiu-se todo o mérito da invenção e mandou construir réplicas da lâmpada de Argand, por um sócio chamado Lange²¹.

A utilização do óleo de baleia é referida ao início do século XIX, sem exatidão, enquanto o fósforo (de fricção, utilizado hoje na "caixa de fósforos") teve origem em 1827²⁵.

Com o advento do petróleo, o querosene passou a ser empregado como substituto dos combustíveis tradicionalmente usados em iluminação e também foi criada a vela de parafina (1853)²⁵.

Na Europa, os candeeiros de petróleo foram introduzidos pelo ano de 1860, mas o gás de iluminação e mais tarde o acetileno fizeram-lhe grande concorrência, especialmente na iluminação pública.

Em geral, produzia-se a luz por meio da combustão, e sabia-se que a chama devia conter uma determinada proporção de carbono para este fim. Com relação aos tipos de combustíveis empregados, eles variavam em razão da facilidade de seu emprego e da quantidade de luz que forneciam para uma mesma despesa.

A temperatura em que se realiza a combustão luminosa na chama concorre para o poder iluminante. Becquerel mostrou experimentalmente que o poder luminoso de um corpo sólido aumenta rapidamente com a temperatura. Portanto o problema a resolver, para a iluminação eficiente, era fazer coexistir numa chama o máximo disponível de carbono em suspensão, na superfície, e a mais alta temperatura de combustão.

Em 1836, Chaussonot melhorava muito o rendimento luminoso, já utilizando o princípio da recuperação do calor produzido pela combustão para aquecer o ar utilizado²¹. Este princípio foi extensivamente usado no bico denominado parisiense (sistema Schulks) e mais tarde por Siemens.

Nos bicos Siemens, em 1880, podia-se obter o poder iluminante de um carcel* com consumo de 38 litros de gás por hora, contra consumo médio de 150 litros por hora, pelo uso de outras tecnologias, algumas décadas antes²¹.

Os trabalhos realizados por Tomás Drummond (1797-1840), que deu nome à luz Drummond, levaram à descoberta da luz oxídrica, ou bico de Auer²¹.

* Carcel: unidade fotométrica antiga, usada na França, vale um décimo da intensidade de uma lâmpada de Carcel (1800), que queima óleo de colza

Neste bico a combustão gasosa leva à incandescência, não o carbono em suspensão, no seio da chama, mas uma matéria sólida, que emite mais luz que o carvão. O bico é na sua essência um bico de Bunsen, cujos orifícios são calculados de modo a produzir mistura de um volume de gás e 2,88 volumes de ar, dando para tanto uma chama muito quente, mas sem brilho; e é esta chama que torna incandescente uma "camisa" constituída por sais terrosos de certas terras raras. Foi o estudo espectroscópico destes elementos que levou Auer Von Welsbach à invenção da "camisa" de óxido de tório.

O bico de Auer fornece uma luz fixa e com poder iluminante bastante elevado, já tendo atingido a marca de 24 litros de gás por carcel-hora. O rendimento luminoso varia com a composição da mistura empregada na preparação das "camisas" e com seu uso. O seu maior defeito é, sem dúvida, a fragilidade mecânica da "camisa".

Em meados do século XVIII (1764), Watson, demonstrou que um condutor atravessado por corrente elétrica se aquece, proporcionalmente ao quadrado da intensidade da corrente³⁴, e em 1802, Sir Humphry Davy provou que fios metálicos, quando levados à incandescência pela eletricidade eram capazes de emitir luz³⁴.

Porém, a primeira lâmpada elétrica, devida ao próprio Davy, em 1813, foi a lâmpada a arco, cuja primeira patente, em nome de Wright, foi registrada em 1845. A lâmpada de Davy recebeu modificações realizadas por Foucault e Serrin, que tornaram o aparelho de uso mais fácil (distanciamento entre os eletrodo, devido ao seu consumo), por volta de 1849. Ao mesmo tempo, Archenau resolvia o problema da regulação do arco (controle da corrente elétrica). Mais tarde apareceram os reguladores Cance, Bardou, Brillé, Pilsen e outros²¹.

Na exposição universal de 1878, em Paris, podiam ser vistas as lâmpadas imaginadas por Jablochhoff e que Wilde e Jamin modificaram. Na mesma época, possivelmente 1876 (a data é incerta), foram imaginadas as lâmpadas à incandescência ao ar livre, cujos modelos de Reynier e Werdermann foram muito usados até 1881²¹.

O progresso das lâmpadas elétricas foi contínuo por todo o século XIX. De la Rue e William Grove fizeram tentativas com lâmpadas a incandescência, mas sem resultados práticos³⁴. A primeira patente para lâmpadas deste tipo foi requerida por Moleyns, em 1841, mas foram logo abandonadas por possuírem vida demasiadamente curta.

Dentre os estudiosos das lâmpadas a incandescência destacam-se ainda o inglês Joseph Wilson Swan^{11,64}, e o americano Thomas Alva Edison, foi quem em 1877 começou a estudar o assunto, sobre o qual realizou mais de 1200 experiências. Em 1879, Edison, construiu sua "primeira lâmpada" com filamento de carvão, a qual produziu luz durante dois dias³⁴.

Mais tarde utilizaram-se filamentos de papel e bambu carbonizados, sendo que em 1894 usou-se filamento de celulose.

A primeira lâmpada com filamento metálico, o ósmio, também é atribuída a Auer. Este tipo de lâmpada era comercializado em Viena e Berlin⁷, possuindo eficácia de 1,5 W/cp*. O filamento era extremamente frágil, o que impedia seu transporte por longas distâncias, além de o ósmio ser um metal raro e caro (tinha que ser reciclado).

Mais atuais são as lâmpadas com filamento de tântalo, introduzidas no mercado europeu, em 1905, e no EUA em 1906. O filamento de tungstênio só apareceu em 1906 (Europa) e 1907 (EUA)⁷.

O compêndio desta seção, em conjunto com outros eventos complementares, como a data da introdução de iluminantes com princípio a partir da descarga em gases, está reunido no ANEXO A - CRONOLOGIA.

2.2 A FONTE INCANDESCENTE E OS ILUMINANTES ELÉTRICOS

As primeiras fontes comerciais de luz elétrica foram as produzidas por descarga em arco aberto, por volta de 1878¹⁰. Logo depois é que foram introduzidas as lâmpadas incandescentes, primeiro, principalmente, para uso em interiores, e mais tarde como fontes substitutas às primeiras luzes a arco elétrico aberto, na iluminação das ruas (1879).

A primeira lâmpada elétrica, usando filamento, é em geral atribuída a Edison que, em 21.10.1879, manteve em funcionamento por tempo relativamente longo (dois dias), uma lâmpada usando filamento produzido com linha para costura carbonizada³⁴. Outras lâmpadas incandescentes, mais antigas, utilizavam como filamento papel e bambu carbonizados. Tratando o filamento com um hidrocarboneto, formava-se, sobre sua superfície, um revestimento de grafite. Este foi o primeiro avanço notável na produção de um filamento uniforme (filamento de carbono tratado, vide ANEXO J).

Mais tarde, o filamento passou a ser produzido pela modelagem de pasta da celulose, sua secagem e posterior carbonização. Assim, todo tipo de filamento que era usado constituía-se de alguma forma de material carbonizado, o qual possuía resistividade com coeficiente de temperatura negativo. Em 1904, foi desenvolvido um processo para aquecer o material,

Neste processo, o coeficiente de temperatura da resistividade, mudava para valor positivo, e o filamento era dito ser "metalizado", por causa desta mudança. A lâmpada obtida por este processo passou a ser chamada de GEM - "General Electric Metallized" (1905)²². Lâmpadas com filamento verdadeiramente metálicos foram introduzidos no ano seguinte, pelo uso de ósmio (na Europa) e tântalo¹⁰. Mas, logo em 1907, a lâmpada com filamento de tungstênio as substituiu, ainda que a tecnologia para a trefilação do tungstênio só foi introduzida entre 1910 e 1911, por Coolidge⁸.

Em 1913, Langmuir duplicou a eficiência em lâmpadas de 100 W, que até então eram a vácuo, pelo seu enchimento com gás inerte²². Outras pequenas mudanças ocorreram até 1936, quando Benbow apresentou o filamento duplamente espiralado, ampliando em mais dez por cento a eficiência na produção de luz por este tipo de fonte²².

A próxima mudança significativa veio a ocorrer por volta de 1959, conforme artigo de Mosby e Zubler³⁰ que retrata algum sucesso com o ciclo halógeno, propiciando melhora significativa na manutenção do fluxo luminoso e aumento da vida nominal destas lâmpadas incandescentes a halogênio. Este nome é decorrência do gás de enchimento: iodeto e depois brometo de tungstênio.

A última inovação tecnológica disponível comercialmente de que existem registros, com aplicação comercial a bulbos de forma não apenas tubular e potências a partir de 60 W, é conhecido como IRF - "Infrared Reflecting Film". No entanto, ele já era conhecido em 1977 (conforme publicação dos autores: Fan, J.C. e Bachner, F.), e é obtido pela deposição de um filme fino, transmissor de luz e refletor de infravermelho, nas paredes internas de um tubo de vidro perfeitamente esférico.

Essa tecnologia possibilita manter a temperatura do filamento com 60 % da energia tradicionalmente usada. Uma lâmpada protótipo de 70 W, usando bulbo convencional havia sido desenvolvida sendo obtido praticamente um valor de -30 % na potência de operação.

Na tabela 2.1.1 apresentamos um quadro esquemático que mostra a evolução da eficiência, em particular para uma lâmpada com 100 W nominais, ao longo do tempo, associada aos principais eventos ou inovações importantes.

ANO	EFICIÊNCIA INICIAL (lm/W)	INOVAÇÕES IMPORTANTES
(1) 1879	1,4	FILAMENTO COM LINHA DE COSER CARBONIZADA (EDISON)
1879	2	FILAMENTO COM BAMBU
1891	3,3	FILAMENTO COM CELULOSE
1905	4	FILAMENTO DITO "METALIZADO" (GEM)
(1) 1905	-	INTRODUÇÃO DO FILAMENTO A TÂNTALO NA ALEMANHA
1906	5	INTRODUÇÃO DO FILAMENTO A TÂNTALO (CC) - EUA
(1) 1906	(3)	INTRODUÇÃO DO FILAMENTO A TUNGSTÊNIO NA EUROPA
(1) 1907	(3)	INTRODUÇÃO DO FIL. A TUNGSTÊNIO PRENSADO - EUA
1908	8	(3)
1910/11	9	TREFILAÇÃO DO TUNGSTÊNIO (COOLIDGE, W)
1913	10	TRANSIÇÃO: VÁCUO PARA GÁS INERTE (LANGMUIR, IRVING)
1915	10	(3)
1916	12	(3)
1930	14	MAZDA C (A GÁS)
1936	(3)	FILAM. DUPLAM. ESPIRAL.: +10% EFICIÊNCIA (BENBOW)
1940	16	(3)
1959	17	HALOGÊNIO
1989	(2) 17,5	(3)

Tabela 2.1.1 - Evolução da eficiência em lâmpadas convencionais (3), principalmente de potência nominal 100 W 7,10,22,24,25,26,28,38

NOTAS: (1) - Não existe valor disponível para a potência;

(2) - Vida: 750 h; fluxo: 1750 lm; tensão: 120 V; e

(3) - A falta de indicação da inovação ou valor da eficiência é porque a informação não estava disponível na bibliografia.

Alguns outros valores, com "novas" tecnologias e para diferentes potências são dados na tabela 2.1.2.

POTÊNCIA (W)	TENSÃO (V)	FLUXO (ℓ_m)	VIDA (h)	EFICIÊNCIA INICIAL (ℓ_m/W)	TIPO
52	120	705	2500	13,5	CONVENCIONAL
52	120	735	2500	14,1	CRIPTONIO
52	130	735	2500	14,1	CRIPTONIO
52	120	800	1000	15,4	CONVENCIONAL
55	120	860	1000	15,6	CONVENCIONAL
75	120	970	2500	12,9	CONVENCIONAL
90	120	1750	2000	19,4	HALOGÊNIO
90	120	1415	2500	15,7	CRIPTONIO
90	130	1415	2500	15,7	CRIPTONIO
90	120	1620	750	18,0	CONVENCIONAL
135	120	2105	2500	15,6	CONVENCIONAL
135	120	2250	2500	16,7	CRIPTONIO
135	130	2250	2500	16,7	CRIPTONIO
135	120	2580	750	19,1	CONVENCIONAL
350	120	10.000	2000	28,6	IRF
500	120	11.100	2000	22,6	CONVENCIONAL

Tabela 2.1.2 - Eficiência em lâmpadas com " novas tecnologias " e potência nominal diferente de 100 W^{83,90,91}

Um parâmetro relevante, quando da operação das lâmpadas incandescentes de uso geral é a depreciação de seu fluxo luminoso ao longo da vida. Em geral este valor é expresso em porcentagem do fluxo inicial e é referido em uma porcentagem da vida nominal projetada.

Outro parâmetro bastante difundido e aceito para caracterizar a qualidade das lâmpadas incandescentes é a sua eficiência intrínseca inicial, para um esperado tempo de vida, que em geral é de 1000 horas.

A eficiência intrínseca das lâmpadas incandescentes depende basicamente da sua tensão de trabalho, da vida nominal projetada, da pressão interna, tipo dos gases de enchimento e da sua perda de energia.

Sem dúvida alguma, a introdução da lâmpada incandescente alterou em muito o modo de vida das sociedades neste século. Mesmo hoje, existindo fontes luminosas bem mais eficientes, as lâmpadas incandescentes têm uso ainda bastante intenso. Sendo considerada por muitos o primeiro dispositivo a utilizar energia elétrica em larga escala, é ainda um dos principais consumidores de eletricidade.

O sucesso das lâmpadas incandescentes pode ser atribuído a dois fatos preponderantes: elas possuem o menor custo inicial de instalação, quando comparadas às demais fontes luminosas comercialmente disponíveis e possuem uma ampla flexibilidade em relação a potência desejável a ser instalada. Sabemos que as lâmpadas a descarga necessitam reatores e quando se deseja mudar para outra potência, o reator antigo não é apropriado.

São quase 100 anos de existência das lâmpadas incandescentes com filamento de tungstênio e não há sinais que apontem a migração acentuada da preferência popular por outro tipo de fonte luminosa nos próximos dez anos.

Em 1987 havia no Brasil mercado para aproximadamente 300×10^6 lâmpadas incandescentes, das quais 250×10^6 (conforme ANEXO I) estima-se que estavam instaladas (a uma potência média de 60 W), o que perfazia uma carga em torno de 15 GW instalados. Supondo uso médio de 2 horas/dia/por lâmpada e plena carga, isto conduz a um consumo da ordem de 20 TWh/ano.



2.3 A BUSCA DA VIDA ECONOMICAMENTE ÓTIMA

Do ponto de vista elétrico, a lâmpada incandescente é bastante simples: um condutor particularmente arranjado, imerso em atmosfera de gases em proporções convenientes, e que pode ser aquecido à incandescência pela passagem de corrente elétrica. Apesar desta simplicidade elétrica, significativo aparato tecnológico envolve a construção de lâmpadas eficientes e a capacidade de desenvolver e aplicar conhecimentos e tecnologia podem trazer ganhos adicionais desejáveis a esta eficiência.

Nosso trabalho tem, no entanto, um cunho de engenharia, ou seja, busca avaliar o mínimo custo de luz, gerada pelas lâmpadas incandescentes e saber como ele é afetado tanto pelas condições que estão sob o controle do usuário, quanto pelas características nominais destas lâmpadas. Por causa destas características, é necessário que se determine a eficiência na qual a lâmpada deve ser operada e que vida deve ser estipulada para obtenção do resultado ótimo.

É geralmente suposto ser uma vantagem destas lâmpadas terem vida longa. Isto pode ser uma ilusão. Sob condições normais, uma vida reduzida pode significar um ganho monetário real.

Em linguagem cotidiana, se uma lâmpada incandescente não "queimar" de forma natural, é mais econômico retirá-la de operação em tempo relativamente menor que sua vida nominal do que mantê-la em uso. Este resultado é tão diferente da versão em geral aceita, que com certeza em primeira instância, muitos não lhe darão crédito.

É bastante conhecido que estas lâmpadas escurecem (tecnicamente diz-se: depreciam seu fluxo luminoso), deteriorando com o tempo de utilização e tornando-se menos eficientes. Este fato pode motivar alguém a formular uma importante questão: - quando é que estas lâmpadas devem ser substituídas por lâmpadas novas?

Este questionamento não é recente, como pode parecer; ele é tão antigo quanto a própria utilização da lâmpada incandescente.

A resposta a tal questão depende não só de alguns poucos conhecimentos em relação à lâmpada, e dos custos associados à sua utilização, mas depende fundamentalmente da relação entre eles, o que torna a resposta circunstancial, indicando que seja qual for o método usado para atingir sua solução, com alguma periodicidade, ele deve ser reavaliado.

Voltando um pouco no tempo, no primeiro trabalho coligido, de 1888, encontraremos como inferência inicial do mesmo, afirmação similar àquela que formulamos acima. Howell¹ afirmava: "a eficiência máxima de uma dada lâmpada não é um valor fixo, mas varia com condições externas à própria lâmpada". O mesmo autor buscava identificar sob que condições era possível obter a "máxima eficiência" das lâmpadas incandescentes.

No ano seguinte, 1889, outros dois trabalhos publicados vieram ampliar o conhecimento em relação às recentes lâmpadas elétricas. Primeiro Peirce² estabeleceu uma relação entre a eficiência inicial e média: $(0,8 \pm 0,3)$, e depois Reed³ equacionou a dependência da eficiência como função da temperatura do filamento, mesmo apesar das dificuldades em se medir esta temperatura.

Muito já havia sido dito e escrito a respeito da eficiência e sua relação com a vida útil esperada daquelas lâmpadas, mas o público geral não entendia tão claramente a questão.

Em 1892, um reconhecido marco foi estabelecido por Hassler⁴ e outros, o qual ficou conhecido como os ensaios de Ohio, pois suas realizações ocorreram no "Electrical Laboratory of the Ohio State University, Columbus".

Estes ensaios trouxeram substanciais quantidades de informação, em relação às lâmpadas incandescentes então disponíveis no mercado. Foram obtidos a partir de metrologia de ensaio uniforme, inclusive pelo uso de padrões de trabalho que eram verificados a intervalos periódicos, ao longo dos ensaios.

Através da aplicação de análise desenvolvida por Mr. O'Keenam (The Electrical World, Dec-24, 1892, pg. 404), aos resultados dos ensaios de Ohio, foi que Hering⁵ desenvolveu procedimento para a determinação do ponto ótimo na vida das lâmpadas incandescentes, em relação aos seus custos de manutenção e operação. Este procedimento difere daquele que foi proposto por Howell¹, visto não considerar como variável a condição de operação da lâmpada (tensão). Howell buscava sob que condição de rede a lâmpada deveria operar, de forma que fossem mínimos os custos de operação, enquanto Hering admite condição de equilíbrio para a rede e preocupa-se com a sensibilidade dos custos totais em relação à variações tanto no preço da lâmpada quanto da energia. Estas abordagens mostram as condições circunstanciais da análise.

Nos trabalhos mais recentes temos basicamente duas linhas de abordagem: a minimização dos custos por hora ou por lúmen-hora. Elas usam como ponto de partida as dependências de relações que expressam o comportamento das lâmpadas incandescentes em confronto com outros valores de tensão que não o nominal^{9,32,49} (vide ANEXO J).

Resulta uma "tensão econômica" de operação, a qual é assumida no cálculo da dependência de relação que expressa a vida da lâmpada em função da tensão, para obtenção da vida econômica.

Boast²⁴ e Moon¹⁵ minimizam o custo por lúmen-hora e usam a relação de razões, cujos coeficientes são obtidos de forma empírica.

Na outra linha, apesar de usarem modos e restrições diferentes, os autores também adotam as dependências de relações, porém com coeficientes dados por Coaton⁷⁸. Neste grupo temos o trabalho de Prais⁵⁰ que minimiza custo por hora, submetido a uma relação que expressa o fluxo luminoso em termos da vida e potência de lâmpada, obtendo diretamente uma expressão para a vida em operação econômica; e os trabalhos de Huettener⁷⁸, Jay e Coomber⁷⁰ minimizam o custo por lúmen-hora, e analogamente derivam expressões para a vida em operação econômica.

Lamaigre⁷⁴ e Potter²⁹ agregam condições que não são técnicas para adotar uma vida um pouco maior que aquela obtida por cálculo.

Millar¹⁷ fornece uma expressão para a vida econômica, que somente tem validade para a potência de 60 W, sendo necessárias outras expressões para as outras potências de lâmpada. Seu método também está baseado em coeficientes e nas dependências de relações.

Na tentativa de buscar um procedimento que evitasse o uso dos coeficientes empíricos ou que carregasse a incerteza dos coeficientes dados por Coaton⁷⁸ e conseqüente propagação destas incertezas, inerentemente associadas aos métodos acima expostos, foi que decidimos desenvolver uma formulação alternativa. Esta é lastreada tão somente nas depreciações do fluxo luminoso e da potência, em relação a vida nominal da lâmpada.

Nosso procedimento tem como característica fundamental impor como condição que a vida econômica otimizada seja igual à vida nominal da lâmpada, o que é extremamente desejável e original, em vista dos outros métodos tratarem a lâmpada com uma vida nominal definida, e que em geral é de 1000 horas.

2.4 PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO

Esta parte do trabalho é dedicada ao detalhamento e apresentação das formulações usadas nos procedimentos identificados na literatura, sobre os quais já fizemos abordagem na seção anterior.

A diversidade na nomenclatura utilizada é fruto da decisão de mantê-las o mais próximo possível dos originais. Uma revisão poderá trazer a unificação dessas nomenclaturas, o que no entanto não foi nosso objetivo.

A abordagem dos trabalhos mais antigos deve-se não somente ao sentido histórico dos mesmos, mas também porque sentimos que eles são capazes de proporcionar algum conhecimento significativo, justificando assim a breve análise ou simples apresentação de alguns deles.

O procedimento que elaboramos está apresentado no capítulo 4. Ele representa o resultado do desenvolvimento de uma alternativa (ao uso dos expoentes), a partir de parâmetros que têm referência definida e podem ser verificados sem maiores problemas (caso do expoente que expressa o comportamento da vida da lâmpada).

I) O TRABALHO DE HOWELL

Foi neste trabalho que encontramos a mais antiga preocupação em relação ao assunto em pauta, mesmo sendo sua abordagem, de certa forma dirigida, dada as circunstâncias da época, quando a geração de energia elétrica tinha a peculiaridade de ser distribuída e portanto passível de ajustes locais. A energia tinha a dimensão do cavalo-vapor-hora e ainda não era conhecido o conceito de fluxo luminoso, sendo a eficiência dada em watts por vela (intensidade luminosa).

Não obstante, o autor reconhece tais deficiências, e define eficiência aplicada a uma lâmpada incandescente como a quantidade de energia requerida pela mesma para produção de uma dada quantidade de luz. Assim ao dizer que: "uma dada lâmpada possui eficiência de 3 W/vela, a 16 velas, significa que para produzir uma iluminação equivalente a 16 velas é preciso suprir a lâmpada com 48 watts". E define a máxima eficiência desta lâmpada como aquela eficiência cujo custo de operação tem valor mínimo.

Howell partiu de duas informações básicas: uma curva que mostra a variação da intensidade luminosa, em velas, contra o watt por vela (eficiência) e outra curva da vida da lâmpada contra sua eficiência.

A partir disso ele mostra o custo de operação das lâmpadas com 16 velas (nominais) e sob diferentes eficiências (não estando as mesmas lâmpadas trabalhando sob eficiências diferentes) para lotes de 100 lâmpadas similares, sob diferentes preços de lâmpadas e energia. Apresentando onze gráficos do custo total de operação e custo de lâmpada em função da eficiência para cada situação e o correspondente preço da lâmpada para esta eficiência, obtém a seguinte conclusão: "O custo total é sempre mínimo quando o preço da lâmpada é cerca de 14,5% do custo total de operação".

A formulação básica empregada por Howell¹ foi equacionada para um período fixo de 1000 horas e da seguinte forma:

$$CO = CE + CL \quad (4.1)$$

onde:

CO : custo total de operação;

CE : custo de energia;

CL : custo das lâmpadas; e

$$CE = [\text{Eficiência(W/cp)} * \text{caract. da lâmp.}(16\text{cp}) * \\ * \text{n}^{\circ} \text{ lamp.}(100) * 1000 \text{ h} * \text{custo } \text{¢}/\text{hp.h}]/746 \quad (4.2)$$

onde cp : "candle - power" (vela).

$$CL = [\text{custo de uma lâmpada} * \text{n}^{\circ} \text{ lâmpadas} (100) * \\ * 1000 \text{ horas}] / \text{vida na eficiência dada} \quad (4.3)$$

A crítica que fazemos ao trabalho de Howell, em relação à sua aplicabilidade hoje, é a não consideração explícita da variação da eficiência com o transcorrer da vida da lâmpada, ou seja ele supõe que "a lâmpada não sofre depreciação", o que não é verdade.

No caso, existe a necessidade de um aumento na potência suprida para que seja mantida a mesma eficiência. Isto só poderia ser realizado hoje a partir do controle da tensão de lâmpada, pelo usuário, com a utilização de um equipamento adicional: um transformador apropriado ou regulador ajustável de tensão.

Mas ficou demonstrado, desde então, que o custo total mínimo de operação é função do preço da lâmpada, preço da energia e de uma característica da lâmpada (sua eficácia).

II) O PROCEDIMENTO USADO POR HERING

De posse dos resultados de ensaios realizados em Ohio, Hering pôde somar em relação ao trabalho de Howell. Considerando o aumento da potência por lúmen para cada hora de vida da lâmpada (k) e assumindo que esta variação tem o mesmo incremento para igual incremento de tempo que a lâmpada é usada. Assim, a potência total exigida após x horas de vida vale: $(w + kx)$, e a energia total usada até o tempo x vale:

$$\int (w + kx) dx = wx + (kx^2)/2 \quad (4.2.1)$$

O custo total, incluindo o custo da lâmpada, vale:

$$T = a + b[wx + (kx^2)/2] \quad (4.2.2)$$

Onde,

T: custo total da luz (ℓm) para um dado n^o de horas;

a: preço da lâmpada por lúmen [US\$/ ℓm];

x: número de horas que a lâmpada é usada [h];

b: preço da energia elétrica fornecido à lâmpada [US\$/kWh];

w: potência nominal pelo fluxo inicial [W/ ℓm]; e

k: aumento de potências por lúmen para cada hora de vida da lâmpada [W/ $\ell m.h$].

O custo médio vale:

$$y = T/x = (a/x) + bw + (kx/2) \quad (4.2.3)$$

onde, y : custo médio horário, que é mínimo quando:

$$x = (2a/bk)^{1/2} \quad (4.2.4)$$

O método de Hering⁵ que apresentamos foi modificado em relação ao original, no que concerne à unidade do fluxo luminoso, tendo em vista a possibilidade de aplicá-lo a dados atuais, conforme levantamento efetuado. Em alguns casos, podemos calcular o valor de (k), com informações dadas nos anexos F ou G, e fazemos uso deste método. Além disso, poderá ser realizada uma comparação com os comportamentos do fluxo e potência, estabelecidos pelo IES⁷², como padrão para lâmpadas incandescentes.

III) OS PROCEDIMENTOS DE BOAST E MOON

Estes procedimentos minimizam o custo por lúmen-hora, usando a condição de funcionamento fora das condições nominais, preconizada por Howell.

III.1.1) O custo unitário da luz

O custo unitário mínimo da luz (C) [US\$/10⁶ ℓm.h], quando a lâmpada funciona fora da sua tensão nominal, como desenvolvido por Boast, é dado por:

$$C = (1,14 \cdot 10^6 / \varnothing_0) \cdot (A \cdot D^{-9,72} + 9,6 \cdot 10^{-4} \cdot B \cdot D^{1,839}) \quad (4.3.1.1)$$

Nesta equação o primeiro termo está ligado ao custo inicial da lâmpada, o segundo termo ao custo da eletricidade, e onde:

\varnothing_0 : fluxo luminoso inicial [ℓm];

$A = (q/L_0)$; $B = (b \cdot P_0)$; $D = (V_0/V)$;

q : preço da lâmpada [US\$];

L_0 : vida nominal [horas];

b : preço da energia elétrica [US\$/kWh];

P_0 : potência nominal média [W];

V_0 : tensão nominal [V]; e

V : tensão aplicada à lâmpada [V].

III.1.2) Tensão econômica

A tensão que conduz à utilização da lâmpada sob custo mínimo (econômica), segundo Boast, é dada por:

$$V = V_0 \cdot [181,4 \cdot 10^{-6} (B/A)] \quad (4.3.2.1)$$

III.1.3) Custo sob tensão econômica

O custo unitário da luz (C_e), em [US\$/10⁶ l.m.h], com a lâmpada sob a tensão economicamente interessante (dada pelo item III.1.2), é:

$$C_e = (5140 \cdot 10^6 / \emptyset_0) \cdot [B^{0,84} \cdot A^{0,159}] \quad (4.3.3.1)$$

III.2) Vida econômica (L)

$$L = L_0 (V/V_0)^{-b} \quad (4.3.4.1)$$

onde:

$b = 13,5$; para lâmpada a vácuo, ou

$13,1$; para lâmpada com enchimento a gás.

IV) PROCEDIMENTOS BASEADOS NO EXPOENTE DE COATON

Os procedimentos abordados neste item estão atados a um expoente típico dado por Coaton, em literatura não encontrada (não está disponível no país, conforme consulta ao Sistema Nacional de Catalogação), porém citada por Huettner⁷⁸. Tal expoente ($\alpha \approx 1/7$) relaciona a eficácia da lâmpada incandescente com sua vida, e é válido apenas para lâmpadas com enchimento a gás. Esta dependência é expressa pela seguinte fórmula:

$$E_0 = E(t/t_0)^\alpha \quad (4.4.1)$$

onde,

t_0 : 1000 horas;

E_0 : eficácia nominal [lum/W]; e

E : eficácia para o tempo de vida t (horas) [lum/W].

Em função da falta de exatidão deste expoente (α) e da não disponibilidade da sua referência bibliográfica, este procedimento não pode ser analisado com adequada profundidade, ficando aqui como referência balizadora ou como ponto para uma possível análise.

IV.1) Método de Prais

Este método⁵⁰ minimiza o custo da iluminação por hora. Considerando a potência da lâmpada constante ao longo do tempo. Chega, para a vida ótima (t_0), à seguinte expressão:

onde, b : preço da lâmpada [US\$];
 c : preço da energia elétrica [US\$/kWh]; e
 w : potência nominal média.

IV.2) Método de Jay e Coomber

O método apresentado por Jay e Coomber⁷⁰, usa a mesma terminologia de Prais. Para determinar a vida econômica da lâmpada (t_1), fazendo $B' = b/c.w$, temos:

$$t_1 = 5,25.B' \quad (4.4.2.1)$$

IV.3) Método de Huettner

Usando a mesma terminologia dos itens IV.1 e IV.2, temos a vida econômica (t_2)⁷⁸:

$$t_2 = K.B' \quad (4.4.3.1)$$

onde, $K = 8,3$ para filamento espiralado; ou
 $7,6$ para filamento duplamente espiralado.

V) PROCEDIMENTO DE MILLAR

Em seu trabalho Millar¹⁷ apresenta formulação exclusiva para o caso da lâmpada com potência nominal de 60 W, vida nominal de 1000 horas e eficiência de 12,6 lm/W , chegando à uma expressão para

$$t_{\text{ótimo-60W}} = 5,80.b/(c.P_0) \quad (2.4.6.1)$$

onde,

b: preço da lâmpada [US\$];

c: preço da energia elétrica [US\$/kWh]; e

P₀: potência inicial.

VI) PROCEDIMENTO DE MERRILL

O método para cálculo do custo unitário de luz (em US\$ por milhão de lúmen-hora) apresentado pela publicação IES-1984⁷⁹, também aparece no trabalho de Reid e Potter²⁹, mas é atribuído a Merrill¹⁶, que primeiro o publicou em 1937. Neste trabalho o custo da luz é equacionado para ser aplicado a uma luminária ou um sistema de iluminação. Ele leva em consideração além dos custos de operação, os custos próprio da instalação e das limpezas periódicas, e o fator de depreciação do fluxo luminoso, ocorrido entre os períodos de limpeza. Este procedimento não foi diretamente utilizado, porém serviu de base ao desenvolvimento que realizamos e se encontra no anexo H.

Os procedimentos de I a IV foram usados em cálculos, cujos resultados são dados na seção 4.4.

3 - ASPECTOS TECNOLÓGICOS

Neste capítulo tratamos das tecnologias emergentes⁹⁸ e daquelas já associadas às lâmpadas incandescentes.

Fazemos uma breve descrição dos componentes da lâmpada incandescente de uso geral e discorremos sobre algumas evoluções nelas agregadas.

Como o meio mais simples para aumentarmos a eficiência (ℓ_m/W) das fontes de luz incandescente está em aumentar a temperatura de funcionamento do seu filamento, também abordamos, de modo superficial este aspecto.

O capítulo é finalizado com um panorama das pesquisas recentes, que estudam alternativas para a modificação das lâmpadas incandescentes de uso geral, com a utilização do criptônio e dos filtros de filmes finos.

3.1 COMPONENTES DA LÂMPADA

O desempenho das lâmpadas incandescentes, como em geral de qualquer outro sistema, está fortemente ligado ao comportamento individual de seus componentes construtivos. No caso das lâmpadas, os componentes principais pertencem a três classes de materiais, as quais denominamos vidros, metais e gases.

Na figura 3.1.1 apresentamos a forma que estes componentes têm quando entram em um tipo de linha de produção e o resultado de uma das etapas de montagem, anterior à inclusão do filamento espiralado.

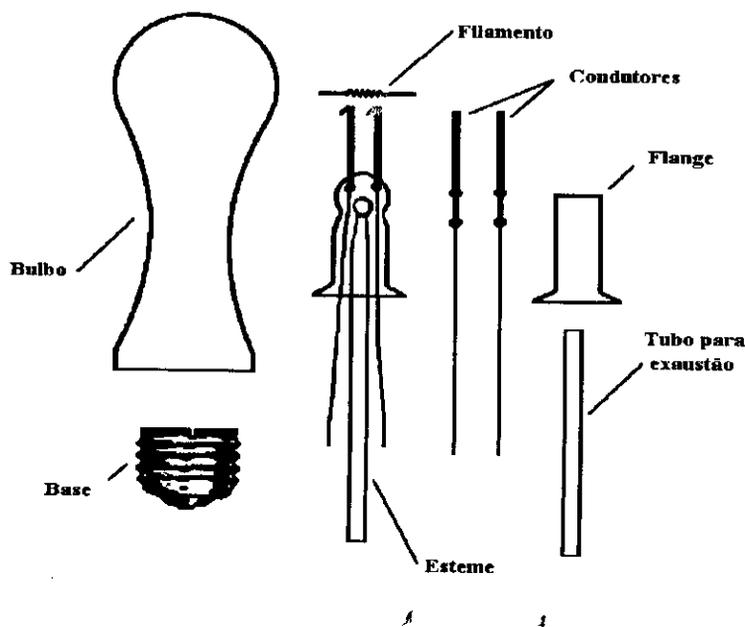


Figura 3.1.1 - Componentes da lâmpada na fase de montagem

Nesta parte do trabalho vamos apresentar algumas das características principais das classes de materiais empregados na construção das lâmpadas:

a) VIDROS:

O tipo de vidro utilizado para a construção do bulbo (mais comum) de lâmpadas incandescentes de uso geral é composto, principalmente, (em peso) de SiO_2 (73 %), Na_2O (16 %), CaO (5 %), MgO (4 %), Al_2O_3 (1 %) e K_2O (1 %). Sua característica de viscosidade contra temperatura é projetada visando a produção em larga escala.

Cada família de lâmpadas possui seu próprio regime térmico de trabalho e conforme as exigências de temperatura de trabalho do bulbo se agravam, outros tipos de vidro são necessários, como os tipos com predominância de B_2O_3 ou Al_2O_3 .

Nos componentes internos predomina o tipo de vidro com composição principal (em peso) SiO_2 (57 %) e PbO (30 % a 20 %) que possui maior resistividade elétrica, em relação ao vidro do bulbo, e melhor desempenho na prevenção contra a corrosão por eletrólise dos condutores;

b) METAIS:

b.1) PARA O FILAMENTO:

Os fundamentos da produção de radiação não coerente, através da incandescência, estão discutidos em várias referências^{15,72}. Eles podem indicar as características que os materiais candidatos, a serem usados como filamento incandescente, devem ter. A característica mais evidente é suportar temperaturas elevadas (acima de 2000 K^(a)). Além disso, se desejamos operar o filamento com eficiência (de emissão) elevada, ao mesmo tempo ele deve ter emissividade seletiva favorável na região visível do espectro ($380 \text{ nm} < \lambda < 780 \text{ nm}$)^(b). A figura 3.1.2 apresenta o comportamento da emissividade espectral de alguns materiais.

Outras características necessárias incluem a baixa pressão de vapor na temperatura de operação, ductilidade, resistência mecânica e estabilidade estrutural.

Pelo fato de não existir um material que possa satisfazer a todos estes requisitos, fica implícito que é necessário assumir algum tipo de compromisso na escolha do material a ser usado como filamento.

Em lâmpadas especiais para sinalização (tipo miniatura, usada em painéis), que trabalham à temperatura relativamente baixa, ainda encontramos no Brasil a utilização do filamento de carbono. Na literatura, a partir de 1911, quando o uso do tântalo foi abandonado⁶, não encontramos indicação da utilização de qualquer outro metal ou liga, em substituição ao tungstênio.

(a) A incandescência pode ser percebida, pela visão, a partir de 873 K.

(b) Os fotômetros, em geral, estão calibrados para a sensibilidade da visão fotóptica ou diurna.

b2) LIGAS E METAIS DIVERSOS

As várias ligas de níquel com metais como o cobre, ferro, cromo e magnésio possuem ampla aplicação na indústria de lâmpadas e são usadas principalmente como suportes mecânicos, fios condutores, elemento complementar da selagem do vidro e fusíveis.

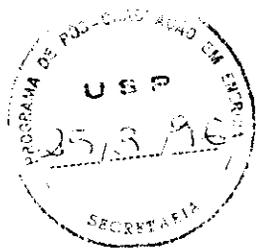
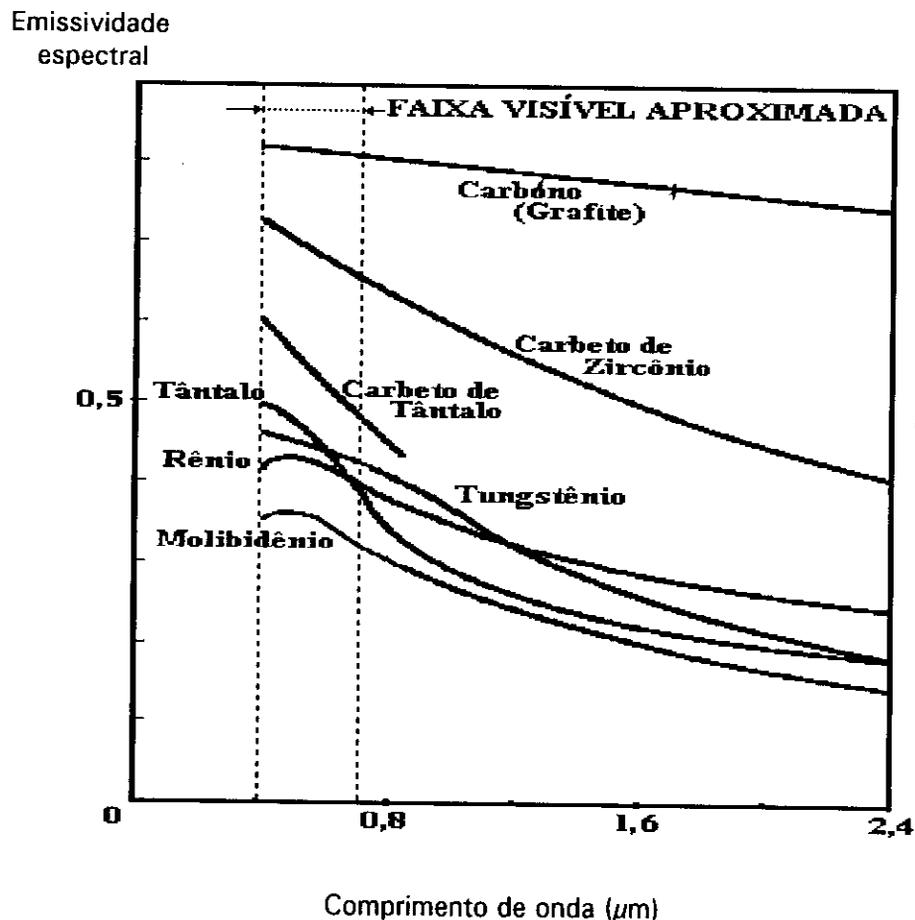


Figura 3.1.2 - Emissividade espectral de materiais à 2000 K. Fonte: Evans e Day⁷⁶

A principal liga usada nas lâmpadas incandescentes de uso geral ficou conhecida por liga Dumet devido a sua importante função de selagem da junção vidro (plúmbico) - metal (casamento dos coeficientes térmicos de expansão).

O molibdênio, em função do seu elevado ponto de fusão, é usado como suporte para o filamento, o cobre como fio condutor, o estanho e o chumbo como elementos de solda, estão presentes na maioria das lâmpadas.

A base da lâmpada pode ser em latão ou latão níquelado, mas por questão de custo, na lâmpada incandescente de uso geral, ela é feita em alumínio; e

c) GASES:

A atmosfera gasosa presente na maioria das lâmpadas incandescentes tem a função de controle sobre o desempenho do seu filamento.

A quantidade de energia visível emitida pelo filamento cresce com o aumento da sua temperatura, conforme mostra a figura 3.1.3. Deste modo é interessante que o filamento funcione na temperatura mais elevada possível.

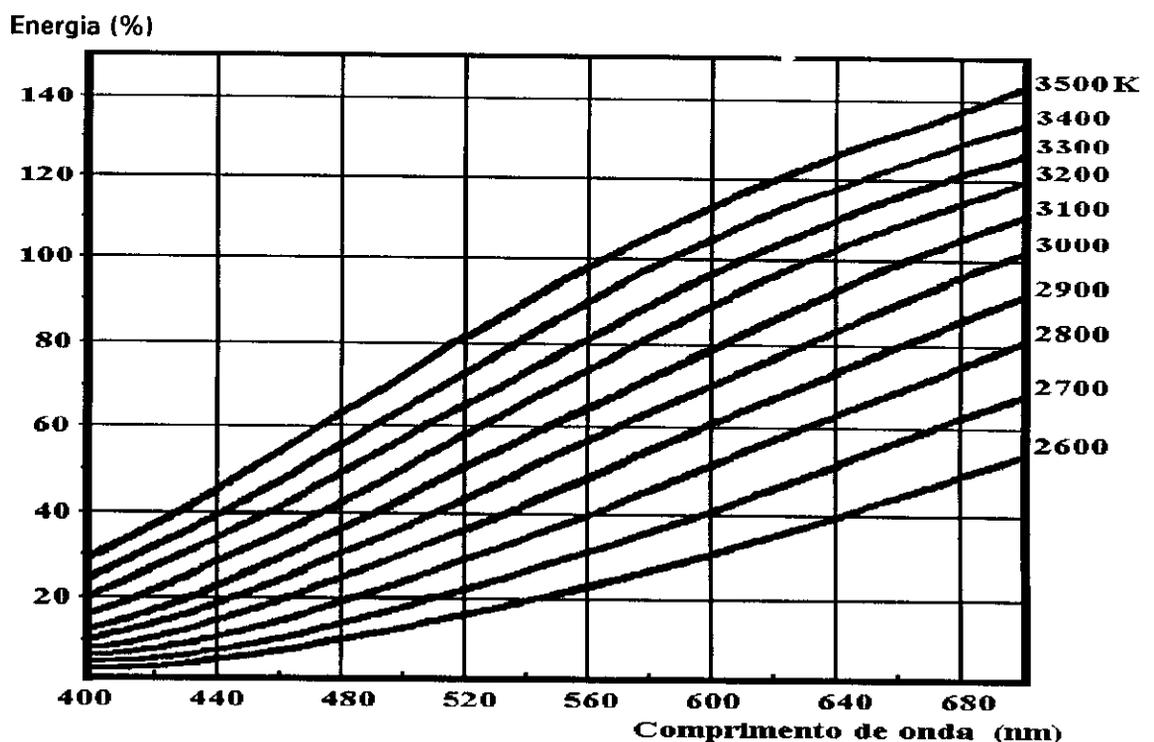


Figura 3.1.3 - Distribuição da energia emitida por filamentos de tungstênio de mesma potência mas com temperaturas diferentes⁷²

No caso das lâmpadas a vácuo a temperatura máxima é limitada pela taxa de evaporação do tungstênio.

O enchimento da lâmpada com um gás (ou mistura de gases) não reagente com o filamento, pode reduzir de modo significativo esta taxa de evaporação³⁸ e o desejável aumento na temperatura pode ser realizado.

A condutividade térmica do gás agregado impõe ao filamento perdas por condução; também perdas (adicionais) por convecção passam a existir. Estas perdas podem ser avaliadas, para cada tipo de lâmpada, pelo uso de modelos como aqueles apresentados por Langmuir³³ e Chang¹⁰³, respectivamente. Em geral, o uso do vácuo traz vantagens para as lâmpadas incandescentes de uso geral com potência até 15 W⁷⁶.

A mistura de nitrogênio com o argônio têm sido extensivamente usada para o enchimento das lâmpadas incandescentes de uso geral.

A adição do nitrogênio é feita para minimizar a tendência de formação de arco elétrico em atmosfera inerte. Sua concentração deve ser mantida em níveis mínimos, entre 5 % e 10 % (rede de 240 V), para não elevar as perdas do filamento⁶³.

A pressão interna do bulbo também possui seu ponto ótimo, porém por questão de segurança, na temperatura ambiente, um valor ligeiramente inferior a uma atmosfera é usado para a faixa de 40 W a 100 W⁶³. Ao contrário, nas potências mais elevadas, o aumento na pressão interna se tem mostrado eficaz para elevação da vida nominal dessas lâmpadas⁵².

É crescente a utilização do criptônio, em substituição ao argônio, em razão da redução de seu preço e aumento na sua oferta. Este gás é mais denso e possui condutividade térmica menor que o argônio, o que propicia a obtenção de lâmpadas mais eficientes, sem alteração da vida (ou o inverso).

No Brasil, ao que sabemos, todo o criptônio consumido é importado e vem sendo usado, exclusivamente, em lâmpada do tipo a halogênio, cujo mercado não é significativo, em relação às lâmpadas incandescentes de uso geral e está estimado em $1,2 \times 10^6$ unidades/ano¹⁰².

A tolerância de impurezas na atmosfera interna das lâmpadas, na maioria dos casos é bastante estreita, devendo limitar-se a poucas ppm.

As impurezas podem ser transformadas em compostos passivos ou capturadas pelo uso de substâncias específicas denominadas "getter"⁷⁶.

O "getter" com princípio de transformação é o mais usado. Aplica-se a substância em local pré-definido na forma de um depósito ou filme e por efeito térmico o elemento ativo é instantaneamente liberado. O fósforo, o bário e o magnésio são exemplos deste tipo de "getter". O princípio da captura tem a vantagem de se manter efetivo ao longo da vida da lâmpada e é usado na forma de um fio ou elemento estrutural ou depósito semi-poroso. O tântalo, o titânio, o zircônio e certas ligas de alumínio-zircônio são exemplos de outros tipos de "getter".

3.2 QUALIDADE E USO DE TECNOLOGIA

Para chegarmos até cada um dos componentes da lâmpada e o conseqüente produto final¹⁸, conforme ilustra a figura 3.2.1, é essencial que muita atenção seja dada à qualidade da matéria prima, ao projeto e ao controle do processo. Portanto, para que a qualidade na produção de lâmpadas seja mantida dentro de limites aceitáveis^{75,84} é preciso que também se conheçam as incertezas associadas às freqüentes leituras realizadas das características do filamento, da pureza do gás de enchimento, da qualidade da exaustão do ar (efetividade do bombeamento), das temperaturas envolvidas no processamento do vidro,

controle dimensional e mecânico.

As técnicas de amostragem estatística são fundamentais para o monitoramento completo das características: dimensional, mecânica, elétrica e fotométrica, especificadas, dado o elevado volume da produção.

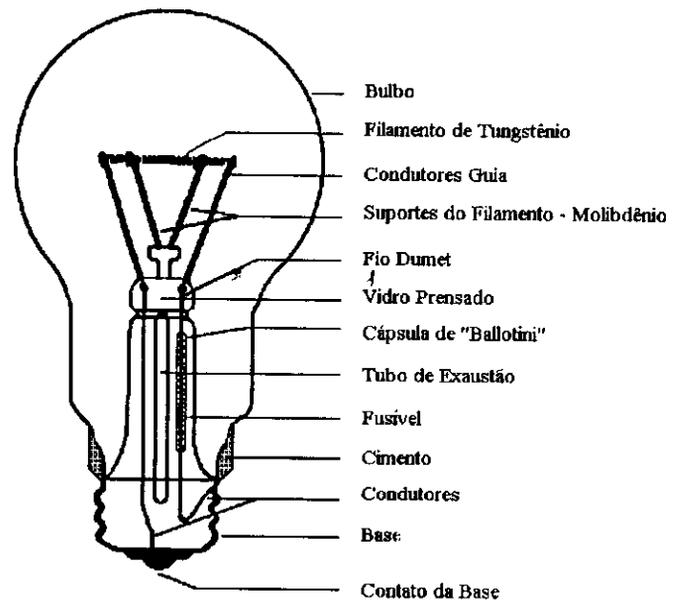


Figura 3.2.1 - Uma lâmpada incandescente montada⁷⁶

As linhas de produção das lâmpadas incandescentes de uso geral têm nível bastante elevado de automatização. Nas máquinas mais lentas os componentes são alimentados manualmente e as lâmpadas, no final do processo recebem o teste de continuidade elétrica, também de forma manual. As máquinas que só recebem supervisão humana e são assistidas por computador chegam a produzir, em regime contínuo, da ordem de milhares de lâmpadas por hora. Isto nos permite fazer uma estimativa da capacidade nacional de produzir lâmpadas, da ordem de 6×10^4 lâmpadas/hora.

Ainda, conforme informações pessoais que recebemos da Osram, Philips e GE, cerca da metade da produção nacional são lâmpadas convencionais de 60 W.

O tungstênio atualmente usado é importado na forma de arame com pouco mais de 1 mm de diâmetro. As etapas tecnológicas (no país) são iniciadas na trefilação deste fio até o diâmetro conveniente. Após esta operação, ele é espiralado pelo uso de um fio guia, recebe tratamento térmico e finalmente o fio guia é eliminado por corrosão.

Caso o filamento tenha ficado extremamente frágil isto pode indicar problemas na fase de dopagem²⁷ e se houver contaminação por ferro isto é um indicativo de problemas na trefilação⁴⁸. Caso o tratamento térmico não tenha atingido a temperatura necessária poderão ocorrer mudanças precoces nas características elétrica e fotométrica das lâmpadas⁴¹. Como vemos, bastante conhecimento cerca este ponto delicado da lâmpada.

A vida e a eficiência das lâmpadas incandescentes com enchimento à gás dependem do transporte de massa e calor do filamento e é sabido que no final da vida da lâmpada a perda relativa de massa do filamento pode ser aproximada a uma constante. A vida pode então ser reciprocamente relacionada com o transporte de massa⁵⁹.

No caso de falha anormal, quando o acúmulo de tungstênio depositado provoca o aparecimento de arco elétrico, sucesso foi obtido com o "getter" composto de fósforo, nitrogênio e bromo [(PNBr₂)₃], usado em lâmpadas a halogênio⁶⁰.

Algumas teorias sobre os pontos quentes ("Hot Spot") do filamento têm sido elaboradas^{45,46,47,51}, correlacionando o seu aparecimento e crescimento com a vida da lâmpada.

Mais recente é o conhecimento do chamado "Filament Notching" que são irregularidades na forma de dentes de serra que aparecem em toda a superfície do filamento, sendo apontado como provável causa de falha quando a lâmpada apresenta vida da ordem de metade da vida nominal⁷².

Os pontos que estão estabelecidos mostram que em condições ordinárias de laboratório, a vida da lâmpada é controlada pela evaporação normal de tungstênio do filamento, e quando o mecanismo dominante de falha for a evaporação normal do filamento a lâmpada deverá atingir sua vida esperada de projeto⁷². Porém, o exato conhecimento sobre quais processos controlam a vida das lâmpadas ainda não foi obtido^{61,40}.

Outra tecnologia importante está presente nas lâmpadas que chamamos de refletoras (espelhadas) e projetoras, cuja produção nacional é estimada em $2,5 \times 10^6$ unidades/ano. Consiste na aplicação de uma camada de alumínio em parte da parede do bulbo das lâmpadas. No passado, a prata era usada com esta mesma finalidade¹³. Isto permite algum controle do fluxo luminoso pela própria lâmpada. Caso o projeto da lâmpada leve em consideração uma geometria adequada para o bulbo, podemos ter otimização deste controle, com ganho superior a 19 %⁹⁷ na intensidade luminosa máxima.

Com algum conhecimento da função que cada componente da lâmpada deve desempenhar e se observarmos as diferenças dentre as lâmpadas de uso geral, disponíveis no mercado local, poderemos identificar alguns avanços tecnológicos a elas incorporados:

a) A redução ou exclusão dos suportes do filamento é uma vantagem, pois diminuem a perda de calor por condução e indica uma qualidade mecânica superior do mesmo. As lâmpadas de 60 W, de um dos fabricantes nacionais, não possuem suporte para o filamento, enquanto as lâmpadas de outro fabricante possuem apenas um suporte.

Estes dois tipos de lâmpadas apresentam o filamento perpendicular ao eixo de simetria;

b) Um fabricante possui lâmpadas com bulbo reduzido (volume) em relação às demais, usando conseqüentemente menos vidro (que é dito ser o componente mais caro da lâmpada) e menos gás. Algum ajuste na pressão interna também pode ter ocorrido;

c) Até meados de 1992 as lâmpadas de um dos fabricantes tinham filamento simplesmente espiralados em lugar dos duplamente espiralados para potências menores que 100 W. Fomos levados a fazer esta constatação em função da sua eficiência reduzida (86 %), em relação às lâmpadas similares;

d) Alguns tipos de lâmpadas de um fabricante possuem filamento com montagem axial. Este tipo de filamento foi introduzido, nos EUA em 1956, para potências elevadas (≥ 500 W), e permite um fluxo luminoso maior e depreciação menor, apenas em função da nova posição do filamento usado²⁶.

É interessante notar, segundo Millar^{12,14} uma estreita colaboração entre as "companhias de energia elétrica" e os fabricantes no sentido de salvaguardar a qualidade das lâmpadas incandescentes e promover melhorias nestas lâmpadas produzidas no mercado americano. Estes fatos são citados, concomitantemente à presença de lâmpadas importadas, ditas de qualidade inferior àquela preconizada.

3.3 O CICLO REGENERATIVO DOS HALOGÊNIOS

A procura de soluções visando a redução da depreciação do fluxo luminoso (escurecimento do bulbo) das lâmpadas incandescentes confunde-se com a história da própria lâmpada.

Em 1881, Scribner registrou a primeira patente sobre a existência de benefícios proporcionados por uma reação química, entre o tungstênio e um halogênio, no interior de lâmpadas incandescentes⁷⁶. No ano seguinte, outra patente mencionava a inclusão de pequena porção de cloro (Cl_2) à lâmpadas com filamento de carbono e a vácuo³⁰.

Ao longo do tempo, mais teorias foram sendo somadas a estas, como a possível existência do ciclo regenerativo que já tinha sido concebida, mas resultados satisfatórios ainda não haviam sido atingidos.

A realização de correlações entre a adição de iodo (I_2) às lâmpadas incandescentes tubulares para aquecimento (em desenvolvimento) e algumas condições críticas de projeto, como a temperatura do bulbo (em quartzo) foi que levou Zubler e Mosby³⁰ ao entendimento necessário para poder fazer o ciclo halógeno funcionar de maneira satisfatória. A partir daí estavam "abertas as portas" para o desenvolvimento e aplicação da nova tecnologia, que ampliou o uso do princípio das lâmpadas incandescentes.

O mecanismo de funcionamento do ciclo está fundamentado na idéia de que o tungstênio evaporado do filamento, combina-se com o halogênio adicionado, impedindo sua deposição na parede do bulbo. E quando este composto chega próximo ao filamento, também por efeito térmico a reação ocorre no sentido inverso, completando o ciclo. A figura 3.3.1 ilustra o ciclo do iodo, dividindo o gradiente de temperatura radial que existe no interior da lâmpada em três zonas distintas e mostra a interação entre os elementos e compostos, em cada uma destas zonas. Nota-se a presença da impureza (A), que em geral é o oxigênio e sem a qual o ciclo não funciona³⁸.

A quantidade do halogênio a ser adicionado à lâmpada depende da quantidade do tungstênio a ser regenerado.

O excesso deste elemento pode trazer problema de corrosão, no caso dos halogênios mais reativos, e no caso do iodo perda de luz por absorção é um defeito predominante.

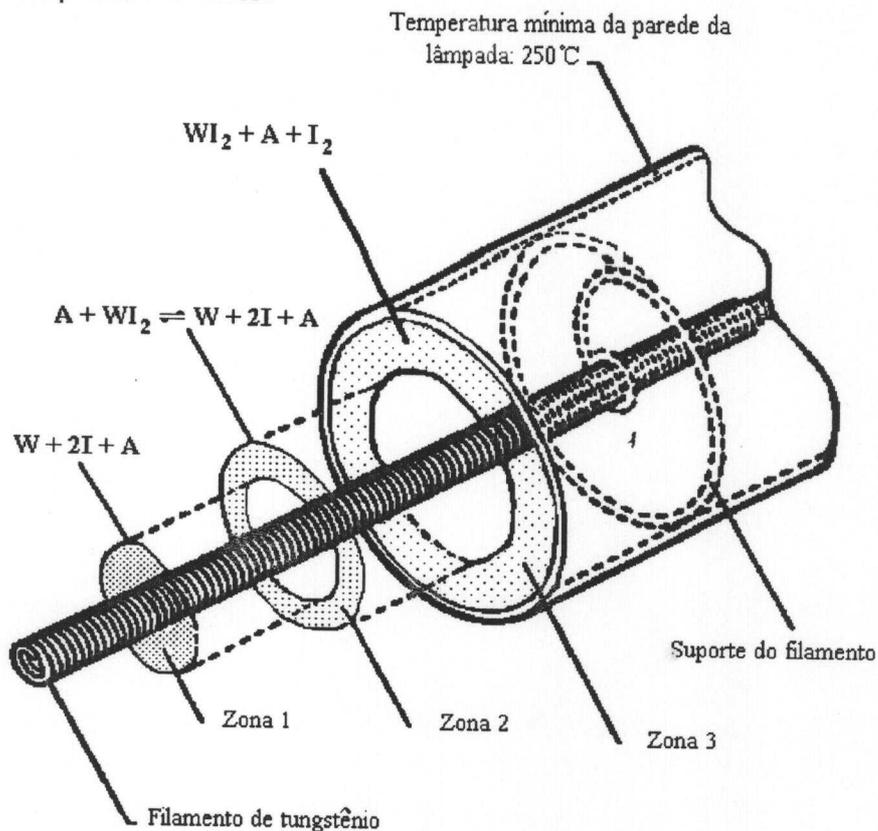


Figura 3.3.1 - Mecanismo simplificado do ciclo regenerativo do iodo.
Fonte: Wolfe e Letchford⁷⁶

O bromo apresenta a vantagem de poder ser introduzido na lâmpada em forma de gás, à temperatura ambiente, o que simplifica o processo de produção. A sua reatividade (maior que a do iodo) é de certa forma controlada pelo acréscimo de alguns compostos como o HBr, CH₂Br₂, CH₃Br, e o controle rígido do oxigênio (1 a 10 ppm)³⁷.

A expectativa de vida destas lâmpadas não tinha recebido modificações drásticas, quando em 1975 foi publicada uma elevação na vida de lâmpadas a halogênio (bromo), usadas em lâmpadas tipo refletora, de 3000 horas para 6000 horas⁵⁷, sendo este sucesso atribuído à redução na concentração de nitrogênio usado, de 50 % para 12 %.

A indicação da utilização do criptônio como principal gás de enchimento (em volume)⁵⁸ e os efeitos da temperatura do bulbo e pressão parcial do CH_2Br_2 na vida deste tipo de lâmpada⁶², só ocorreram dois anos mais tarde.

O ciclo regenerativo ideal (100 % regenerativo) é aquele em que o tungstênio evaporado retorna às regiões com menor diâmetro e conseqüentemente mais quentes do filamento ("a própria origem"). Isto reduziria a taxa de formação de defeitos, resultando num filamento com melhor distribuição de temperatura e uma perda líquida, por evaporação, igual a zero. O candidato, em potencial, capaz de proporcionar esta verdadeira "lâmpada ideal" é o flúor, elemento extremamente reativo.

Ainda que alguns progressos já foram registrados⁶⁶, como o uso de $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{P}_2\text{O}_5$ para a proteção do bulbo contra o ataque do flúor e o controle de repetibilidade da sua dose tenha atingido o valor preconizado de $\pm 0,15$ %. A sua aplicação prática é restrita pela acentuada corrosão do filamento, o que limita a vida da lâmpada em torno de 100 horas.

Teoricamente, todos os halogênios podem ser usados para compor o ciclo, contudo é a forma como reagem com os componentes e impurezas da lâmpada que determinam sua aplicação. A principal diferença entre eles está nas faixas de temperatura em que as diversas reações, próprias de cada ciclo, podem ocorrer de modo satisfatório.

3.4 O GÁS CRIPTÔNIO

A algum tempo já é conhecido que o uso do criptônio como gás de enchimento, em lugar do argônio, traz melhorias ao desempenho das lâmpadas. Esta alternativa tem sido extensivamente usada em lâmpadas de tipo especial^{72,76} onde eficiência elevada é fundamental.

Exemplos clássicos versam sobre questões de autonomia e custos elevados de manutenção.

As lâmpadas incandescentes convencionais com enchimento em criptônio foram introduzidas, comercialmente, no mercado dos EUA desde 1968⁵⁵, enquanto em alguns países da Europa, lâmpadas na faixa de 40 W até 150 W, já estavam sendo usadas há muito mais tempo³⁵.

Nos EUA, o aumento na oferta competitiva de criptônio é devido ao crescimento na demanda de oxigênio (e conseqüente desenvolvimento desta área) para suprir a indústria do aço.

A demanda de criptônio pela indústria de lâmpadas, em geral, está em crescimento e de certa forma pode ser relacionada à oferta de lâmpadas com eficiência melhorada.

A troca do argônio pelo criptônio não é restrita às lâmpadas incandescentes; como exemplos, podemos citar o caso das lâmpadas fluorescentes⁷⁶. Nelas esta simples troca proporciona uma redução na perda de energia pelo gás, com conseqüente aumento na eficiência, em 5 % para as lâmpadas com 38 mm de diâmetro ou uma redução de 10 % na potência da lâmpada com 26 mm (36 W).

A maioria das lâmpadas a halogênio que são produzidas no país (popularmente conhecidas como halógenas) têm como principal gás de enchimento o criptônio, associado à pequena quantidade de um composto de bromo.

Todo o criptônio que usamos, quer como insumo industrial, quer esteja incorporado ao produto comercializado, é importado. Ainda que não nos tenham sido fornecidas informações a cerca da pressão e temperatura, podemos obter os custos do argônio ultra puro (nacional) 351 US\$/m³, contra 171 US\$/ℓ para o criptônio ou seja um custo relativo (Kr/Ar) de

Este custo relativo é similar (+6 %) àquele dado por Coaton⁶³, 460, para a Inglaterra, em 1978, porém como eles são elevados, resolvemos realizar uma segunda cotação que encontra-se no final deste capítulo.

Uma lâmpada nacional típica de 60 W ou 100 W possui volume interno de aproximadamente 130 ml e se supormos que as informações de preço dos gases estão referidas às condições que encontramos no interior do bulbo da lâmpadas (85 %, em volume, de Kr, 25 °C e uma atmosfera), chegaríamos à 19 US\$/lamp., para o enchimento com Kr, contra 4 ¢US\$/lamp. para o argônio (Ar). Mesmo que haja alguma economia de escala para o criptônio, pois consideramos o custo de apenas um litro de Kr contra 10³ litros de Ar, havemos de concordar que o custo do criptônio seria proibitivo para estas dadas condições.

Através de correspondência fomos informados que na França a diferença de custo entre uma lâmpada convencional e uma com criptônio (cujo volume de gás é reduzido) é da ordem de 15 % (15/1/91 - Montpellier).

A redução no tamanho (ou volume) da lâmpada é uma solução já usada pelos japoneses, isto agrega outras economias, principalmente a diminuição da quantidade de vidro que é o mais significativo, em termos de custos (o filamento ocupa o segundo lugar). Outra solução é a "lâmpada dentro da lâmpada", um bulbo com dimensões reduzidas envolve o filamento e este é montado no interior de um outro bulbo com base E-27 (lâmpadas convencionais).

O princípio que garante o melhor desempenho da lâmpada é bastante simples e lógico: o gás criptônio tem condutividade térmica menor que a do argônio, isto possibilita a redução da perda por condução do filamento.

O projeto das lâmpadas com criptônio, geralmente, segue pelo menos uma das seguintes direções⁵⁵:

- a) aumento da eficiência sem redução da vida nominal;
- b) aumento da vida nominal sem redução da eficiência;
- c) redução das dimensões de lâmpadas de mesma potência e com a mesma temperatura média na superfície;
- d) aumento da potência da lâmpada sem mudança dimensional e com a mesma temperatura média na superfície; e
- e) economias em energia e no custo de potência instalada.

Ao nosso ver, as direções dadas pelos itens (a), (c) e (e), supra, são as que melhor indicam o caminho que devemos seguir. Em especial, a última direção é a melhor, por estar em perfeita sintonia com nossos anseios de racionalização do uso e custo de energia sem redução do fluxo luminoso ou da vida nominal da lâmpada.

3.5 FILTRO REFLETOR DE INFRAVERMELHO

A última palavra em avanço tecnológico agregado às lâmpadas incandescentes é hoje conhecido pela sigla "infrared reflecting film - IRF".

O início da sua utilização é devido a esforços conjuntos entre a iniciativa privada e a universidade (Duro-Test Corp., M.I.T., Materials Research Corp. e Corning Glass Works). Ele foi anunciado em 1977⁶⁵ e preconizava redução de até 60 % no consumo de energia para um bulbo perfeitamente esférico. Em 1979, com os trabalhos ainda não concluídos, as lâmpadas eram planejadas para terem 2500 horas de vida nominal, economizarem pelo menos US\$ 5 durante este período (com base no custo médio de 3,5 ¢US\$/kWh) e terem preço menor que o custo da energia economizada.

No ano seguinte, este tipo de lâmpada foi divulgado pelo "Progress Committee of IES"⁷¹ como produto aprovado.

O princípio usado por esta tecnologia para aumentar a eficiência da produção de radiação visível pela lâmpada incandescente, que é basicamente uma fonte de calor (mais de 70 % da energia radiada) está baseado na redução da emissão de radiação infravermelha pela mesma, e uso desta energia para auxiliar o aquecimento do filamento.

A tarefa de redirecionamento do infravermelho é realizada pelo filme ou sanduíche de filmes (filtros, que também deve ser transparente à radiação visível) e pela geometria do bulbo. Os dois pontos críticos fundamentais estão no exato direcionamento da radiação infravermelha sobre o filamento, o que justifica a premissa de bulbo esférico, e a eficácia de desempenho do filtro a ser utilizado. O resultado deste trabalho apresenta a vantagem de necessitarmos uma menor quantidade de energia elétrica para manter o filamento à mesma temperatura que em uma lâmpada convencional.

A preocupação com a condição de igual temperatura para a determinação acurada do ganho de eficiência destas lâmpadas levou ao desenvolvimento de um sistema dedicado de medição para esta finalidade⁸².

Na figura 3.5.1 apresentamos os detalhes desta lâmpada (com bulbo não perfeitamente esférico) que apresentou 30 % de redução no consumo⁶⁵, ao lado de uma lâmpada convencional similar.

O aproveitamento do calor gerado tem sido empregado com sucesso, a pelo menos 25 anos, em lâmpadas a vapor de sódio à baixa pressão - LVSBP (com filmes de $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$) onde a condição de temperatura (260 °C) é bem menos severa que para as lâmpadas incandescentes.

Kostlin⁸⁰ discute as principais diferenças e aplicações para alguns tipos de filtros, citando aumento de eficiência, em lâmpadas incandescentes, por um fator (1,5), pelo uso do sanduíche (de filmes) ZnS/Ag/ZnS.

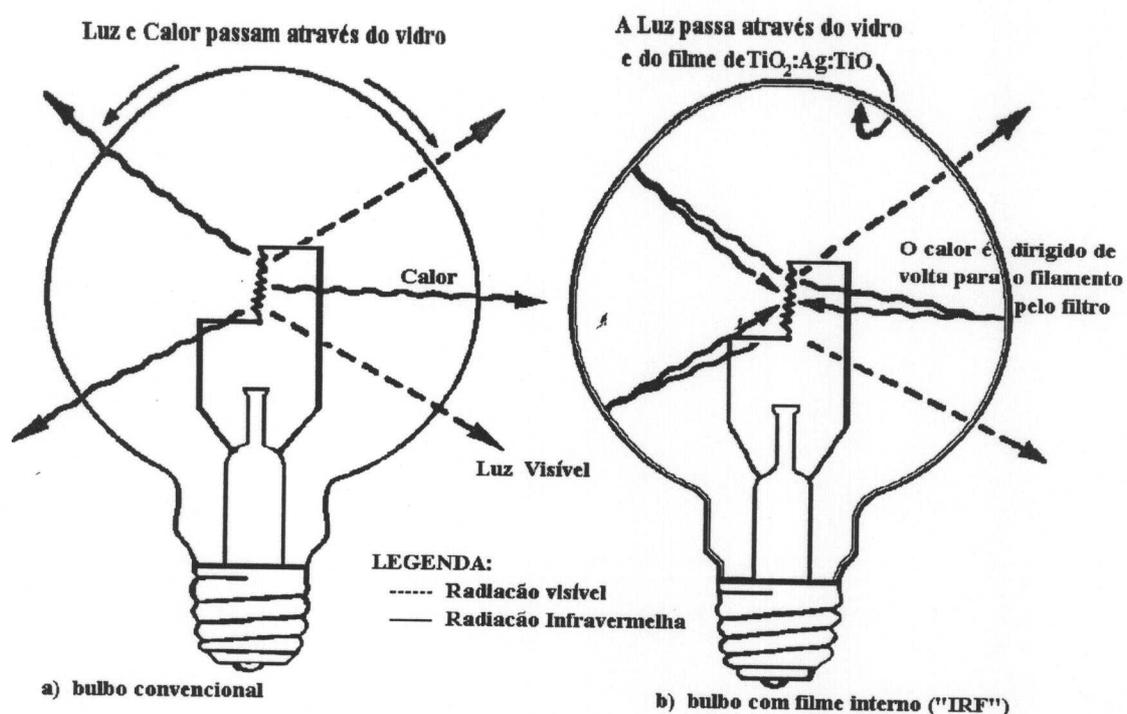


Figura 3.5.1 - Lâmpada incandescente com filamento à 2800 K emite 8 % da potência de entrada na forma de luz. a) bulbo convencional com significativa emissão de calor. b) bulbo com "IRF": emitindo a mesma quantidade de luz que o bulbo convencional e consumindo 30 % menos eletricidade⁶⁵.

Em 1984, alguns problemas ligados à produção em larga escala ainda precisavam ser resolvidos⁸¹, mas a aplicação do "IRF" em lâmpadas a halogênio, em bulbos com geometria cilíndrica, desde 1981 já era realizada⁹⁹. As características de desempenho publicadas, mostram valores de eficiência como: 38,8 $\ell\text{m}/\text{W}$, 650 W, 400 h, 120 V (especial, 3200 K); para 2000 h de vida e 120 V: 28,6 $\ell\text{m}/\text{W}$, 350 W e 35,6 $\ell\text{m}/\text{W}$, 900 W.

Também obtivemos os preços das lâmpadas IRF⁹⁰ com vida nominal de 2000 h: US\$ 22,14 e US\$ 38,51, respectivamente, podendo compará-los contra US\$ 8,89 (500 W) e US\$ 12,59 (1500 W) que são as lâmpadas incandescentes convencionais a serem substituídas por elas.

O cálculo do custo da luz (para eletricidade a 8 ¢US\$/kWh) apresenta vantagem relativa de 17 % (62 ¢US\$/10⁶ h) apenas no caso da substituição de 1500 W por 900 W. Nesta substituição o ganho de eficiência citado é de 50 %, dos quais 10 % são devidos ao uso do criptônio e 40 % pelo uso do filme (o ganho do filme decresce com a diminuição do comprimento da lâmpada)⁸¹.

Hoje a lâmpada incandescente de ponta, conhecida desde 1989, combina os três aspectos tecnológicos que abordamos, o ciclo de halogênio, o criptônio e o o filtro IRF, aplicados a um bulbo não cilíndrico, para potências de 60 W e 100 W, em lâmpadas tipo refletora ("PAR"). Sua eficiência, em relação à lâmpadas similares é maior que 35 % e situa-se na faixa de 35 % a 40 % para espécimes da linha de produção⁹⁹.

NOTA: RESULTADOS DA SEGUNDA PESQUISA DE PREÇO MÉDIO E OFERTA DE ALGUNS GASES PARA O MERCADO LOCAL, REALIZADA EM 20/5/93, JUNTO À AGA (SETOR DE VENDAS).

Produção Nacional:

- Argônio (ultra puro): 85 US\$/m³, (maior valor 174 US\$/m³);
- Nitrogênio (ultra puro): 80 US\$/m³.

Importação e Internação (do invólucro - cilindro) no país de Criptônio (99,995 %): 8,7 US\$/ℓ e mais 20 US\$/cilindro (100ℓ) - mês.

Para economia de escala poderá haver redução de até 20 % nestes preços médios. Fomos ainda informados que atualmente não existe demanda por criptônio, nem xenônio (usado pela indústria nuclear) e que um fabricante de lâmpadas possuía criptônio excedente, em condições de fornecer.

O valor de 174 US\$/m³ foi fornecido como sendo o maior valor da listagem do promotor de vendas, como argumento de explicação para a diferença observada, em relação ao preço fornecido pelo setor de produção, pela mesma AGA, em 1990.

4 - RACIONALIZAÇÃO ENERGÉTICA

No capítulo anterior fizemos um breve esboço dos conhecimentos disponíveis que hoje cercam as lâmpadas incandescentes. Demos ênfase especial à tecnologias que podem trazer ganhos econômicos reais para toda a sociedade e promover a racionalização no uso da energia.

Todas estas tecnologias estão em uso no mercado externo. Em termos do nosso país, o criptônio e o "IRF" podem ser considerados apenas como tecnologias em vias de serem emergentes. A produção de lâmpadas a halogênio é diminuta e não atende a demanda do mercado.

A indicação de que a economia caminha na direção do livre mercado pode servir como argumento para justificar a ausência de investimentos em produções locais. Também sabemos que é muito pequena a influência da Universidade e Institutos de Pesquisa sobre a colocação no mercado da lâmpada A ou B. Esta decisão, em geral, é tomada pelo fabricante ou distribuidor ou importador. Porém, é a necessidade de que o conhecimento destas (e outras) tecnologias possam ser mais (e melhor) difundidas que nos preocupa. É comum ouvirmos junto ao meio técnico, a seguinte frase: " Esta não é uma lâmpada incandescente, ela é uma lâmpada halógena ".

Alguém pode se referir à figura 4.0, principalmente em relação à evolução na eficiência das lâmpadas para iluminação pública, como o resultado de pressões comerciais inexoráveis objetivando a melhoria, sobretudo, econômica dos serviços de iluminação. Esta figura também nos mostra a eficiência baixa das lâmpadas incandescentes, em relação aos outros tipos de lâmpadas.

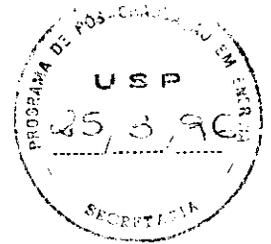
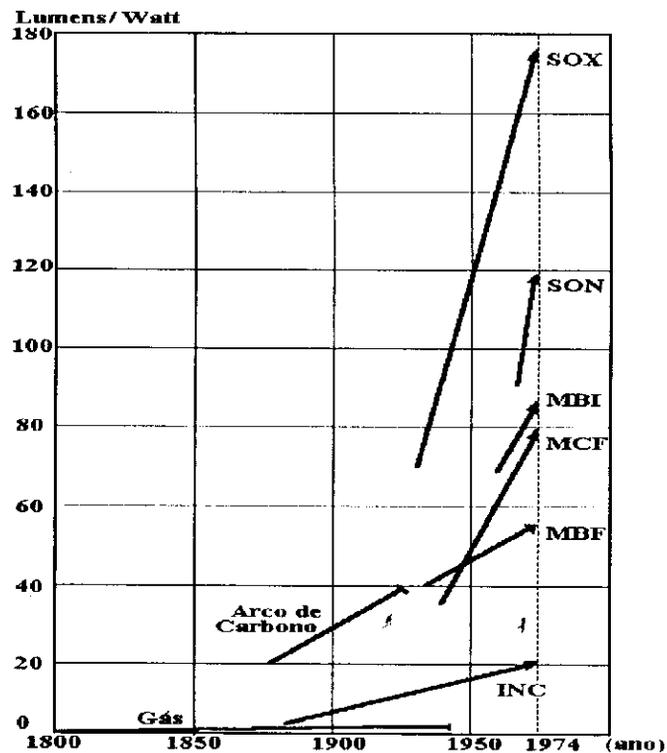


Figura 4.0 - O desenvolvimento das lâmpadas^{36,53}

Para as lâmpadas incandescentes, do ponto de vista da energia gerada, a luz visível é um efeito secundário. Esta diminuta energia (aproximadamente 10 % da potência elétrica suprida) que está situada na região visível do espectro ainda deve ser ponderada pela sensibilidade espectral média do olho humano para posteriormente chegarmos aos lm/W . Como já foi dito, hoje usamos a sensibilidade espectral média do olho humano, da visão fotópica para esta determinação (definição CIE, 1924).

O uso da sensibilidade espectral média do olho humano para visão escotópica, em uma nova definição do lúmen que está sendo proposta para discussão¹⁰⁵, traria alterações significativas à figura 4.0. Para ilustrar as conseqüências à eficiência energética, Berman¹⁰⁵, mostra em termos dos lumens efetivos na pupila, que há uma equivalência prática entre as eficiências de uma lâmpada a vapor de sódio à alta pressão (LVSAP) de 35 W e uma lâmpada incandescente de 150 W.

As lâmpadas incandescentes não são os dispositivos que mais gastam energia, porém são consumidores de eletricidade, em maior número e provavelmente os menos eficientes.

A nossa contribuição principal, na busca de instrumentos que tornam a sociedade capaz de promover a melhoria da eficiência, em lâmpadas incandescentes de uso geral, compõem as seções seguintes deste capítulo. Ela pode ser resumida na elaboração de um procedimento original para o cálculo da vida econômica da lâmpada, que estritamente por questões técnicas, indica a vida que a lâmpada deve ter para que o consumidor pague o menor custo pela luz. Em seguida é determinado um procedimento para analisar a variação do custo da luz para a sociedade, em função da tensão nominal da lâmpada e a tensão no ponto de luz (tensão de trabalho). Finalizando a parte teórica são apresentadas formulações que permitem visualizar as possíveis alterações aceitáveis no custo da lâmpada em consequência de alterações propostas nas suas características. Alguns resultados do custo da luz para a população, a partir de lâmpadas incandescentes de 60 W nominais e 53,7 W (122,5 V; 16 ℓ m/W; 749 h e 862 ℓ m iniciais - lâmpada americana de característica nominais: 52 W; 120 V; 1000 h e 800 ℓ m iniciais) finalizam este capítulo.

4.1 O PROCEDIMENTO ELABORADO

Foi a partir do trabalho de Merrill¹⁶, evidentemente com os ajustes necessários ao escopo deste manuscrito, que desenvolvemos um procedimento para o cálculo da vida otimizada de lâmpadas incandescentes para uso domiciliar.

O resultado deste nosso desenvolvimento diferencia-se frente aos demais trabalhos analisados, já que seu resultado considera apenas grandezas externas à própria lâmpada, conseqüentemente, facilmente mensuráveis, com acuidade que possamos desejar, quais sejam:

b: preço da lâmpada ao consumidor [US\$];

c: preço da energia elétrica ao consumidor [US\$/kWh];

P_0 : potência inicial da lâmpada incandescente [W];

M: taxa de depreciação da potência em função do tempo [W/h];

\emptyset_0 : fluxo luminoso inicial da lâmpada incandescente [l m]; e

K: taxa de depreciação do fluxo luminoso em função do tempo [l m/h].

Os quais devidamente tratados, vide ANEXO H, fornecem uma expressão do tempo de vida ($t_{1,2}$) para um valor mínimo do custo da iluminação (da luz), em [US\$/ 10^6 l m.h], igual a:

$$t_{1,2} = \{-b.K \pm [K^2.b^2 + (K.P_0 - M.\emptyset_0).\emptyset_0.b.c]^{1/2}\} / c.(k.P_0 - M.\emptyset_0)$$

Usando valores típicos (ou padrões) de depreciação das lâmpadas incandescentes para uso geral, em operação normal, dados pela figura 8 - 13 (a) da publicação "IES - 1984"⁷⁹, derivamos uma expressão geral para o tempo de vida otimizado, qual seja a vida nominal da lâmpada (m) (isto não fora antes considerado; na literatura coligida, as considerações, em geral são para lâmpadas com vida de 1000 h ou seja o trivial), resultando numa expressão que é função apenas dos preços da lâmpada e energia elétrica; e de sua potência inicial (ou nominal); e um coeficiente(R), assim:

$$m = R.b/c.P_0,$$

R = 4,92 - para as depreciações típicas dadas pelo IES ou (2,9 a 5,1) - para as depreciações típicas de lâmpadas brasileiras de 60 W (resultado

A partir de uma análise mais acurada, uma ressalva deve ser registrada quanto ao comportamento das lâmpadas incandescentes nacionais, em relação ao preconizado (como padrão) pela publicação IES - 1984. Ao fazermos uso do procedimento proposto por Hering⁵ se faz necessário o cálculo da constante (k) citada na página 23, $[W/lm.h]$, a qual associa por razão, as depreciações de fluxo luminoso e potência. A comparação desta constante (k), calculada a partir de dados obtidos das lâmpadas brasileiras e os valores da publicação IES, permitiu verificar que para lâmpadas de potência nominal abaixo de 60 W, as lâmpadas nacionais têm depreciação bastante superior àquela preconizada pelo IES, enquanto que para potência nominal acima de 60 W (inclusive), os valores encontrados na prática são consistentes com os valores de depreciação indicados no IES. Esta diferença pode advir do fato de que as lâmpadas nacionais de potência nominal abaixo de 60 W não possuem gás de enchimento ou seja, serem a vácuo. Esta constatação indica que a vida nominal otimizada, obtida a partir deste método, é superior aos valores encontrados ou em outras palavras tais lâmpadas não estão ainda otimizadas no Brasil.

4.2 TENSÃO ELÉTRICA DE TRABALHO

Definiremos a tensão elétrica presente nos terminais da lâmpada como tensão de trabalho da mesma, pois é importante diferenciá-la da tensão nominal.

A figura 4.2.1 nos mostra a forma como a eficiência das lâmpadas incandescentes varia em função da sua tensão nominal de projeto.

Ao contrário dos sistemas de transmissão, onde uma elevação da tensão é considerada para minimizar as perdas, nas lâmpadas incandescentes existe um ganho na sua eficiência com o decréscimo da tensão elétrica de projeto. Porém, deve ficar claro que para uma tensão elétrica de projeto definida e implementada, se a lâmpada funcionar abaixo deste valor teremos o aumento nas suas perdas⁹ e redução na sua eficiência.

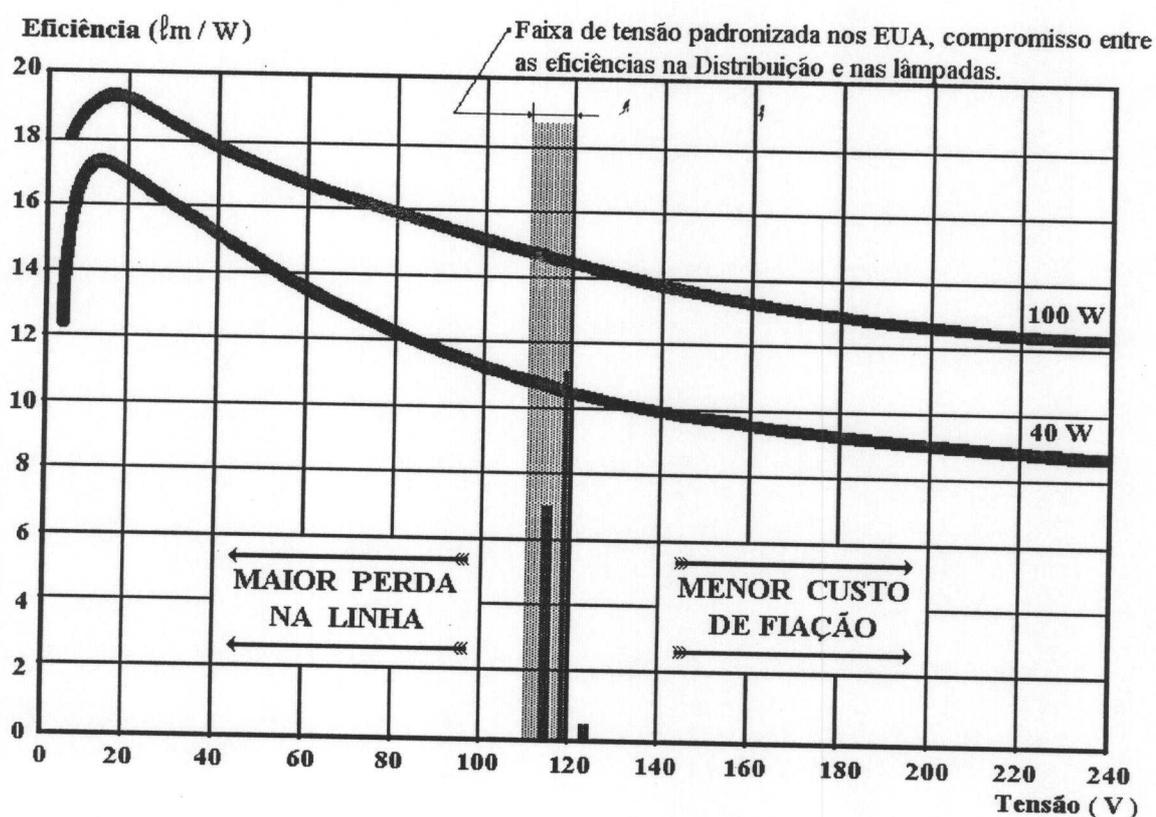


Figura 4.2.1 - Eficiência e tensão de projeto para lâmpadas incandescentes com filamento de tungstênio (100 W e 40 W)²⁵

As características das lâmpadas incandescentes como seu fluxo luminoso, potência e vida útil estão relacionadas com os respectivos valores nominais através de equações empíricas^{15,27,33,49,72,76,79}. Estas

O número de coeficientes de cada equação pode ser reduzido à apenas um coeficiente, sem incorrerem em erro expressivo, caso nos limitemos à variações pequenas na tensão de trabalho, da ordem de 10%¹⁵.

Ainda que o coeficiente dependa do tipo de lâmpada, sua determinação pode ser feita mediante levantamentos em laboratório. No ANEXO J apresentamos alguns coeficientes obtidos de lâmpadas nacionais.

Quando desejarmos operar uma dada lâmpada de forma que a mesma tenha determinada vida útil, digamos a vida econômica, para um cálculo aproximado poderemos fazer uso da equação empírica correspondente. Desta forma a sua tensão de trabalho fica determinada (aliás, esta é uma das aplicações da engenharia de iluminação).

Porém, se quisermos determinar o custo da luz para a sociedade ou saber quão distante do valor mínimo o custo está, devemos usar como entrada as tensões de trabalho dos pontos de luz desta sociedade. Infelizmente, neste momento, estas informações não estão disponíveis. O máximo que pudemos conseguir foram as tensões nominais praticadas por cada concessionária do país (fonte: Eletrobrás).

Esta lacuna poderia ser preenchida mediante o levantamento em campo. Mas, resolvemos contorná-la supondo que as tensões de trabalho estão distribuídas com probabilidades dadas por duas curvas normais reduzidas (gaussianas), justapostas no ponto de máximo. Isto é consequência de que nos limites impostos pela legislação, a tensão elétrica tem valores diferentes na parte superior e inferior da distribuição de tensão. Este máximo é a nossa estimativa para o valor nominal. A parcela da população brasileira considerada como referencial para este nosso trabalho é de um sigma ou 68%.

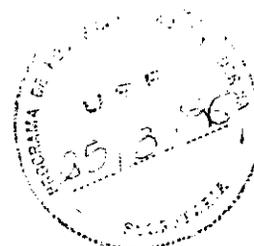
Vamos supor que os limites, dados em portaria, correspondem a quatro sigma.

O procedimento consiste em se calcular o custo unitário da luz para a sociedade, cujas lâmpadas estão submetidas à tensão elétrica de trabalho conforme esta distribuição proposta e têm como valor mais provável (nominal - real) algum ponto dentro da faixa dada pela legislação.

Assumindo, por exemplo, alguns pontos diferentes para tensão elétrica nominal (real) do sistema teremos o comportamento do custo da luz para esta fração (68 %) da sociedade. Os resultados destes cálculos para três tipos de lâmpadas são dados nas figuras 4.5.2 e 5.3.

É interessante ressaltar que este procedimento pode ser aplicado aos demais equipamentos elétricos cujo desempenho também está fortemente relacionado com a relação entre sua tensão nominal e a tensão real de energização.

4.3 CUSTO ADICIONAL PARA A LÂMPADA



Ao compararmos os preços hoje praticados pelo comércio local e suas respectivas médias dos últimos anos (vide ANEXO B) veremos que as diferenças não são significativas, em relação ao mercado externo* para lâmpadas incandescentes de uso geral (100 W e 150 W). Isto indica uma condição de equilíbrio mundial no que se refere ao custo final para o consumidor para este tipo de lâmpada (com o halogênio a situação é diferente**).

* - Dinamarca (1991): 100 W, US\$ 0,88; 150 W, US\$ 1,40; e
 - EUA (1989): 100 W, 750 h, US\$ 0,77; 90 W, 750 h, US\$ 0,78; que corrigidos por inflação anual de 3,3 % resultam em US\$ 0,86 e US\$ 0,87, respectivamente.

** - EUA (1993): halogênio: 90 W / 2000 h / US\$ 4,41; e
 - BRASIL (1993) halogênio: 100 W / 2000 h / US\$ 10; 150 W / 2000 h / US\$ 11.

Qualquer alteração que venha ser aceita e implementada nas características atuais das lâmpadas pode servir de justificativa ao fabricante para pleitear a elevação dos preços. Assim, deixaremos estabelecido, do ponto de vista do custo da luz para o consumidor, que diferenças são aceitáveis em função das novas características.

Desenvolvimento similar foi realizado por Thouret et al.⁵⁵ para estudar o custo máximo admissível às lâmpadas incandescentes com criptônio.

Desenvolvimento similar foi realizado por Thouret et al.⁵⁵ para estudar o custo máximo admissível às lâmpadas incandescentes com criptônio.

A equação base é aquela que nos fornece o custo da luz (U), na sua forma genérica ou seja:

$$U = (10/E) \cdot [(b/P \cdot L) + c] \quad (4.3.1)$$

onde:

E : eficiência da lâmpada incandescente [lm/W];

b : preço da lâmpada ao consumidor [US\$];

P : potência da lâmpada incandescente [W];

L : vida da lâmpada incandescente [h]; e

c : preço da energia elétrica ao consumidor [US\$/kWh].

Suponhamos que uma lâmpada com eficiência (E), preço (b), potência (P) e vida (L), tenha servido de referencial para a realização de uma nova lâmpada. As alterações realizadas, em relação ao referencial, podem ser escritas como $(E + \Delta E)$, $(b + \Delta b)$, $(P + \Delta P)$ e $(L + \Delta L)$, respectivamente.

$$U_N = [10/(E + \Delta E)].\{[(b + \Delta b)/(P + \Delta P).(L + \Delta L)] + c\} \quad (4.3.2)$$

A condição econômica que naturalmente deve ser imposta é que o custo da luz devido a nova lâmpada (U_N) seja menor ou igual ao custo da luz produzida pela lâmpada atual ou referencial, expressa por:

$$U_N \leq U \quad (4.3.3)$$

Isto nos levaria à seguinte condição geral para o aumento de preço (Δb) da lâmpada nova:

$$\Delta b \leq b.\{(\Delta L/L) + (\Delta P/P) + (\Delta L/L) + [(\Delta P/P).(\Delta L/L)]\} + (\Delta E/E). \\ \{1 + (\Delta P/P) + (\Delta L/L) + [(\Delta P/P).(\Delta L/L)]\}.(b + c.P.L) \quad (4.3.4)$$

Podemos agora explicitar alguns dos casos particulares da equação 4.3.4, assim para:

a) Aumento da eficiência e decréscimo da potência, sem alteração da vida ($\Delta L = 0$):

$$\Delta b \leq (\Delta E/E).[1 - (\Delta P/P)].(b + c.P.L) - b.(\Delta P/P) \quad (4.3.5)$$

b) Aumento da eficiência sem alterações da vida ou potência ($\Delta P = \Delta L = 0$):

$$\Delta b \leq (\Delta E/E).(b + c.P.L) \quad (4.3.6)$$

c) Aumentos da eficiência e vida, sem alteração da potência ($\Delta P = 0$):

$$\Delta b \leq (\Delta E/E).[1 + (\Delta L/L)].(b + c.P.L) + b.(\Delta L/L) \quad (4.3.7)$$

d) Aumento da vida sem alterações da eficiência ou potência ($\Delta E = \Delta P = 0$):

$$(\Delta b/b) \leq (\Delta L/L) \quad (4.3.8)$$

Esta equação estabelece que a variação relativa do custo deve ser menor ou igual à variação relativa da vida ou seja, para uma diminuição da vida nominal não é possível aceitar um aumento de custo da lâmpada, sem elevar o custo da luz para o consumidor.

e) Aumento da vida e redução da potência sem alteração da eficiência ($\Delta E = 0$):

$$\Delta b \leq b \cdot \{(\Delta L/L) - [(\Delta P/P) \cdot (\Delta L/L)] - (\Delta P/P)\} \quad (4.3.9)$$

Um caso particular da equação 4.3.9 é verificado para a condição da não ocorrência do aumento de vida preconizado:

$$e1) \quad \Delta b \leq - b \cdot (\Delta P/P) \quad (4.3.10)$$

Onde o aumento de custo permitido é negativo, então uma redução de custo deve ser aplicada para equilibrar a redução de potência que não traz qualquer melhora no desempenho da lâmpada.

O requisito da manutenção do mesmo fluxo luminoso que ocorre na lâmpada atual, para a lâmpada nova, já foi mencionado ao longo do trabalho e para a condição particular onde desejamos obter o maior ganho possível de eficiência e a maior redução possível da potência, pode ser escrito como:

$$E \cdot P = (E + \Delta E) \cdot (P - \Delta P) \quad (4.3.11)$$

Que reordenada permite obter a redução de potência admissível:

$$\Delta P = P \cdot [\Delta E / (E + \Delta E)] \quad (4.3.12)$$

A substituição de (4.3.12) em (4.3.5) permite que seja obtida a variação do custo desta condição particular supra citada, assim:

$$\Delta b \leq c \cdot L \cdot \Delta P \quad (4.3.13)$$

Este resultado nos mostra que quando a redução de potência for a única alteração no desempenho da lâmpada, o aumento de custo da lâmpada permitido ao consumidor deve ser menor ou igual ao valor da energia (watt-hora) evitada durante a vida da lâmpada.

4.4 RESULTADOS TEÓRICOS

Esta parte do trabalho é dedicada à apresentação de alguns resultados a partir dos procedimentos de cálculo apresentados no capítulo 2 e informações de preços (das lâmpadas e energia elétrica), contidas nos anexos B e C.

Nas tabelas abaixo apresentamos o resultado mais importante (para um mês), cujo resultado final, última tabela, traz a interação com o fabricante (ABILUX).

Na tabela 4.5.1 encontram-se as razões entre preço de lâmpada e o preço da energia. A tabela 4.5.2 apresenta os valores dados pela tabela 4.5.1 divididos pela potência de lâmpada, respectivamente, em virtude do cálculo da vida otimizada, na maioria dos procedimentos, ser proporcional a estes valores, a menos de um constante. Na tabela 4.5.3 mostramos os valores teóricos para a vida otimizada, para a faixa de consumo médio segundo cada autor, além das propostas levadas e expostas aos fabricantes, pelo autor e conseqüente contra proposta (1ª ponderação).

CUSTO DA LÂMPADA X10 ⁻² US\$	POTÊNCIA NOMINAL (W)	CONSUMO RESIDENCIAL (kWh/mês)					
		100	146	189	201	301	400
87±5	25	10,1±0,6	9,4±0,5	9,1±0,5	9,0±0,5	6,9±0,4	6,0±0,3
76±15	36	9±2	8±2	8±2	8±2	6±1	5±1
91±7	40	10,5±0,8	9,6±0,8	9,5±0,7	9,4±0,7	7,2±0,6	6,3±0,5
80±5	60	9,3±0,6	8,5±0,5	8,4±0,5	8,3±0,5	6,3±0,4	5,5±0,3
122±13	100	14±2	13±1	13±1	13±1	10±1	8,4±0,9
202±40	150	23±5	21±4	21±4	21±4	16±3	14±3
231±13	200	27±2	24±1	24±1	24±1	17±1	15,9±0,9
CUSTO DA ENERGIA ELÉTRICA (X10 ⁻² US\$/kWh)		86,47	92,48	95,45	96,46	126,51	145,43

TABELA 4.5.1 - RAZÃO ENTRE O PREÇO DE LÂMPADA PELO PREÇO UNITÁRIO DA ENERGIA ELÉTRICA, PARA ALGUNS NÍVEIS DE CONSUMO - VALORES EM (US\$/US\$/kWh) kWh

NOTAS: - O preço de cada tipo de lâmpada é o valor médio de sete estabelecimentos comerciais da cidade de São Paulo, em junho/1990, e está associado com a respectiva flutuação. Estas flutuações foram propagadas na tabela; e

- Desta tabela o número nos quadrados também representa o consumo mensal, em kWh para cada consumidor, que faz o custo da eletricidade igual ao custo da lâmpada.

POTÊNCIA NOMINAL (W)	CONSUMO (kWh/mês)					
	100	146	189	201	301	400
25	40±2	38±2	36±2	36±2	28±2	24±1
36	25±6	22±6	22±6	22±6	17±3	14±3
40	26±2	24±2	24±2	24±2	18±2	16±1
60	16±1	14,2±0,8	14±0,8	13,8±0,8	16±1	13,8±0,8
100	14±2	13±1	13±1	13±1	10±1	8,4±0,9
150	15±3	14±3	14±3	14±3	11±2	9±2
200	14±1	12,0±0,5	12,0±0,5	12,0±0,5	8,5±0,5	8,0±0,5

TABELA 4.5.2 - RAZÃO ENTRE OS VALORES DA TABELA 4.5.1 PELA POTÊNCIA NOMINAL DE LÂMPADA. PARÂMETRO: ALGUNS NÍVEIS DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA - VALORES EM DECAHORAS

NOTA: Os valores da tabela representam o número de horas que a lâmpada deve ser usada em um mês para que o custo mensal da eletricidade seja igual ao custo do capital inicial.

POTÊNCIA NOMINAL (w)	VIDA OTIMIZADA (h), SEGUNDO O AUTOR, PARA FAIXA DE CONSUMO: 189 kWh/mês						PROPOSTAS ⁽⁴⁾ - VIDA MED. (horas)	
	HERING (1893)	BOAST/MOON (1942)	PRAIS (1974)	JAY & C. (1980)	HUETTER (1983)	BURINI (1990)	EXPOSTA	1ª PONDERAÇÃO
25 (3)	1650	2200	2160	1890	2740	1770	2000	1000
36 (3)	600	1250	1320	1160	1670	1080	1300	1000
40 (3)	950	1370	1440	1260	1820	1180	1300	800
60	990	740	840	740	1060	690	850	800
100	970	670	780	680	990	640	750	800
150	1410	750	840	740	1060	690	750	800
200	1160	630	720	630	910	590	750	800

TABELA 4.5.3 - RESULTADOS DOS CÁLCULOS TEÓRICOS PARA A VIDA OTIMIZADA DE LÂMPADAS INCANDESCENTES - VALORES EM HORAS

NOTAS: (1) Pelo método de Hering, a lâmpada com 90 W nominais teria vida otimizada em: 101 x 10 horas;

(2) Pelo método de Millar, exclusivo para condições específicas de cada lâmpada com 60 W nominais; teríamos sua vida otimizada para $(81 \pm 4) \times 10h$;

(3) Ressalva, visto as lâmpadas nacionais destas potências terem depreciação no fluxo superior àquela preconizada pelo IES-1984, a vida ótima real destas lâmpadas deve ser inferior ao valor calculado; e

(4) Propostas de vida mediana apresentadas pelo autor aos fabricantes, em reunião na ABILUX: sugerida inicialmente (exposta) e sugerida após debate (1ª ponderação).

4.4.1 A vida econômica da lâmpada de 60 W

Na figura 4.5.1 apresentamos o resultado da aplicação do método original desenvolvido com uso das depreciações do IES, para o caso da lâmpada de 60 W e as quatro faixas de consumo. A distorção que ocorre em torno da abscissa 389 pode ser explicada pelo acentuado aumento da energia elétrica ocorrido neste período.

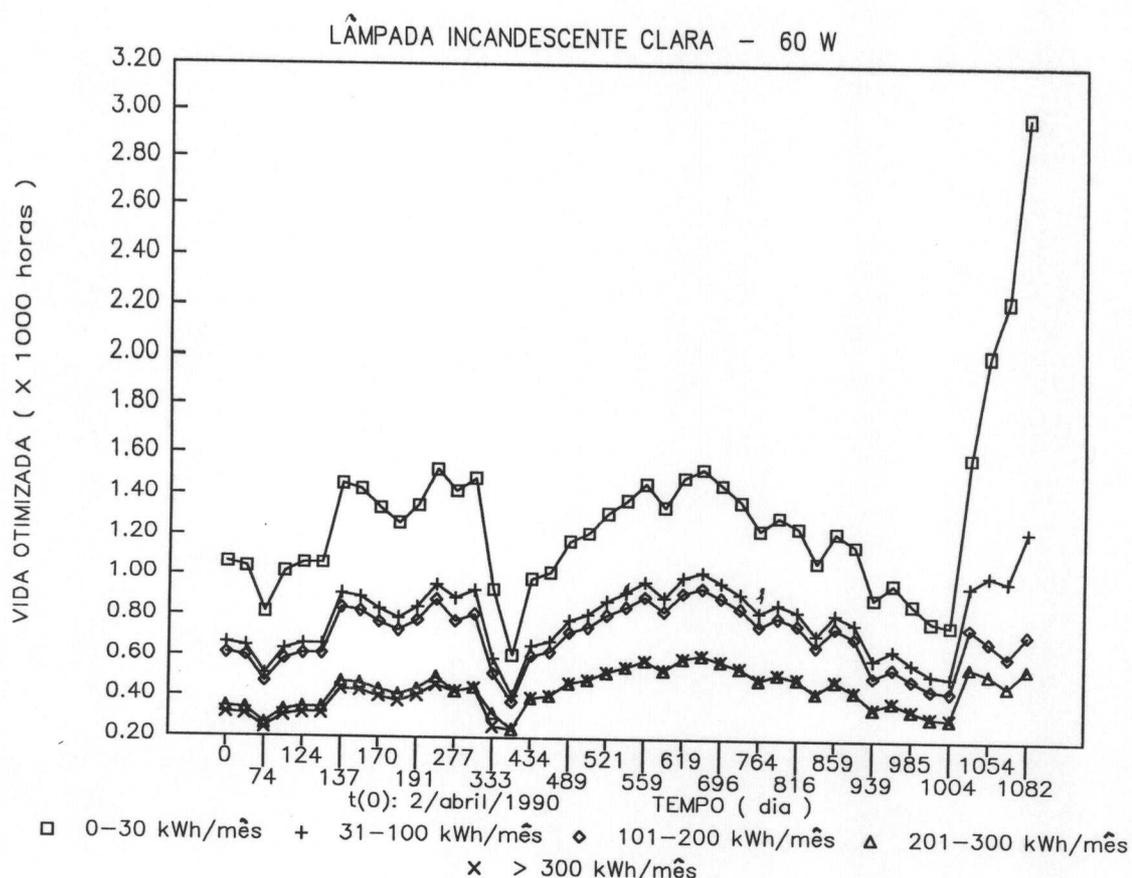


FIGURA 4.5.1 - VIDA OTIMIZADA AO LONGO DO TEMPO OBTIDA PELO MÉTODO ORIGINAL DISCUTIDO NO CAPÍTULO 4

4.4.2 O custo unitário da luz

A figura 4.5.2 apresenta o custo unitário da luz para a sociedade usando três lâmpadas diferentes. As duas lâmpadas de 60 W podem ser consideradas como os extremos da faixa das lâmpadas nacionais (a melhor e a pior). Enquanto a outra lâmpada é americana e foi escolhida de uma lista de lâmpadas do mercado⁹¹.

Como o comportamento do custo da luz, em função da tensão real nos terminais da lâmpada tem a forma parabólica, assim podemos verificar o quanto é importante que a lâmpada esteja otimizada, pois variações na tensão trarão mudanças menores no custo da luz.

Outras verificações são que as lâmpadas nacionais só ficam otimizadas a um custo sempre superior ao da lâmpada americana (referencial) e a uma tensão mais elevada, o que significa uma vida útil reduzida.

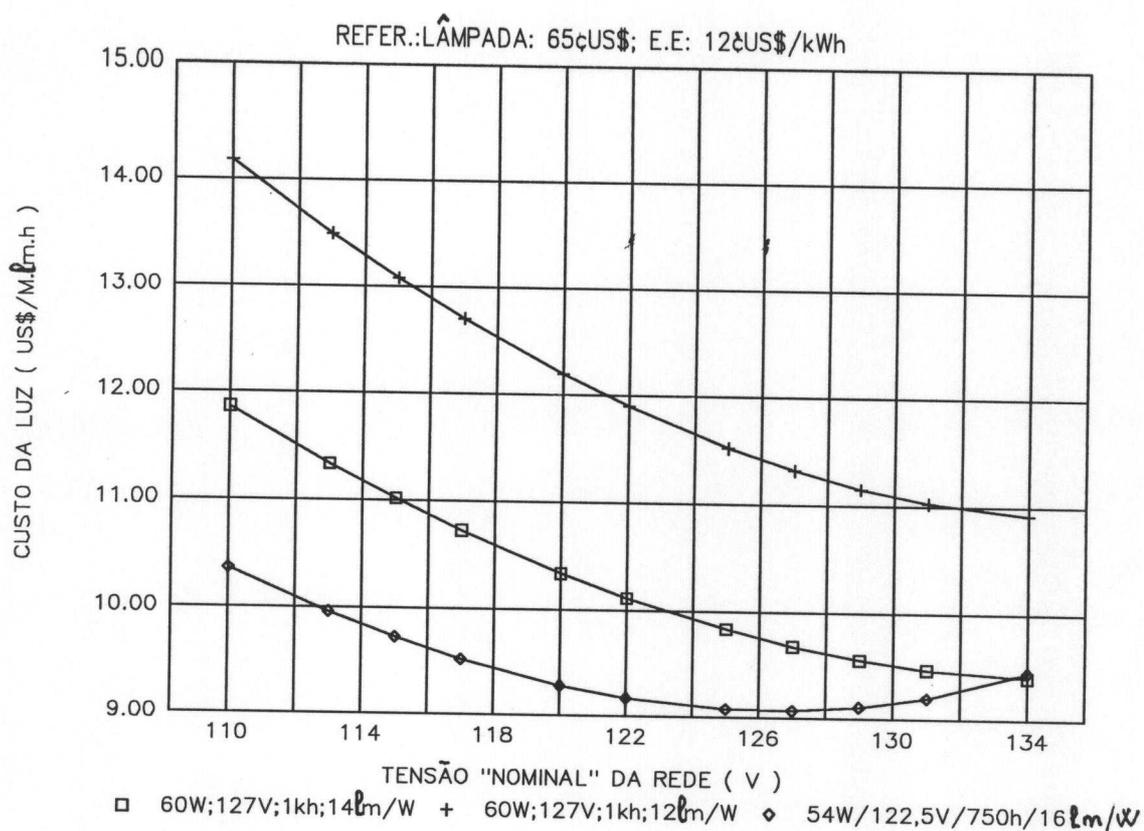


FIGURA 4.5.2 - CUSTO DA LUZ PARA A POPULAÇÃO

4.4.3 A variação no custo da luz pelo preço da lâmpada

O custo da luz varia linearmente com o preço da lâmpada e é pouco afetado por este preço como mostra a figura 4.5.3 para uma lâmpada típica.

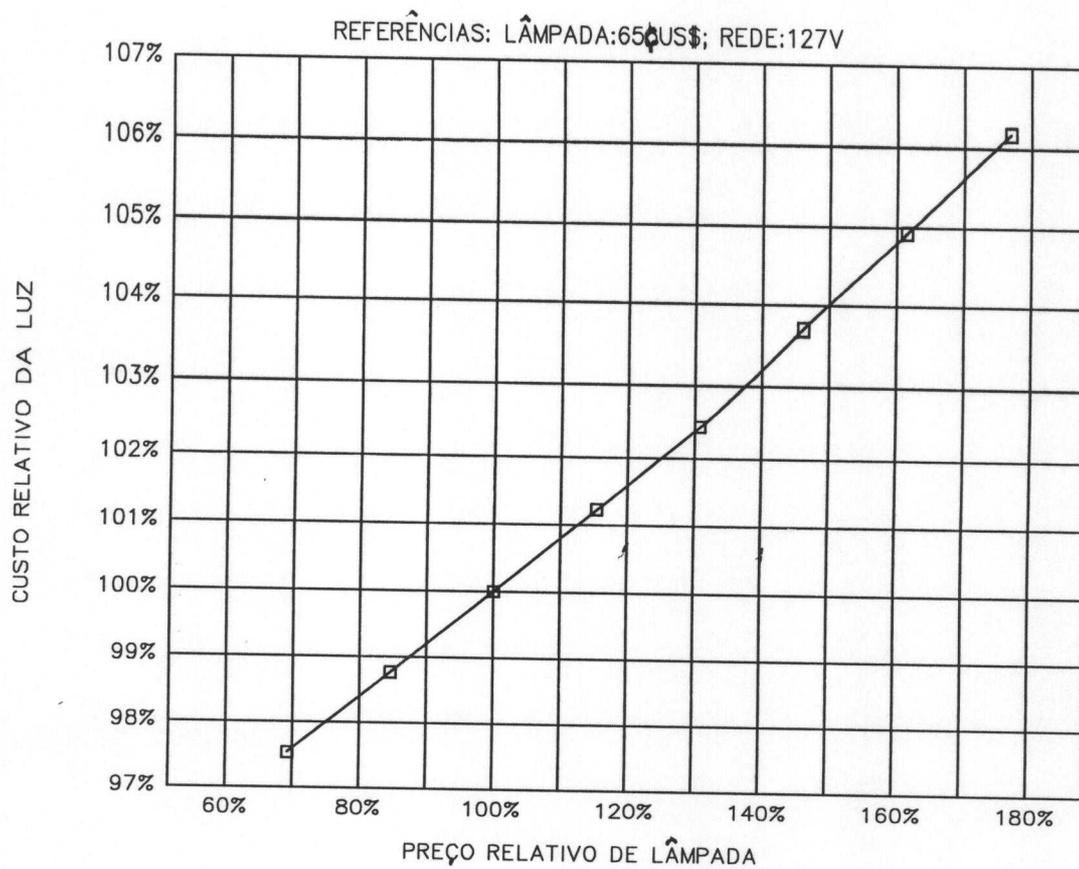


FIGURA 4.5.3 - VARIACÃO NO CUSTO DA LUZ PARA A POPULAÇÃO EM FUNÇÃO DA VARIACÃO NO PREÇO DA LÂMPADA 60 W

5 - CONCLUSÕES

As buscas pelo aumento na intensidade luminosa e redução do consumo de eletricidade, por razão econômica, estão trazendo avanços tecnológicos importantes às fontes artificiais de luz. A eficiência da lâmpada incandescente atual é superior por um fator maior que dez, em relação à primeira lâmpada incandescente que se possui registro.

Sob o ponto de vista da tecnologia envolvida na fabricação de lâmpadas incandescentes com determinada eficiência intrínseca, podemos afirmar que a quantidade e a qualidade desta tecnologia é diretamente proporcional ao tamanho da vida pretendida para esta lâmpada. A recíproca também nos parece ser verdadeira.

A produção de lâmpadas no país é extremamente dependente de tecnologias geradas no exterior, e apenas alguns produtos de "ponta" estão disponíveis num mercado com tendência a enxergar apenas o preço inicial. Até o ano passado tínhamos no mercado lâmpadas incandescentes de 60 W com tecnologia superada em 1936 (filamento simplesmente espiralado).

As tecnologias para utilização do criptônio e IRF estão definidas já há algum tempo e deveriam estar disponíveis no mercado interno. Ainda que muito pouco conhecidas, com baixo nível de produção interna e preço pouco atrativo, a lâmpada incandescente a halogênio é a única opção disponível ao consumidor que procura mais eficiência elétrica e não deseja migrar para outra família de lâmpada.

A substituição em larga escala das lâmpadas incandescentes por lâmpadas fluorescentes deverá ser incentivada no país após havermos estabelecido e implementado um programa para a reciclagem do mercúrio

O trabalho mostra que as características das lâmpadas incandescentes produzidas e usadas para as condições atuais de mercado no país não são satisfatórias, pois não minimizam o custo unitário da luz para o usuário. O redimensionamento destas características é viável sob o ponto de vista técnico e já identificamos a existência de interesse por parte dos fabricantes.

Um procedimento para analisar possíveis solicitações de aumento de preço, em função das alterações propostas foi estabelecido e as mudanças acordadas entre representantes da sociedade e fabricantes devem ser motivo de alteração da norma técnica em vigor.

5.1 EFICIÊNCIA OTIMIZADA

A eficiência otimizada de uma dada lâmpada não é um valor fixo, mas varia com condições externas à própria lâmpada. Para se determinar a eficiência otimizada de uma lâmpada devemos conhecer:

- a) A qualidade da lâmpada (referida a alguma norma técnica);
- b) O preço da lâmpada ao consumidor; e
- c) O preço da energia, sob as condições existentes no local onde a lâmpada será usada.

5.2 CUSTO DA LUZ

Uma lâmpada incandescente quando operada sob diferentes condições de preço da energia deve funcionar com eficiências diferentes de modo a trazer o custo de operação a um valor mínimo para produção de uma dada quantidade de luz.

Na figura 5.3 apresentamos as diferenças de custo da luz para 68 % da população brasileira que usa lâmpadas de 60 W, em relação a uma lâmpada disponível no mercado americano e por nós usada como referência na figura 4.5.2. Com base em um número mínimo de 124×10^6 pontos de luz no país ($5,1$ cômodos/domicílio * $24,36 \times 10^6$ domicílios - Brasil 1987) chegamos a uma diferença de até 42×10^6 US\$ para o país (12×10^6 US\$, para o ESP).

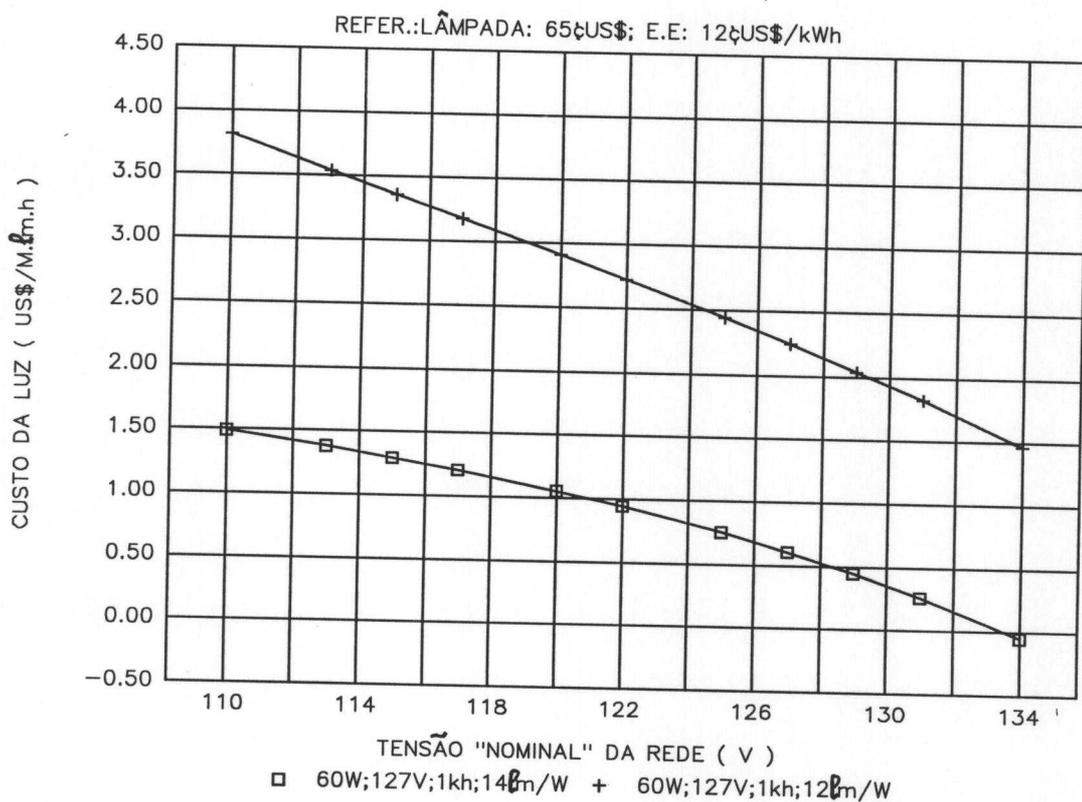


Figura 5.3 - Diferença de custo da luz para a sociedade

Este exemplo nos mostra a dimensão econômica decorrente de tal mudança ou os gastos desnecessários que a sociedade está tendo e continuará a ter caso alguma mudança não venha a ocorrer.

5.3 EXPECTATIVA DE VIDA

A vida nominal das lâmpadas incandescentes estabelecida em norma brasileira vigente não está otimizada ou seja, ela não conduz ao mínimo o custo da luz para o usuário.

A vida economicamente otimizada cresce com o preço da lâmpada e diminui quando a potência ou o preço da eletricidade aumenta. Estritamente por cálculo, cada potência nominal de lâmpada conduz a uma diferente vida economicamente útil.

5.4 UM PROGRAMA PARA AS LÂMPADAS

Dados disponíveis e levantados em relação aos últimos 16 anos (são dados no ANEXO F) revelam o diminuto controle que a sociedade possui sobre as características das lâmpadas incandescentes disponíveis no mercado nacional. Entendemos ser prudente o início imediato de um efetivo acompanhamento, pelo menos anual da situação. E para tanto sugerimos a criação de um fundo, principalmente pela participação dos próprios fabricantes, de forma a se efetivar este acompanhamento, inclusive para que seus próprios produtos fiquem oficialmente batizados frente a produtos similares e importados que deverão penetrar o mercado nacional (já encontramos lâmpadas argentinas em um supermercado desta capital). O governo poderia fornecer o laboratório, a equipe técnica e os relatórios oficiais periódicos.



5.5 PREÇO DA LÂMPADA

O custo da luz para o consumidor varia linearmente com o preço da lâmpada e é muito pouco afetado por este preço.

O governo deveria usar parte do imposto que incide sobre a lâmpada pouco eficiente como um incentivo ao produtor e instrumento gerador de recursos para promover controle e evitar potência. Na medida que este produto se tornar mais eficiente, ele liberaria fração deste incentivo, através de uma regra que premiasse a eficiência crescente, para o produtor. O recurso assim gerado seria utilizado pela sociedade para custear a verificação da qualidade do produto, as melhorias incorporadas e financiar programas de racionalização em iluminação. Um valor de 1 % sobre o preço da lâmpada ao consumidor pode gerar $1,5 \times 10^6$ US\$/ano, recurso que entendemos ser suficiente também para promover o desenvolvimento da luminotécnica no Brasil a nível compatível com a Argentina, por exemplo.

5.6 RECOMENDAÇÕES ESPECÍFICAS

Como a eficiência intrínseca das lâmpadas incandescentes (para uma dada potência e vida nominal) é inversamente proporcional à tensão de operação (até aproximadamente 14 volts, quando as perdas por condução passam a ser preponderantes), os projetos de iluminação que usem fonte incandescente, devem ser feitos para a menor tensão de linha disponível (evidentemente, que observado o limite, acima exposto). Em particular, na iluminação pública, a menor tensão disponível, em geral, é aquela entre fase e neutro.

Assim, a eficiência máxima de um sistema incandescente, em tensão usual de rede elétrica local, pode ser atingida pelo uso de lâmpadas projetadas para 14 V e uso de um transformador ou conversor eletrônico de tensão.

NOTA: O acréscimo nos custos dos condutores, com seção transversal maior, não é aqui considerado, ou seja a preocupação versa, sobretudo, na eficiência da conversão: energia elétrica-luz visível.

5.6.1 Normalização

De forma geral, o redimensionamento das características nominais das lâmpadas parece ser um bom instrumento para a redução do consumo de energia elétrica e gastos pelos cidadãos brasileiros, aplicando medidas de economia, conforme recomendação aprovada na Conferência de Toronto, em 1988.

a) A eficácia das lâmpadas incandescentes de uso doméstico para potência nominal de 60W e acima desta deve ser aumentada, via redução da sua vida nominal (atualmente 1000 horas) conforme resultados dos cálculos teóricos para a vida otimizada destas lâmpadas (vida que proporcionará o menor custo de luz ao usuário).

b) Se fixarmos o fluxo luminoso da nova lâmpada (mais eficiente) aos valores das atuais lâmpadas, teremos inerentemente a redução da sua potência inicial.

c) Cálculos preliminares mostram que valores de potência ligeiramente abaixo de uma redução de 10% da potência atual podem ser atingidos.

d) A tensão nominal usada pelas lâmpadas incandescentes não é adequada, pois está lastreada numa definição* e não na realidade, devendo ser reduzida. Hoje ela não considera a queda de tensão admissível nos terminais da lâmpada (detalhes são dados no ANEXO E), tão pouco que a freqüência maior da sua utilização ocorre justamente no horário mais débil (de pico) do sistema.

Como conseqüência deste passo teremos ganhos significativos à sociedade de modo a capacitá-la a expandir a carga instalada ao sistema elétrico, sem necessidade de investimentos adicionais em geração e transmissão.

A redução de consumo esperada para o Estado de São Paulo pela redução de 10 % na potência nominal das lâmpadas incandescentes é equivalente à taxa de crescimento do consumo residencial que a Eletropaulo apresentou no período 1978 - 1989⁹², cerca de 31 GWh/mês e para o Brasil o triplo deste valor é esperado**.

Este trabalho, finalmente, estabelece o início do acompanhamento pela sociedade brasileira do seu custo de luz.

* "A tensão nominal de um sistema é o valor eficaz da tensão pelo qual o sistema é designado", parágrafo 1º do Artigo 47 - Decreto nº 72080, Presidência da República; e

** As estimativas realizadas estão baseadas em dados de consumo setorial de 1989, desagregados segundo partição de 24,6 % para iluminação⁸⁵, ainda que valor da ordem da metade deste também é citado na literatura⁸⁹.

ANEXO A - CRONOLOGIA

SÉCULO	ANO	AUTOR	EVENTO
pré-história	-	-	a tocha e as velas
"antiguidade"	1600 A C	" na Palestina "	pedra entalhada de face concava onde o combustível ardia - cerâmica-alabastro
XVII	1650	Otto Van Guericke de Magdeburg Jean-Baptiste Van Helmont	produziu luz com eletricidade estática criou a palavra gás - CO ₂
	1675	John Clayton Olaf Roemer	captura o gás do carvão Luz - velocid. propag.finita: 2×10^5 km/s
XVIII	1678..1758	Pedro Bouguer	considerado criador da Fotometria
	1764	Watson	aquecim. condut. propor. quadr.corrente
	1784	Ami Argand	pavios circulares, dupla corrente de ar
	1785	Quinquest / Lange	contrafações da lâmpada de Argand
	1799	Philippe Lebon D'Humbersin	termolâmpada - comburir gás de madeira
	1800	Carcel	lâmpada de Carcel
	XIX	1801	Sir Humphry Davy
1802		Sir Humphry Davy	luz incandes. de fio aquecido por elet.
1807		Windsor	1ª I.P. Londres-gás acetileno: principal
1813		Sir Humphry Davy	invenção da lâmpada elétrica a arco
1816		Sir Humphry Davy	lâmp. de segurança - mineiros (tela)
1820		Sir Humphry Davy	início da I.P. à gás na França
1821		Sir Humphry Davy	a primeira vez que o nome arco é usado
1826		Tomás Drummond	seus trabalhos levaram à luz oxídrica
1833		Jobard	lâmp. hidrogê.líqu. terebentina, álcool
1836		Chaussebot	aumenta rend. lumin. recuperação calor
1837		Franchot	lâmpada de moderador (êmbolo manual)
1839		Cruikshank	rede platina recoberta óxido terroso
1841		Molevns	1ª patente lâmp. incand. - vida curta
1845		Wright	1ª patente da lâmpada à arco elétrico
1845		J. W. Starr	lâmp. incand. com haste carbono/vácuo
1847		Staitte e Patrie	lâmpada com filamento de irídio
1849		Frankenstein	preconizou uso de manga, análogo Auer
1849		Foucault e Serrin	aperfeiçoaram lâmp. a arco de Davy
1850		Heinrich Geissler	lâmpada/tubo: confirma da luminescência
1852		Roberts	lâmpada com haste de grafite no vácuo
1860			candeeiro de petróleo
1860		Sir Joseph Wilson Swan	lâmp. filamento papel carboniz./vácuo
1876		Reynier e Werdermann	lâmp. incand. ao ar livre
1876		Brush	lâmpada à arco aberto (carbono - EUA)
1877		Thomas Alva Edison	início dos estudos (1200 experimentos)
1878		Sir Joseph Wilson Swan	lâmp. filamento haste fina de carbono
1878			início comercial luz elétrica a arco
1879	Thomas Alva Edison	filamento de carvão, funcionou 2 dias	
1879	Brush	I.P. a arco em Cleveland - EUA	
XIX	1880	Clamond	bico de Auer
	1880	Auer Von Welsbach	lâmp. filamento com vácuo melhorado
	1880	Sir Joseph Wilson Swan	lâmpada à vácuo melhorado
	1880	Thomas Alva Edison	bico Siemens
	1880	Siemens	lâmpada à arco fechado (carbono - EUA)
	1893	Marks	lâmpada com filamento de celuloze
	1894	Thomas Alva Edison	
XX	1901	Arons	1ª lâmpada a vapor de mercúrio (LVM)
	1901	Cooper - Hewitt	utilização comercial da LVM
	1905		GEM
	1906	Auer Von Welsbach	1ª filamento metálico - ósmio
	1906		tântalo
	1907		surge o filamento de tungstênio
	1910	Claude	lâmpadas a gases nobres, vapor de sódio
	1910/11	Coolidge	refilação do tungstênio
	1911		início difusão ilum. elet. incandescen.
	1913	Lungmuir / Irvirng	surge o enchimento com gás inerte
	1934		lâmpada fluorescente
	1936	Benbow	surge filamento duplamente espiralado
	1959	Mosby	lâmpada a halogênio
1970		criptônio	
1977		IRF	

TABELA A - CRONOLOGIA. Fonte: Referências Bibliográficas: 18, 21, 25, 28, 34, 64, 70 e 96.

ANEXO B - PREÇO DE LÂMPADA

B.1 A variação no preço das lâmpadas foi obtida por pesquisa em alguns estabelecimentos comerciais. Os resultados são apresentados na tabela B.1.

POTÊNCIA NOMINAL (W)	PREÇO			US\$ (x 10 ⁻²)			NÚMERO DA AMOSTRA
	MÍNIMO	MÉDIO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÉDIO	MÁXIMO	
25	35,00	(48±3)	57,00	64	(87±5)	104	6
36	32,50	(42±8)	57,00	59	(76±15)	104	3
40	35,00	(50±4)	57,00	64	(91±7)	104	8
60	35,00	(44±3)	55,00	64	(80±5)	100	6
100	40,00	(67±7)	110,00	73	(122±13)	200	8
150	70,00	(111±22)	145,00	127	(202±40)	264	3
200	111,00	(127±7)	141,00	202	(237±13)	256	4

TABELA B.1 - VARIACÃO NO PREÇO DAS LÂMPADAS DO MERCADO LOCAL EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA NOMINAL

- NOTAS:**
- 1 - Foram consultados sete estabelecimentos comerciais na cidade de SP;
 - 2 - Existem variações, em alguns estabelecimentos, no preço em função da marca da lâmpada e sua tensão nominal; e
 - 3 - A pesquisa foi realizada no início do mês de junho/90, sendo usado para a conversão o valor de 1 US\$ = Cr\$ 55,00 (cotação oficial do dia 05.06.90).

B.2 O preço das lâmpadas, em função do tempo, foi coletado junto ao estabelecimento comercial que apresentou a menor diferença entre os preços praticados e os valores médios dados pela tabela B.1, em especial para 60 W. Isto foi feito em função da importância desta potência com relação ao volume da produção nacional (50 %). O resultado para as lâmpadas de potência nominal ≤ 60 W é apresentado na figura B.1.

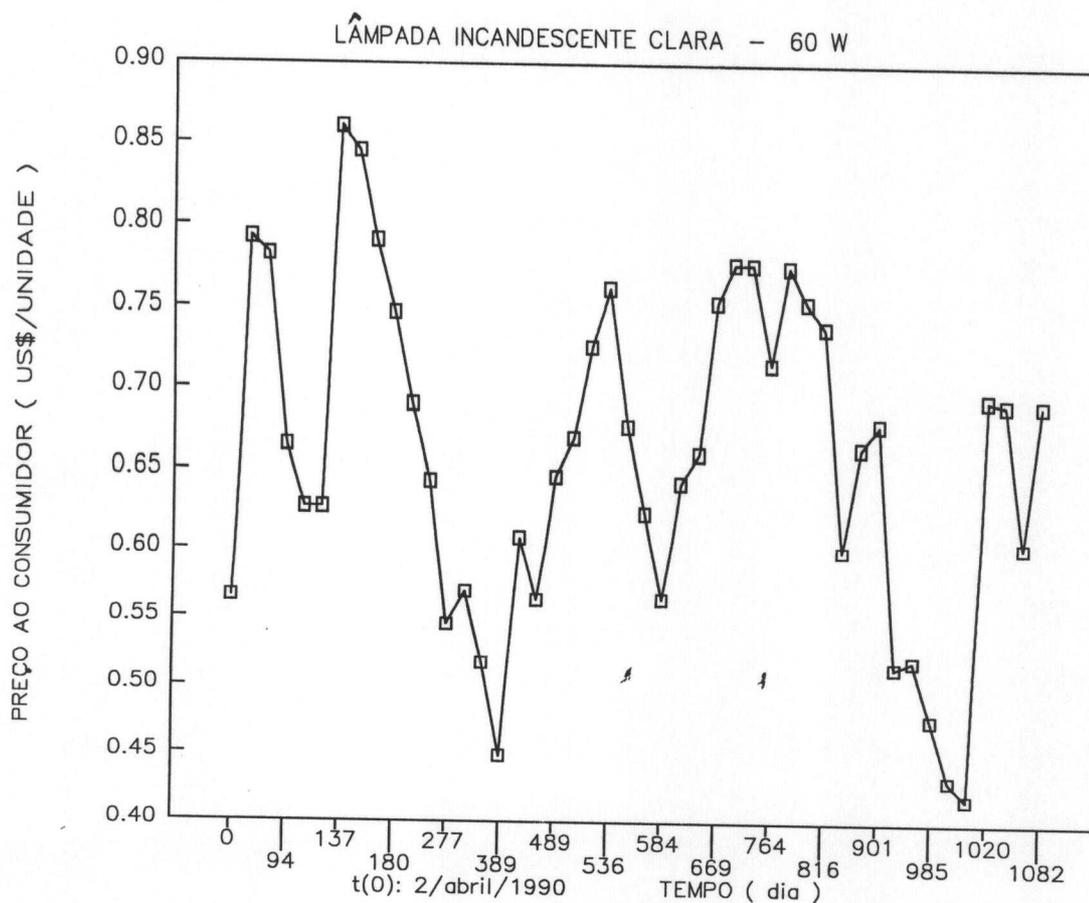


FIGURA B.1 - PREÇO DAS LÂMPADAS (≤ 60 W) AO LONGO DO TEMPO

B.3 Os valores médios dos preços das lâmpadas e seus respectivos desvios da média, em função da potência nominal e período considerado de 36 meses:

- a) 200 W: $(1,71 \pm 0,06)$ US\$;
- b) 150 W: $(1,43 \pm 0,05)$ US\$;
- c) 100 W: $(0,87 \pm 0,02)$ US\$; e
- d) ≤ 60 W: $(0,66 \pm 0,02)$ US\$.

ANEXO C - PREÇO DA ENERGIA ELÉTRICA

C.1 O preço da energia elétrica foi calculado com base na estratificação fornecida pela concessionária, ICMS de 25 % e convertido ao US\$ comercial da data de vencimento da conta. O resultado obtido é apresentado na figura C.1.

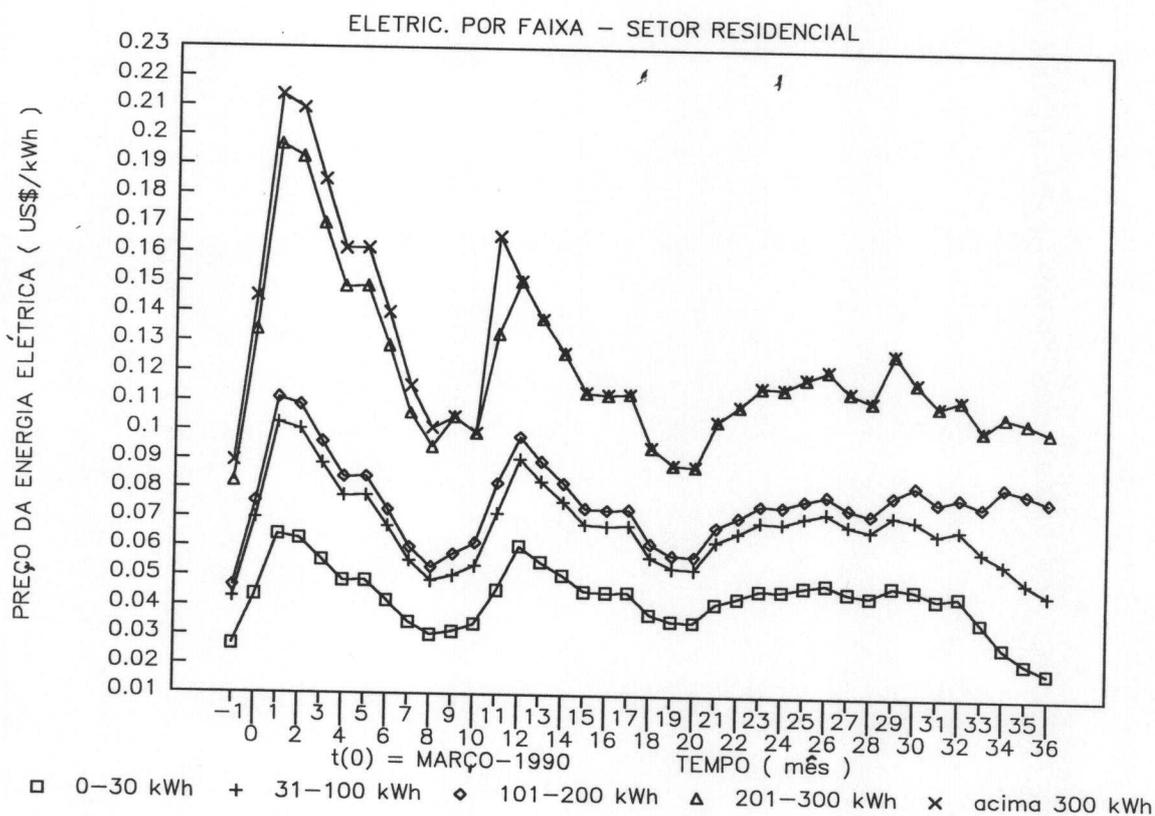


FIGURA C.1 - PREÇO DA ENERGIA ELÉTRICA PARA O SETOR RESIDENCIAL, ESTRATIFICADO POR FAIXA DE CONSUMO, EM FUNÇÃO DO TEMPO

C.2 O valor médio do preço da energia elétrica e seu respectivo desvio da média (um sigma é da ordem de 20 %), em função da faixa de consumo, foram calculados para um período de 38 meses. Os resultados, por faixa de consumo estão a seguir:

- a) 0 - 30 kWh: $(4,4 \pm 0,2) \times 10^{-2}$ US\$/kWh;
- b) 31 - 100 kWh: $(6,8 \pm 0,2) \times 10^{-2}$ US\$/kWh;
- c) 101 - 200 kWh: $(7,6 \pm 0,2) \times 10^{-2}$ US\$/kWh;
- d) 201 - 300 kWh: $(12,1 \pm 0,4) \times 10^{-2}$ US\$/kWh; e
- e) acima de 300 kWh: $(12,6 \pm 0,5) \times 10^{-2}$ US\$/kWh.

ANEXO D

CONSUMIDOR MÉDIO DE ENERGIA ELÉTRICA

D.1 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DA CLASSE RESIDENCIAL.

O objetivo deste anexo é apresentar levantamentos e cálculos para determinação da faixa de consumo onde localiza-se um consumidor médio de energia elétrica da classe residencial.

D.1.1 Informações de consumo da classe residencial, fornecidas pela Agência para Aplicação de Energia, com base no boletim Síntese 1989 - Eletrobrás - SIESE

ITEM	SÃO PAULO (ESTADO)	BRASIL
unidades	6.920.559 (27%)	25.362.306
consumo por unidade.ano (kWh/unid.ano)	2220	1724
consumo por unidade.mes (kWh/unid.mes)	185 (129%)	144
consumo total residencial (GWh/ano)	15.361 (35%)	43.626 (22%)

Tabela D.1.1 - CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA - CLASSE RESIDENCIAL - 1989

NOTA: Os valores, em porcentagem e entre perênteses são os valores percentuais do Estado de São Paulo em relação ao Brasil.

D.1.2 Informações de consumo da classe residencial para o ano base 1988, fornecidas pela CESP (para o Estado de SP):

- unidades: 6.640.112 ligações;
- consumo médio anual por unidade: 2182 kWh/unidade.ano (88); e
- consumo médio mensal por unidade: 182,3 kWh/unidade.mês.

NOTA: Este valor de consumo médio mensal difere um pouco, em relação a 161 kWh/mês (140 kWh/mês, corrigido segundo taxa anual de crescimento de 3,5 %) de outra referência⁹³.

D.1.3 Dados e extrapolação a partir do Balanço Energético Nacional (BEN) de 1990 e 1992¹⁰⁶

ANO	POR HABITANTE (kWh/hab.ano)		POR CONSUMIDOR (kWh/ligação/mês)	
	DADOS	EXTRAPOLAÇÃO	BRÁSIL	SÃO PAULO
COLUNA	(1)	(2)	(3)	(4)
1974	114	-		
1975	122			
1976	135	-		
1977	151			
1978	163	-		
1979	177			
1980	192	-		
1981	202			
1982	213	-		
1983	229			
1984	233	-	116	
1985	241		119	
1986	259	-	128	
1987	271		134	
1988	281	-	139	
1989	296		146	
1990	-	308 ± 24	152 ± 12	197 ± 16
1991	-	320 ± 35	158 ± 17	204 ± 22
1992	-	332 ± 44	164 ± 22	212 ± 28
1993	-	344 ± 53	170 ± 26	220 ± 34
1994	-	356 ± 61	176 ± 30	228 ± 39
1995	-	368 ± 69	182 ± 34	235 ± 44
1996	-	380 ± 77	188 ± 38	243 ± 49

TABELA D.1.2 - CONSUMO MÉDIO DE ENERGIA ELÉTRICA

NOTAS: 1 - A coluna (2) foi obtida, por extrapolação dos dados da coluna (1), a partir da sua taxa anual média de crescimento [(13,8 ± 1,3) kWh/hab. ano], entre 1974 e 1991; e

2 - A coluna (3) foi obtida multiplicando-se a coluna (1) ou (2) por 0,4948, que é uma constante de ajuste do consumo anual por habitante, para consumo por residência (mensal), considerada a média brasileira de 5,9376 habitantes por ligação. De forma análoga a coluna (4) foi obtida pela constante (185/144) fornecida pela tabela D.1.1.

D.2 ESCOLHA DA FAIXA QUE CONTÉM O CONSUMIDOR MÉDIO.

Optamos por um valor de consumo médio referente ao Estado de São Paulo, em vez do brasileiro, pois segundo o BEN¹⁰⁶, no ano de 1987, 77 % do consumo de energia elétrica brasileira, pela classe residencial, é devido às regiões sul (14,7 %) e sudeste (62,7 %), e 57 % do montante referente à região sudeste cabe à São Paulo. Ainda que valores mais recentes demonstrem uma queda deste patamar, (vide tabela D.1.3), tal patamar justifica o uso da média deste Estado no lugar da média nacional.

Os valores de consumo médio para o Estado de São Paulo foram obtidos a partir das informações brasileiras extrapoladas, visto haver consistência entre o valor obtido por extrapolação e o dado apresentado pelo SIESE para o país, em 1989. Assim, temos os valores de consumo de (220 ± 34) kWh/ligação e (228 ± 34) kWh/ligação, como valores médios estimados para o Estado de São Paulo nos anos de 1993 e 1994, respectivamente.

Para efeito deste estudo adotamos como consumidor médio aquele que está inserido na faixa de consumo de 200 kWh/mês, ou seja: >201 kWh/mês até 300 kWh, contra o valor de 170 kWh/ligação.mês, que representa o consumo desta mesma classe residencial, a nível de Brasil.

A tabelá D.1.3 forne uma visão atual e comparativa entre os valores mais recentes do consumo de energia elétrica e algumas de suas relações com objetivo de visualizar a fração que cabe ao setor residencial.



ÁREA	S. P. - ELETROPAULO		BRASIL		RELAÇÕES (%)				
	(1)	(2)	(3)	(4)	(3)/(4)	(2)/(4)	(1)/(2)	(1)/(3)	(1)/(4)
SETOR	RESIDENCIAL	TOTAL	RESIDENCIAL	TOTAL					
Fev/91	-	-	4,24	16,900	25,1	-	-	-	-
Mar/91	0,852	3,123	-	-	-	-	27,3	-	-
Fev/92	0,972	4,3	4,447	18,037	24,7	23,8	22,6	21,9	5,39
Mar/92	0,981	4,0	-	-	-	-	24,5	-	-

TABELA D.1.3 - PANORAMA ATUAL DO CONSUMO EM ENERGIA ELÉTRICA - VALORES EM TWh. Fonte: Jornal Folha de São Paulo: Eletropaulo e Eletrobrás.

ANEXO E

TENSÃO ELÉTRICA DE TRABALHO E QUEDA ADMISSÍVEL

E.1 TENSÕES ELÉTRICAS OFICIAIS NO BRASIL

A portaria de 4 de janeiro de 1989, do Ministério das Minas e Energia, do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) estabeleceu os valores nominais das tensões secundárias monofásicas padronizadas (127 V e 220 V), os valores nominais não padronizados (115 V e 120 V), seus respectivos limites precários e adequados, os quais estão indicados na Tabela E.1.

TENSÃO NOMINAL (V)	LIMITE DE VARIAÇÃO (V)			
	PRECÁRIO		ADEQUADO	
	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO
115	103	127	106	121
120			108	125
(*) 127	109	135	116	132
(*) 220	189	233	201	229

Tabela E.1 - TENSÕES NOMINAIS E LIMITES, OFICIALMENTE ESTABELECIDOS NO BRASIL

NOTA: (*) Valores padronizados

E.2 QUEDA ADMISSÍVEL DE TENSÃO

E.2.1 Normalização brasileira

Conforme o item 525 do projeto de norma nº 3.064.01-001-Dez/1987 - Instalações elétricas de baixa tensão - Procedimentos, primeira revisão da NBR 5410/1980, que estabelece para instalações alimentadas diretamente por um ramal de baixa tensão, entre a origem e qualquer ponto de utilização, as seguintes quedas de tensão (em relação à tensão nominal da instalação):

- a) iluminação: 3 %;
- b) outros usos: 5 %; e
- c) para locais de habitação, alimentados por circuitos de distribuição únicos para iluminação e outros usos, admite-se utilizar o limite de 5 %.

E.2.2 Regulamentações na Inglaterra

Em complementação, buscamos um exemplo de outro país, no caso a Inglaterra e apresentamos estas informações adicionais.

E.2.2.1 **Queda de tensão no ponto de entrada**

Para o "Electricity Supply Authorities" é permitida, no ponto de entrada ou entrega da energia, uma variação de ± 6 %.

E.2.2.2 **Queda adicional de tensão**

A "IEE Regulations" permite uma queda adicional de 2,5 %, do ponto de entrada até uma tomada particular.

Na prática, a variação de tensão é de +6 % a -8 %.

E.3 TENSÃO DE TRABALHO

Considerando as informações apresentadas na tabela E.1, em conjunto com os dois níveis de queda de tensão do item E.2.1, fica claro que na média, a tensão de trabalho, a qual o equipamento fica submetido não é aquela dada pelo valor nominal da tabela E.1. Assim, fica explícita a necessidade de revisão nos valores nominais dos equipamentos para uso domésticos, visando a otimização do ponto de trabalho, inclusive das lâmpadas incandescentes, que em geral estão ligadas à circuitos únicos para iluminação e outros usos. A tabela E.3 traz esta indicação.

TENSÃO NOMINAL DA INSTALAÇÃO (V)	TENSÃO (NOMINAL) DE TRABALHO INDICADA PARA OS EQUIPAMENTOS (V)		
	3 %	QUEDA	5 %
220	213		209
127	123		121
120	116		114
115	112		109

Tabela E.3 - TENSÕES DE TRABALHO PARA USO NO SETOR RESIDENCIAL SEGUNDO AS QUEDAS DE TENSÕES

Para que não sejam criadas maiores confusões por parte do consumidor, sugerimos que seja mantido no equipamento (no caso, lâmpadas incandescentes ou qualquer outro equipamento usado no setor residencial), como tensão nominal do mesmo, o valor da tensão nominal da instalação, e que tanto para o projeto do equipamento, quanto para os ensaios a que estes equipamentos devem ser submetidos o uso da tensão (nominal) de trabalho acima indicada (levando-se em consideração as quedas de tensão admissíveis de 3 % ou 5 %).

Se levarmos em consideração a ocorrência atual devemos defender os valores dados pela faixa com queda de tensão de 5%. Porém, visando otimizar o sistema em termos de eficiência energética, sugerimos que um compromisso deve ser assumido, com horizonte de 5 anos, para a eliminação da faixa de 5 %, estabelecendo uma tolerância menor (4 %), até atingirmos os 3 %. Estes limites devem ser melhor avaliados, pois são função de variáveis de mercado.

ANEXO F - DADOS DE LÂMPADAS AO LONGO DE 16 ANOS

POTÊNCIA NOMINAL (W)	TENSÃO NOMINAL (V)	FLUXO LUMINOSO (ℓ_m)	POTÊNCIA (W)	EFICIÊNCIA (ℓ_m/W)	VIDA (h)	CONDIÇÃO DA MEDIÇÃO (h)	DATA DA REALIZAÇÃO	QUANTIDADE (N°)
15	115	119 ± 3	14,51±0,05	8,2±0,2	-	-	-	-
15	220	113 ± 5	15,5±0,3	7,3±0,1	-	100	23.3.76	2
25	115	201,5±0,5	24,2±0,1	8,35	-	100	23.3.76	2
25	220	206 ± 8	25,3	8,1	-	100	23.3.76	2
36	127	428 ± 3	36,5±0,1	11,73±0,08	mediana:1240	1	30.7.87	9
36	127	405 ± 9	34,7±0,1	11,7±0,3	1219±167	750	30.7.87	9
40	115	504 ± 13	39,7±0,3	12,7±0,2	-	100	23.3.76	2
40	220	403 ± 11	39,9±0,3	10,1±0,2	-	100	23.3.76	2
40	115	508 ± 2	41,31±0,08	12,29±0,04	-	1	13.8.85	25
40	115	486 ± 1	40,62±0,06	11,96±0,02	1055±28	750	13.8.85	20
54	127	754 ± 4	56,0±0,1	13,45±0,05	mediana:1043	1	30.7.87	10
54	127	735 ± 3	54,38±0,07	13,5	1089±52	750	30.7.87	10
60	115	854 ± 8	60,2±0,3	14,2±0,1	-	100	23.3.76	2
60	220	721 ± 3	59,6±0,1	12,1±0,1	-	100	23.3.76	2
60	115	748 ± 10	60,6±0,3	12,3±0,1	-	1	19.12.84	15
60	115	703 ± 6	59,8±0,2	11,75±0,07	1415±64	750	19.12.84	15
60	115	826 ± 9	60,8±0,2	13,6±0,1	-	1	19.12.84	15
60	115	781 ± 6	59,9±0,2	13,04±0,07	1172±44	750	19.12.84	15
60	115	831 ± 6	59,8±0,1	13,83±0,05	-	1	19.12.84	15
60	115	788 ± 5	59,1±0,2	13,33±0,05	1339±57	750	19.12.84	15
60	115	861 ± 7	61,4±0,1	14,0±0,1	-	1	19.12.84	15
60	115	811 ± 4	60,38±0,06	13,43±0,07	1146±82	750	19.12.84	15
60	115	842 ± 2	58,9±0,1	14,29±0,03	-	1	19.12.84	15
60	115	794 ± 2	58,16±0,06	13,66±0,04	1043±47	750	13.8.85	25
60	125	715 ± 4	61,0±0,2	11,72±0,04	-	1	13.8.85	20
60	125	685 ± 3	60,0±0,1	11,42±0,07	3471±70	1500	27.12.85	25
60	127	818 ± 3	58,89±0,07	13,90±0,04	-	1	27.12.85	20
60	127	775 ± 2	58,18±0,08	13,31±0,03	925±9	750	24.11.92	10
60	127	821 ± 4	60,6±0,1	13,54±0,05	-	1	24.11.92	10
60	127	759 ± 2	59,28±0,08	12,81±0,04	813±20	750	24.11.92	10
60	127	765 ± 5	59,4±0,2	12,87±0,06	-	1	24.11.92	10
60	127	724 ± 6	58,3±0,2	12,42±0,07	939±13	750	24.11.92	10
60	127	738 ± 8	59,3±0,3	12,43±0,08	-	1	24.11.92	10
60	127	638 ± 15	56,6±0,8	11,3±0,1	759±26	750	24.11.92	10
60	127	829 ± 3	60,61±0,05	13,67±0,04	-	1	24.11.92	10
60	127	818 ± 3	58,89±0,07	13,90±0,04	-	1	12.12.92	40
60	127	775 ± 2	58,18±0,08	13,31±0,03	900±25	750	12.12.92	10
60	127	738 ± 8	59,3 ± 0,3	12,43±0,08	-	1	12.12.92	10
60	127	638 ± 15	56,6 ± 0,8	11,27±0,11	759±26	750	12.12.92	10
90	127	1387 ± 4	91,3±0,1	15,19±0,03	med.:940±30	1	30.7.87	10
90	127	1387 ± 3	88,5±0,1	14,5	950±52	750	30.7.87	10
90	127	1306 ± 3	91,0±0,1	15,24±0,03	med.:1123±30	1	11.9.87	10
90	127	1306 ± 3	89,5±0,1	14,59±0,06	1074±39	750	11.9.87	10
100	115	1537	99,8	15,4	-	100	23.3.76	1
100	220	1372 ± 23	100,1±0,9	13,7±0,1	-	100	23.3.76	2
100	127,5	1340 ± 6	102,6±0,1	13,1±0,04	-	1	4.4.86	25
100	127,5	1273 ± 7	101,5±0,2	-	3737±172	1500	4.4.86	20
100	130	1398 ± 6	99,0±0,1	14,1±0,06	med.:1082±63	1	20.4.90	50
100	130	1300 ± 27	96,8±0,6	-	1064	1100	20.4.90	9
100	127	1598 ± 42	100,4±0,1	15,90±0,03	-	1	12.12.92	30
150	115	2203	146,4±0,5	11,96±0,02	-	100	23.3.76	2
150	220	2100 ± 18	155,7±0,1	13,45±0,05	-	100	23.3.76	2
150	127	2597 ± 18	151,8±0,07	13,5	-	1	6.11.86	25
150	225	2409 ± 8	156,1±0,3	14,2±0,1	-	1	6.11.86	50
150	225	2506 ± 21	153,6±0,1	12,1±0,1	-	1	10.4.87	5
150	130	2000 ± 13	146,2±0,3	12,3±0,1	-	1	23.04.90	50
150	130	2078 ± 7	151,5±0,2	11,75±0,07	-	1	3.06.90	50
150	130	1910 ± 9	149,5±0,2	13,6±0,1	-	1128	3.06.90	30
200	115	3171 ± 13	193,5±0,3	16,35±0,05	-	100	23.03.76	2
200	220	2919 ± 10	206,4±0,3	14,15±0,05	-	100	23.03.76	2
200	225	3437 ± 5	202,2±0,2	17,17±0,05	-	1	27.06.86	50
200	127	3193 ± 15	198,2±0,4	16,12±0,06	-	1	10.04.87	5
200	225	2975 ± 24	202 ± 1	14,72±0,04	-	1	10.04.87	5
200	130	2921 ± 22	198,8±0,5	14,7	med.:1711±30	1	10.04.87	5
200	130	2652 ± 20	194,9±0,5	13,6	1661±74	1125	13.8.85	20
200	220	2765 ± 5	192,5±0,3	14,64±0,06	-	1	13.8.85	20
300	115	4926 ± 47	285,4±0,4	17,3±0,2	-	100	23.03.76	2
300	220	4747 ± 23	295,9	16,05±0,05	-	100	23.03.76	2
300	220	4872 ± 116	296 ± 1	16,5 ± 0,4	-	1	31.07.79	3
300	220	4126	-	-	-	1	31.07.79	1
300	225	4875 ± 27	310,0±0,6	15,72±0,06	644±181	750	31.07.79	1
					-	1	10.04.87	5

Tabela F - Resultados de medições e determinações de características de lâmpadas. **NOTA:** Esta tabela foi elaborada pelo autor com base em relatórios de ensaios realizados pela Seção Técnica de Fotometria do IEE/USP. Por razões éticas o nome dos solicitantes dos ensaios não foram citados, mas as colunas da data de realização, potência e tensão nominal permitem referenciar os resultados aos seus respectivos relatório de forma unívoca. Os desvios declarados, um sigma, foram obtidos de tratamento estatístico dos dados, assumindo distribuição normal.

ANEXO G

DADOS DE LÂMPADAS AMERICANAS

POTÊNCIA NOMINAL (W)	FLUXO LUMINOSO INICIAL (lm)	EFICIÊNCIA INICIAL (lm/W)	DEPRECIÇÃO DO FLUXO, A 70% DA VIDA (%)	VIDA NOMINAL MÉDIA (h)	TEMPER. DE COR APROX. T _{CP} (K)	OBSERVAÇÕES QUANTO AO ACABAMENTO DO BULBO E TIPO DE FILAMENTO
25	230	9,2	79	2500	2550	fosco internamente
34	410	12,1		1500		// //
40	455	11,4	87,5	1500	2650	// // (e branco)
50	680	13,6		1000		fosco internamente
52	800	15,4		1000		claro e fosco int.
55	870	15,8		1000		// //
60	860	14,3	93	1000	2790	fosco int./branco
67	1130	16,9		750		claro e fosco int.
70	1190	17,0		750		claro e branco
75	1180	15,7	92	750	2840	fosco int./branco
90	1620	18,0		750		claro e fosco int.
95	1710	18,0		750		// //
100	1740	17,4	90,5	750	2905	fos.int/bco. (A-19)
100	1680	16,8		1000		// //
100	1690	16,9	90	750	2880	fosco int. (A-21)
135	2580	19,1		750		claro e fosco int.
150	2880	19,2	89	750	2960	fosco (CC-8)
150	2790	18,6	89		2930	branco (CC-8)
150	2780	18,5	89		2925	claro-fosco/branco
150	2660	17,7	87,5		2910	claro e fosco
200	4000	20,0	89,5		2980	claro-fosco/branco
200	3800	19,0				claro e fosco
200	3700	18,5	85		2925	// //
300	6360	21,2	87,5		3015	// //
300	5960	19,8				
500	10600	21,2	89		3050	// //
500	10140	20,3			2945	// //
750	15660	20,9			2990	// //
750	17000	22,6	89		3090	// //
1000	21800	21,8			2995	// // (C-7A)
1000	23600	23,6	89		3110	// // (CC-8, 2CC-8)
1500	34000	22,6	78	1000	3095	// //

TABELA G - COMPÊNDIO DE LÂMPADAS AMERICANAS

(CARACTERÍSTICAS). Fontes: IES^{72, 83}

NOTA: Estas características de lâmpadas foram extraídas do IES para facilitar a comparação com os dados de lâmpadas brasileiras do ANEXO F.



ANEXO H - DEMONSTRAÇÃO DO PROCEDIMENTO ELABORADO

Sejam as variáveis abaixo definidas e admitamos serem o fluxo luminoso (\emptyset_L) e a potência (P_L) da lâmpada, ao longo de sua vida útil, funções lineares do tempo (t), conforme segue:

$$\emptyset_L(t) = \emptyset_0 - K.t \quad (\text{H.1}); \text{ e}$$

$$P_L(t) = P_0 - M.t \quad (\text{H.2}).$$

Onde: P_0 : potência inicial;

\emptyset_0 : fluxo luminoso inicial; e

K: taxa de depreciação do fluxo luminoso em função do tempo [lm/h];

M: taxa de depreciação da potência em função do tempo [W/h], que devem ser constantes, para um dado tipo de lâmpada, como foi admitido.

O custo total da luz (U) produzida (em unidade financeira por unidade de luz ou fluxo luminoso) por uma lâmpada com potência inicial - P_0 , preço de mercado - b, operada sob uma tarifa de energia elétrica - c, durante um período genérico de funcionamento - t, pode ser escrita como:

$$U(t) = (b/t) \cdot [\emptyset_L(t)]^{-1} + [P_L(t) \cdot c/\emptyset_L(t)] \quad (\text{H.3})$$

que pode ser escrita novamente, colocando-se $\emptyset_L(t)$ em evidência, assim:

$$U(t) = [\emptyset_L(t)]^{-1} \cdot [(b/t) + c \cdot P_L(t)] \quad (\text{H.3.1})$$

Esta função é mínima quando sua derivada, em relação ao tempo, for nula, ou seja, $U' = [d U(t)/dt] = 0$. Desta forma é feito o cálculo desta derivada, a partir de (H.3.1), os valores da potência $P_L(t)$ e do fluxo luminoso $\emptyset_L(t)$ são substituídos pelas expressões (H.2) e (H.1),

respectivamente, e a mesma é igualada a zero:

$$U' = \{-\emptyset_L \cdot [(b/t) + c \cdot P_L] + [(-b/t^2) + c \cdot P_L'] \cdot \emptyset_L\} / \emptyset_L^2 = 0$$

$$U' = \{K \cdot [(b/t) + c \cdot (P_0 - M \cdot t)] - (\emptyset_0 - K \cdot t) [c \cdot M + (b/t^2)]\} / (\emptyset_0 - K \cdot t)^2 = 0$$

A expressão acima será nula quando os termos do numerador forem iguais, assim teremos:

$$K \cdot [(b/t) + c \cdot (P_0 - M \cdot t)] = (\emptyset_0 - K \cdot t) \cdot [c \cdot M + (b/t^2)] / (\emptyset_0 - K \cdot t)^2, \text{ ou}$$

$$K \cdot c \cdot P_0 - K \cdot t \cdot M \cdot c + (K \cdot b/t) - \emptyset_0 \cdot M \cdot c - (\emptyset_0 \cdot b/t^2) + K \cdot t \cdot M \cdot c + (K \cdot t \cdot b/t^2) = 0$$

Agora multiplicando ambos os lados por t^2 a equação torna-se:

$$t^2 \cdot K \cdot c \cdot P_0 + K \cdot b \cdot t - t^2 \cdot \emptyset_0 \cdot M \cdot c - \emptyset_0 \cdot b + K \cdot t \cdot b = 0$$

ou com o agrupamento de termos comuns:

$$t^2 \cdot [c \cdot (K \cdot P_0 - \emptyset_0 \cdot M)] + t \cdot (2 \cdot K \cdot b) - \emptyset_0 \cdot b = 0 \quad (\text{H.4})$$

Esta é uma simples equação do segundo grau, cujas raízes são dadas por:

$$t_{1,2} = \{-bK \pm [b^2 \cdot K^2 + (K \cdot P_0 - \emptyset_0 \cdot M) \cdot (b \cdot \emptyset_0) \cdot c]^{1/2}\} / c \cdot (K \cdot P_0 - \emptyset_0 \cdot M) \quad (\text{H.5})$$

NOTA: Por motivo de simplificação da notação, as funções do tempo, $P_L(t)$ e $\emptyset_L(t)$, são simplesmente expressas por P_L e \emptyset_L , respectivamente.

A equação obtida considera apenas grandezas externas à lâmpada e que são facilmente mensuráveis. A análise dimensional da equação (H.5) confirma a dimensão de $t_{1,2}$, em horas.

A esta altura poderíamos dar-nos por satisfeitos, já que chegamos a uma expressão para a vida econômica, porém é interessante (e é aqui que está nossa contribuição original) que esta vida econômica seja igual a vida nominal da lâmpada, digamos, no mínimo para simplificar a vida do usuário. Assim, usando valores típicos de operação de lâmpadas incandescentes de uso geral, dado pela figura 8-13 (a), da publicação IES-1984⁷² (e no final também apresentamos resultados experimentais de depreciações que obtivemos), iremos encontrar uma expressão geral para o tempo de vida otimizada destas lâmpadas, apenas como função do custo da lâmpada, da energia elétrica suprida (segundo a faixa de consumo) e sua potência nominal. Assim, segundo a figura supra citada, temos as seguintes depreciações:

a) para a potência, quando a lâmpada encontra-se com tempo de utilização igual à sua vida nominal, a figura citada fornece uma potência de 95% da potência nominal ou inicial, assim teremos:

$$M = 0,05.P_0/m, \quad (H.6)$$

onde m é a vida nominal;

b) analogamente, temos para o fluxo luminoso 82 %, assim:

$$K = 0,18.\Phi_0/m \quad (H.7)$$

Agora, podemos utilizar (H.6) e (H.7) na equação (H.5) para chegarmos a:

$$t_{1,2} = \{-0,18 \pm [(0,18.b)^2 + (0,13.P_0.m.b.c)]^{1/2}\} / 0,13.c.P_0 \quad (\text{H.8})$$

Para simplificar a notação iremos adotar:

$$D = 0,13.c.P_0; \text{ e}$$

$$L = 0,18.b, \text{ assim teremos:}$$

$$t_{1,2} = \{-L \pm [L^2 + m.b.D]^{1/2}\}.D^{-1} \quad (\text{H.8.1})$$

Agora, impondo a condição desejável que é a nossa contribuição original ou seja que a vida da lâmpada seja interrompida no instante em que o consumidor passaria a ter crescente o custo da luz produzida, esta condição é satisfeita para:

$$t_{1,2} = m \quad (\text{H.9})$$

Substituindo (H.9) na equação (H.8.1), temos:

$$m = = \{-L \pm [L^2 + m.b.D]^{1/2}\}.D^{-1}$$

$$(m.D + L)^2 = L^2 + m.b.D$$

$$m^2.D^2 + m.D.(2L - b) = 0 \quad (\text{H.10})$$

Esta equação possui uma raiz nula que aqui não tem interesse e a solução:

$$m = -(2L - b)/D \quad (\text{H.11})$$

Restaurando os valores de L e D, temos:

$$m = - (0,36.b - b)/0,13.c.P_0 = 0,64.b/0,13.c.P_0$$

$$m = R.b/c.P_0 \quad (H.12)$$

R = 4,92 para os valores típicos do IES ou (2,7 a 5,1 para lâmpadas típicas de 60 W), e

- onde:
- b: preço da lâmpada [US\$];
 - c: preço da energia elétrica [US\$/kWh]; e
 - P₀: potência inicial [W].

ANEXO I - A DIMENSÃO DO MERCADO

ANO	TOTAL	COM POTÊNCIA REDUZIDA EM 10 % (A)	
	(x10 ⁶ unidades/ano)		(%)
1981	268	-	-
1982	245	-	-
1983	253	-	-
1984	274	-	-
1985	290	-	-
1986	295	80	27,12
1987	250	76	30,40
1988	238	56	23,53
1989	245	40	16,33
1990	265±5	6	2,26
1991	300	-	-

TABELA I.1 - QUANTIDADE DE LÂMPADAS INCANDESCENTES VENDIDAS NO MERCADO BRASILEIRO NOS ÚLTIMOS ONZE ANOS

NOTAS: - A) Valores estimados, visto haver sido considerada a parcela comercializada pela GE. Os valores, em porcentagem, foram calculados em relação ao total de unidades vendidas; e
- Fonte: informações verbais fornecidas pela gerência da divisão iluminação consumo da Philips do Brasil Ltda, São Paulo, dezembro de 1990.

TIPO DE LÂMPADA	POTÊNCIA MÉDIA (3) (W)	QUANTIDADE	
		(x10 ⁶ unidades/ano)	(%)
uso geral	63	295,6	98,5
refletoras	70	2,5	0,83
I. P.	175	1,0	0,33
a halogênio (5)	50	0,9 (2)	0,30
TOTAL	64,3 (4)	300	100

TABELA I.2 - PRODUÇÃO DE LÂMPADAS INCANDESCENTES POR TIPO (1) - BRASIL - 1991

- NOTAS:** 1) Comunicação verbal, Philips, período base 1989/1990;
2) O valor total estimado para o mercado é de 1,2x10⁶ unidades, das quais estima-se que 30% são lâmpadas importadas. Não estão inclusas as lâmpadas automotivas tipo H4;
3) Alguns destes valores foram estimados;
4) Média ponderada pela quantidade; e

POTÊNCIA NOMINAL DA LÂMPADA (W)	UNIDADES CONSUMIDAS (%)	POTÊNCIA INSTALADA NECESSÁRIA	
		(GW)	(%)
25	4,6	0,28	1,7
40	18,4	1,80	11,1
60	45,2	6,64	40,9
75	4,3	0,79	4,9
100	27,5	6,74	41,4
T O T A L		16,3 GW	

TABELA I.3 - PRODUÇÃO DE LÂMPADAS POR POTÊNCIA E NECESSIDADE DE SUPRIMENTO DEMANDADO (REF.: ANO DE 1989)

NOTA: As perdas do sistema, em GTD, não estão consideradas, nem o fator 2,1, que é de uso comum na determinação da potência instalada.

MARCA DA LÂMPADA	ANO			
	1988	1989	1990	1991
PHILIPS	42,3	51,5	34,2	30,7
OSRAM	24,0	18,2	36,6	28,1
GE	17,3	17,2	12,4	26,1
SYLVANIA	16,3	13,1	16,8	15,0

TABELA I.4 - MERCADO BRASILEIRO DE LÂMPADAS INCANDESCENTES DIVIDIDO ENTRE AS MARCA MAIS VENDIDAS - VALORES EM %.
Fonte: Pesquisas publicadas pela Revista Eletricidade Moderna, São Paulo, dezembro de 1989 e 1991.

ANEXO J - EXPOENTES E IDENTIFICAÇÃO DE LÂMPADAS

J.1 EXPOENTES TÍPICOS

Quando a tensão elétrica de trabalho (v) de uma lâmpada incandescente difere do seu valor nominal (v_0), temos como resultado alterações nas suas características. Estas características possuem uma interligação, sendo que a mudança de uma delas afeta as demais. A figura J.1 foi construída segundo levantamento experimental que realizamos em uma lâmpada típica para ilustrar este comportamento.

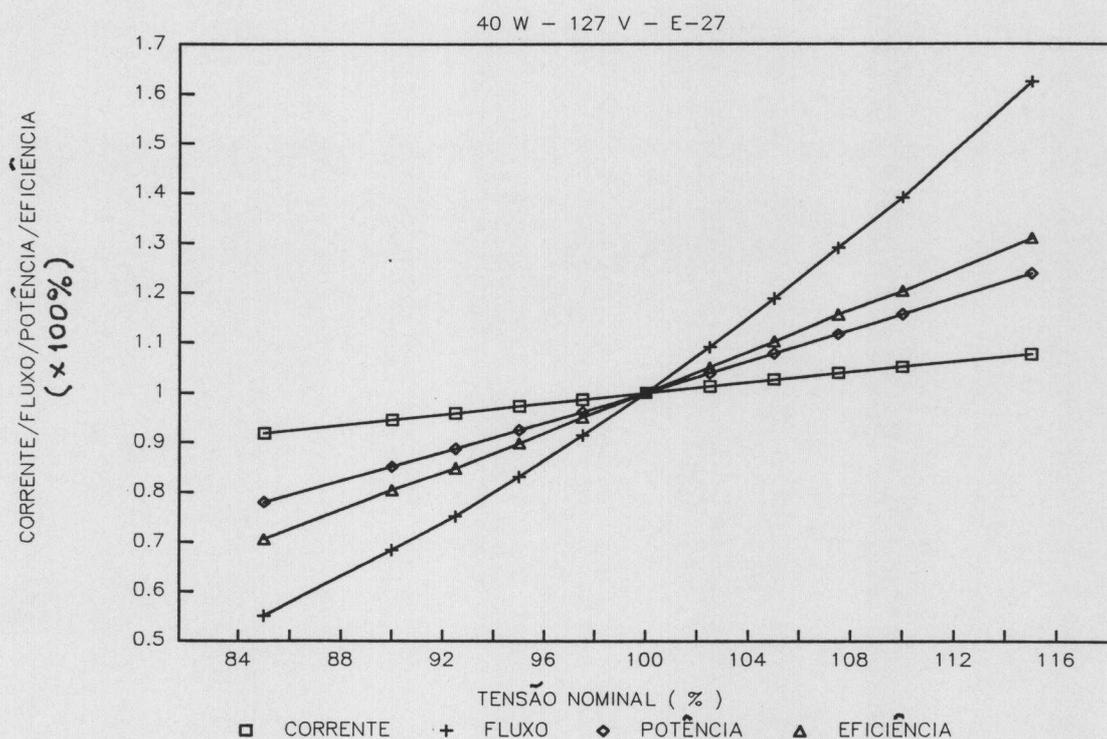


Figura J.1 - Características da lâmpada incandescente em torno da sua tensão nominal. Fonte: Levantamento experimental realizado pelo autor.

Para o cálculo aproximado deste comportamento a literatura⁸⁰ fornece equações que relacionam a característica resultante (na tensão v) ao seu valor nominal (v_0), usando a relação de tensões (v/v_0) elevada a um expoente típico. Como exemplo vamos citar a relação para a potência

$$(P/P_0) = (v/v_0)^n$$

As demais relações são obtidas pelo uso das respectivas características e expoentes. Alguns valores de expoentes dados pela literatura estão na tabela J.1, complementados com resultados experimentais que foram obtidos pelo autor. Visto que o valor do expoente varia em função do tipo de lâmpada, apresentamos os limites obtidos para lâmpadas (de 40 W a 200 W) fabricadas no Brasil.

Não obtivemos o valor do expoente usado na relação da vida (d) por motivo de tempo e quantidade de amostras disponíveis. Uma observação deve ser feita com relação à diferença entre o expoente dado pelo IES e a NBR 5121, o valor 13, segundo a NBR 5121 deve ser aplicado à lâmpadas a vácuo, enquanto o IES não faz distinção alguma.

VALORES (ORIGEM)		COEFICIENTES DE EXPOENTES			
		Potência (n)	Fluxo (k)	Eficiência (g)	Vida (d)
E X P.	MÁXIMO	1,58	3,82	-1,79	-
	MÍNIMO	1,46	3,34	-2,35	-
IES-1984		1,6	3,4	-1,9	13
NBR 5121		-	-	-	(*)13 / 14

TABELA J.1 - COEFICIENTES DE EXPOENTES DADOS NA LITERATURA^{72,75} E OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE (EXP.) DE LÂMPADAS INCANDESCENTES DO MERCADO BRASILEIRO

Nota: (*) Lâmpadas com enchimento a vácuo e gás, respectivamente

J.2 IDENTIFICAÇÃO DE LÂMPADAS

O comportamento da resistência do filamento em função da tensão aplicada na lâmpada, em termos relativos aos respectivos valores nominais, pode ser usado para identificar o tipo de tecnologia do filamento. A relação entre os valores da resistência elétrica quente e fria (na temperatura do ambiente) também pode ser usada para este mesmo fim.



Através dos levantamentos que realizamos em algumas lâmpadas e uso dos resultados apresentados por Candy¹⁰ pudemos concluir que se tratavam de lâmpadas antigas, com tecnologias como o filamento de carbono não tratado (da primeira lâmpada), carbono "metalizado" (segundo avanço ocorrido - 1905). Estes resultados encontram-se nas figuras J.2.1 e J.2.2, respectivamente. Na figura J.2.3 apresentamos resultado similar, mas uma lâmpada com filamento de tungstênio e tipo gaiola.

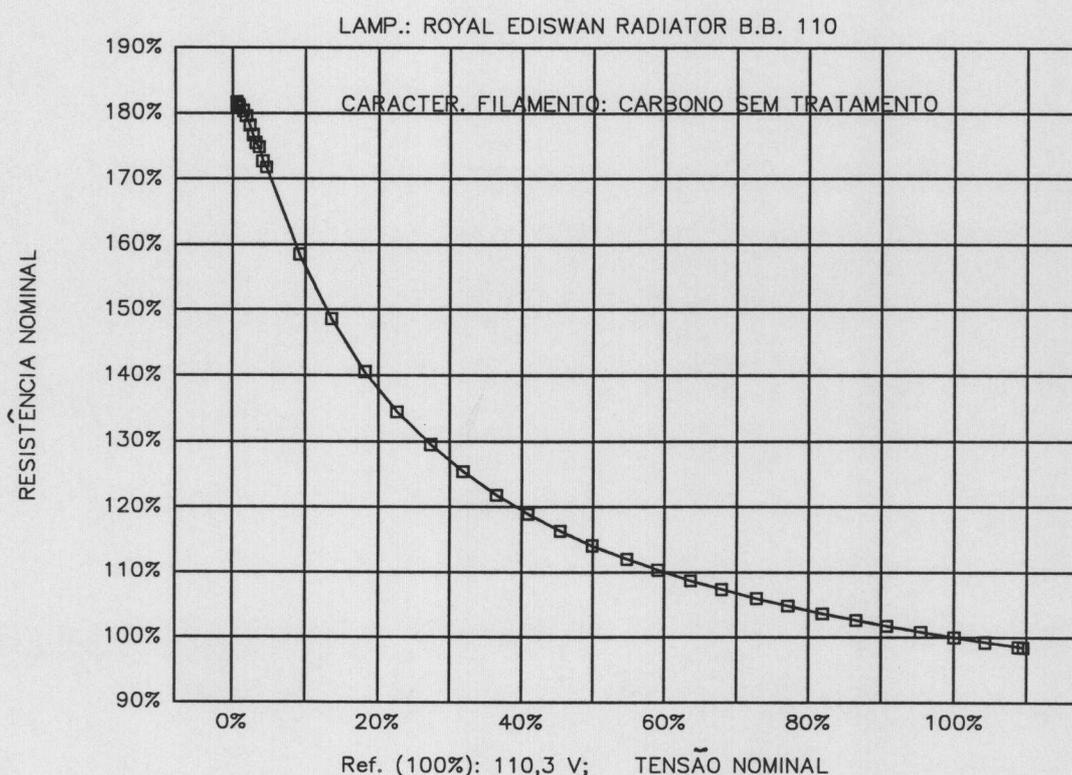


Figura J.2.1 - Variação da resistência elétrica do filamento em função da tensão elétrica aplicada - filamento de carbono sem tratamento

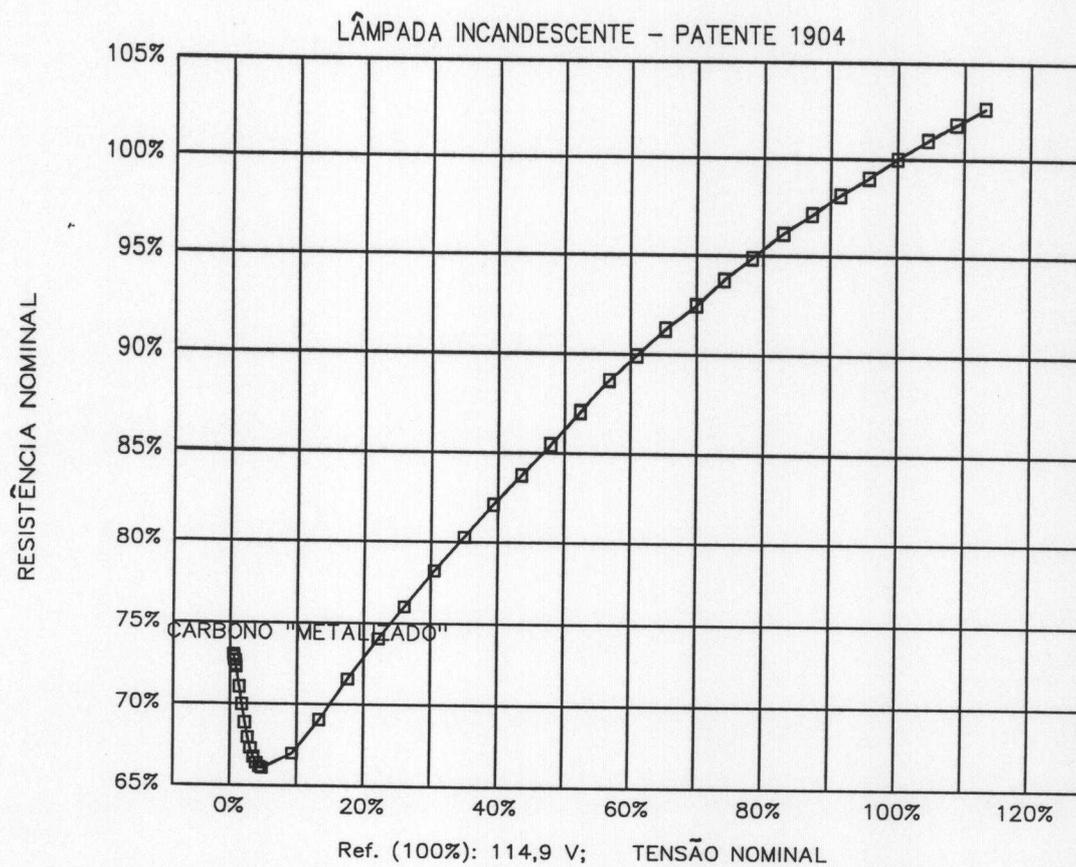


Figura J.2.2 - Variação da resistência elétrica do filamento em função da tensão elétrica aplicada - filamento de carbono "metalizado"

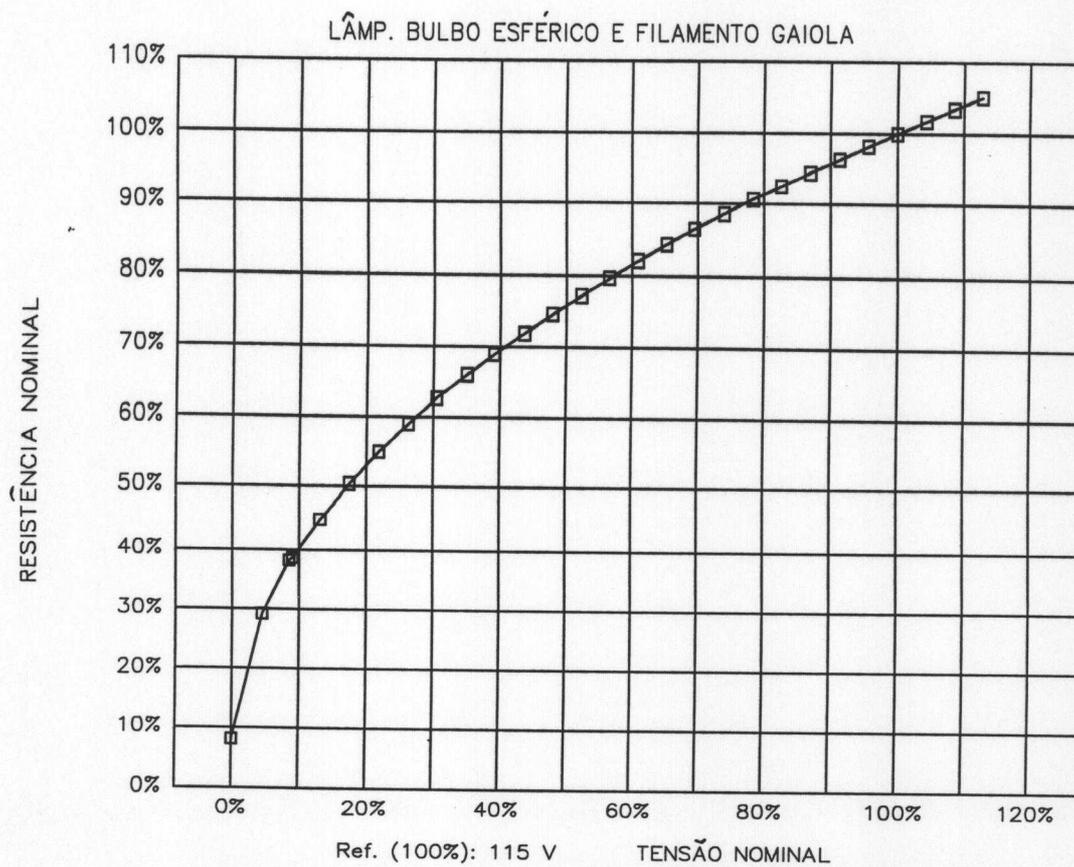


Figura J.2.3 - Variação da resistência elétrica do filamento em função da tensão elétrica aplicada - filamento de tungstênio

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 HOWELL, JOHN W. The maximum efficiency of incandescent lamps, **AIEE**, v.5, n.8, New York, p.237-262, May, 1888.
- 2 PEIRCE, W. M. H. The relation between the initial and average efficiency of incandescent electric lamps, **AIEE**, 22d., New York, p.293-303, May, 1889.
- 3 REED, CHARLES J. Form and efficiency of incandescent filaments, New York, p.491-505, November, 19, 1889.
- 4 THOMAS, B.F.; MARTIN, MESSRS P.; HASSLER R.H. A life and efficiency test of incandescent lamps, **General Meeting of AIEE**, p.271-290, June, 7th, 1892.
- 5 HERING, CARL The most economical age of incandescent lamps, **AIEE**, p.65-84, February, 21th, 1893.
- 6 MERRILL, G. S. TUNGSTEN LAMPS **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers - AIEE**, v. 29, Part II, p. 1709-1729, New York, November 19, 1909.
- 7 HOWELL, JOHN W. METAL FILAMENT LAMPS. 249th meeting of the **American Institute of Electrical Engineers-AIEE**, v. 29, part II, p. 927-960, New York, May 17, 1910.
- 8 COOLIDGE, W. D. DUCTILE TUNGSTEN. 249th meeting of the **American Institute of Electrical Engineers-AIEE**, v. 29, part II, p. 961-965, New York, May 17, 1910.
- 9 HYDE, E. P.; CANDY, F. E.; WORTHING, A. G. A Study of the Energy Losses in Electric Incandescent Lamps, **Transactions of the Illuminating Engineering Society**, p.238-259, February, 1911.
- 10 CANDY, FRANCIS E.; DATES, HENRY B. **ILLUMINATING ENGINEERING**. New York, John Wiley & Sons, 1925.
- 11 MILLAR, PRESTON S.(Executive Secretary of Lamp Committee) THE DEVELOPMENT OF THE INCANDESCENT ELECTRIC LAMP UP TO 1879 **Transactions of the Illuminating Engineering Society**, v. 24, p.717-746, October, 1929.
- 12 MILLAR, PRESTON S. SAFEGUARDING THE QUALITY OF INCANDESCENT LAMPS. **Transactions of the Illuminating Engineering Society**, v. 26, n. 9, p.948-958, November, 1931.
- 13 WHITTAKER, J. D. Applications of Silver Processed Incandescent Lamps with Technical Data. **Transactions of the Illuminating Engineering Society**, v. 28, p.418-436, May, 1933.

- 14 MILLAR, PRESTON S. The qualities of incandescent lamps, **Electrical Engineering**, p.516-523 e 529, May, 1936.
- 15 MOON, PARRY **THE SCIENTIFIC BASIS OF ILLUMINATING ENGINEERING**, First Edition, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York and London, 1936.
- 16 MERRILL, G. S. The Economics of Light Production with Incandescent Lamps with Particular Reference to Operating Voltage, **Trans. Illum. Eng. Soc.**, vol. 32, p.1077, December, 1937.
- 17 MILLAR, PRESTON S. The incandescent lamp situation from the engineering point of view, **AMERICAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS, Transactions**, v.60, p.1174-1180, 1941.
- 18 HALL, JAMES D. The Manufacture of INCANDESCENT MAZDA LAMPS. **ELECTRICAL ENGINEERING**, v. 60, n. 12, p. 574-580, December, 1941.
- 19 GREENBERG, B. F. Cost Analysis of Fluorescent vs. Incandescent Lighting Installations. **Illuminating Engineering**, p. 165-170, Mar. 1942.
- 20 ROBINSON, W. Lighting Cost. **Light and Lighting**, p. 309-312, Aug. 1950.
- 21 Encyclopedia e Dicionario Internacional Editores W. M. JACKSON, INC. Rio de Janeiro/NY (C.H. SIMONDS COMPANY)
- 22 BARROWS, WILLIAM E. **Light, Photometry, and Illuminating Engineering**, Third Edition, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York and London, 1951.
- 23 BARR, A. C., AMICK, C. L. Fundamentals of Lighting Cost Analysis. **Illuminating Engineering**. v. 47, p. 260-264, May, 1952.
- 24 BOAST, WARREN B. **ILLUMINATION ENGINEERING**, Second Edition, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York and London, 1953.
- 25 The Lamp Makers' Story **Illuminating Engineering**, v. LI, p.1-8, January, 1956.
- 26 PEARSON, C. W.; LINSLEY, E. A.; DORSEY Characteristics and Applications of Axial Filament Lamps. **Illuminating Engineering**, p.782-790, December, 1956.
- 27 MEIJERING, J. L.; RIECK, G. D. THE FUNCTION OF ADDITIVES IN TUNGSTEN FOR FILAMENTS. **Philips Technical Review**, v.19, n.4, p.109-144, 1957.
- 28 RUFF, H. R., Light Sources, **Light and Lighting**, p.6-13, January, 1958.
- 29 POTTER, WENTWORTH M.; REID, KIRK M. Incandescent lamp design life for residential lighting, **Illuminating Engineering**, p.751-757, December, 1959.

- 30 ZUBLER, E.G.; MOSBY, F. A. An iodine incandescent lamp with virtually 100 per cent lumen maintenance, *Illuminating Engineering*, p.734-740, December, 1959.
- 31 BROOKS, J. Economic aspects of lighting maintenance. *Light and Lighting*. p. 78-81, Mar. 1962.
- 32 VAN HORN, DAVID D. Mathematical and Physical bases for incandescent lamp exponents, *Illuminating Engineering*, p.196-202, April, 1965.
- 33 COVINGTON, E. J. The Langmuir Film Model in Incandescent Lamps, *Illuminating Engineering*, p.134-142, April, 1968.
- 34 BENTON, W. *Enciclopaedia Britannica Editôres Ltda.*, v.8, p.227-229, São Paulo, 1969
- 35 THOURET, W. E.; ANDERSON, H. A.; KAUFMAN, R. Krypton Filled Large Incandescent Lamps, *Illuminating Engineering*, p.231-240, April, 1970.
- 36 KEITZ, H. A. E. **LIGHT CALCULATIONS AND MEASUREMENTS**, Second Revised Edition, Philips Technical Library, MACMILLAN AND CO LTD, London and Basingstoke, 1971.
- 37 YANNOPOULOS, L. N.; PEBLER, A. On the Role of Oxygen, Hydrogen, and Carbon in a Tungsten Bromine Lamp, *Journal of IES*, p.21-24, October, 1971.
- 38 ELENBAAS, W. **LIGHT SOURCES**. Philips Technical Library, Eindhoven, 1972.
- 39 DELANEY, W. B., MACLENNAN, D. A. A Financial Decision Technique for Choosing Between Alternative Lighting Systems. *Journal of IES*. p. 119-127, Jan. 1972.
- 40 HÖRSTER, H.; KAUER, E.; LECHNER, W. A Concept for the Burning-Out Mechanism of an Incandescent Tungsten Wire, *Journal of IES*, p.309-317, July, 1972.
- 41 EPPIG, H. J.; LOUCAIDES, N. Early Photometric and Electrical Changes in Incandescent Lamps and Their Relationship to Surface Characteristics of Tungsten Filaments, *Journal of IES*, p.274-280, July, 1972.
- 42 AMICK, CHARLES L. Economic awareness in design planning. *Lighting Design & Application*, p. 16-21, Jan. 1973.
- 43 DELANEY, W. B. How much does a lighting system really cost ?. *Lighting Design & Application*, p. 22-28, Jan. 1973.
- 44 FAUCETT, R. E. The new economics of roadway lighting. *Lighting Design & Application*, p. 29-37, Jan. 1973.

- 45 COMENETZ, G.; JOHANSEN, H. A.; SALATKA, J. W. Hot Spots Caused by Necks in a Straight Incandescent Tungsten Lamp Filament in Gas, *Journal of IES*, p. 366-371, July, 1973.
- 46 DAWSON, CHESTER W.; NELSON, JOSEPH L.; SELL, HEINZ, G. Hot Spots and Their Effect on The Lives of Incandescent Filaments, *Journal of IES*, p.381-386, July, 1973.
- 47 COVINGTON, E. J. Hot Spot Burnout of Tungsten Filaments, *Journal of IES*, p.372-380. July, 1973.
- 48 KOO, R. C.; Gerber, M.; Garofolo, J.; Shurgan, J. A Method to Prevent Iron Contamination During Manufacture of Incandescent Filaments, *IES Transaction, Journal of IES*, p.387-395, July, 1973.
- 49 COVINGTON, E. J. The Life-Voltage Exponent for Tungsten Lamps, *Journal of IES*, p.83-91, January, 1973.
- 50 PRAIS, S.J. Economic life of incandescent lamps for domestic lighting, *Lighting Research and Technology*, v. 6 ,n.2, p.101-103, 1974.
- 51 HARVEY, F. J. Failure of Incandescent Tungsten Filaments by Hot Spot Growth, *Journal of IES*, p.295-302, July, 1974.
- 52 KOO, R. C.; Parascandola, L. J.; Shurgan, J. Pressure Effects of the Fill Gas on the Filament Life of an Incandescent Lamp, *Journal of IES*, p.317-322, July, 1974.
- 53 EASTWOOD, Sir Eric, Lamp light and cosmology, *Lighting Research and Technology*, v.6, n.3 p.119-126, 1974.
- 54 KEMBER, R. C.; Greenhill Certification of lighting equipment. *Lighting Research and Technology*, v. 6, n.4, p.197-204, 1974.
- 55 THOURET, W. E.; Kaufman, R.; Orlando, J. W. Energy and Saving krypton filled incandescent lamps, *Journal of IES*, p.188-197, April, 1975.
- 56 DORSEY, R. T. Cost-benefit analysis applied to lighting in the energy equation. *Lighting Design & Application*, p. 36-38, July, 1975.
- 57 HOLCOMB, R. H.; Paugh, R. L. New tungsten halogen technology for long-life lamps, *Lighting Design & Application*, p.25-29, September, 1975.
- 58 COATON, J.R. Operating pressure of incandescent and tungsten-halogen lamps and influences of envelope temperature on life, *Lighting Research and Technology*, v.9, n.1 , p.25-30, 1977.
- 59 VAN DAN, B. B.; Debie, J.R. Numerical calculation of radial transport of mass and heat as applied to incandescent lamps, *Lighting Research and Technology*, v.9, n.2, p.107-111, 1977.
- 60 CONNOR, I.; Rees, J.M. Abnormal failure mechanism in incandescent lamps, *Lighting Research and Technology*, v.9, n.3, p.154-156, 1977.

- 61 SHIZAKI, A.; Katase, Y. The causes of burnout of incandescent lamp filaments, *Jl. Light and Vis. Env.*, 1 (2), p.2-4, 1977.
- 62 BIE, J.R.; Ponsioen, J.C.M.A. Life and luminous flux of halogen incandescent lamps related to filament temperature, pressure and CH_2Br_2 content, *Lighting Research and Technology*, v.9, n.3, p.141-150, 1977.
- 63 COATON, J.R. Some aspects of the design of incandescent GLS lamps, *Lighting Research and Technology*, v.10. n.4, p.225-229, 1978.
- 64 The New Encycloædia Britannica Chicago, 1978.
- 65 THE INFRARED-reflecting incandescent-an update *Lighting Design & Application*, 9, 44, January, 1979.
- 66 FITZPATRICK, J. R.; Rees, J. M. Progress towards a practical fluorine lamp, *Lighting Research and Technology*, v.11, n.2, p.85-89, 1979.
- 67 DILaura, D. L.(Chairman-IES TRANSACTION) Life cycle cost analysis of electric lighting systems. *Lighting Design & Application*, p. 43-48, May, 1980.
- 68 STAUFFER, Brooke. Low-wattage fluorescent lamps: a low first cost approach to energy conservation. *Lighting Design & Application*, p. 30-33, July, 1980
- 69 JENSEN, James. Old light bulbs-treasures of the past ?, *Lighting Design & Application*, p.41-45, July, 1980.
- 70 JAY P.A.; Coomber, D.C. The life and performance of incandescent lamps, *Lighting Research and Technology*, v.12, n.2, p.88-104, (p.230 - correspondence from J. R. Coaton), 1980.
- 71 *Lighting Design & Application*, p.47, January, 1980.
- 72 KAUFMAN, John E.(Editor). Section 8 - Light Sources IES -*Lighting HandBook*, Reference (8) Volume, New York, 1981.
- 73 WYNER, Elliot F. et al. Incandescent socket adapter for low wattage mercury and sodium lamps. *Journal of IES*, p.79-84, January, 1982.
- 74 LEMAIGRE-YOREAUX, Pierre La durée de vie des lampes à incandescence. *RGE*, n.3, p. 162-165, Mar., 1982.
- 75 ESPECIFICAÇÃO - Lâmpadas (incandescentes) com filamento de tungstênio para iluminação geral - **NBR 5121** - Novembro, 1982.
- 76 CAYLESS, M. A.; Marsden Lamp and Lighting, 3rd ed., Edward Arnold Ltd., Great Britain, 1983.
- 77 KNISLEY, Joseph Energy-saving alternates to incandescent lamps, *EC&M*, p.88,89 e 103, November, 1983.

- 78 HUETTNER, M. On the economic life of incandescent lamps, **Lighting Research and Technology**, v.15, n.4, p.193-194, 1983.
- 79 KAUFMAN, John E.(Editor). Section 3 - Lighting Economics - Light Sources IES -**Lighting HandBook**, Application(3) Volume, New York, 1984.
- 80 KOSTLIN, H. Efficiency increase of light sources by infrared reflecting filters, **Journal of IES**, p.151-164, oct., 1984.
- 81 HOEGLER, L. E.; McGowan, T. K. Practical high efficiency tungsten-halogen lamps using IR reflecting films, **Journal of IES**, p.165-174, oct., 1984.
- 82 BROWN, R. L.; Stump, C. E. Photometer for the evaluation of infrared reflective coated lamps, **Journal of IES**, p.175-187, oct., 1984.
- 83 IES Lighting Ready Reference (RR-85) - **Illuminating Engineering Society of North**, 1985.
- 84 Publication IEC 64 Tungsten filament lamps for domestic and similar general lighting purposes Performance requirements. Genève, Suisse, 1987.
- 85 GELLER, Howard S. et al. Electricity Conservation In Brazil: Potential And Progress. **Energy**, v. 13, n. 6, p. 469-483, 1988.
- 86 ANDERSON, T. E. et.al. Effects of Incandescent Lamps with Series Diodes on Power Distribution Systems. **Journal of the Illuminating Engineering Society**, p.3-9, Winter, 1988.
- 87 OLWERT, R. J. et al. Incandescent and Halogen Lamp Design and Performance with Series Diodes. **Journal of the Illuminating Engineering Society**, p.67-73, Winter, 1988.
- 88 HERAS, Jaime Conservação de energia na iluminação. **Revista Siemens**, IX, p.11-15, 2/89, 1989.
- 89 ZATZ, José Conservação de energia no Brasil. **Revista Siemens**, IX, p.37-40, 2/89, 1989.
- 90 MCGOWAN, Terry Energy - Efficient Lighting, Electricity - Efficient End -Use and New Generation - Johansson, Thomas B.; Boblund, Birgit And Williams, Robert H. Editors - Lund University Press, p. 59-88, 1989.
- 91 NADEL, Steven, at al. Lamp Efficiency Standards For Massachusetts Analysis And Recommendations, Prepared for: Massachusetts Executive Office of Energy Resources, Boston, MA, June, 1989.
- 92 ELETROPAULO - 90 anos e quase cinco milhões de consumidores. **São Paulo Energia**, ano 6, n.56, p.5-10, setembro, 1989.
- 93 KAMIMURA, Arlindo A avaliação da demanda de energia no planejamento energético integrado. **São Paulo Energia**, ano VI, n.58, p.33-41, novembro, 1989.

- 94 PARR, R. G. The economic choice of conductor size. **RGE**, n.10, p.49-55, Nov., 1989.
- 95 WOODWARD, G. Staite and Petrie: pioneers of electric lighting, **IEE Proceedings**, v. 136, Pt. A, n. 6, p. 290-296, November, 1989.
- 96 HELLWIG, Helmut The Importance of Measurement in Technology-Based Competition. **IEEE Transactions on instrumentation and measurement**, v.39, n.5, October, 1990.
- 97 GEHRING, A.P.; Holten, P.A.J. A System Approach to Incandescent Reflector Lamp Development. **Journal of Illuminating Engineering Society**, p. 98-102, Summer, 1990.
- 98 GYDESEN, Annette; Maimann, Darte Life Cycle Analyses Of Integral Compact Fluorescent Lamps - Energy and Emissions, **Proceedings Right Light Bright Light 1st European Conference on Energy-Efficient Lighting**, Stockholm, Sweden, p.411-417, May 29-30, 1991.
- 99 BERGMAN, R. S. Halogen-IR Lamp Development: A System Approach, **Journal of Illuminating Engineering Society**, p.10-16, Summer, 1991.
- 100 GADGIL, Ashok J.; Jannuzzi, Gilberto De Martino Conservation potential of compact fluorescent lamps in India and Brazil, **Energy Policy**, p.449-463, June, 1991.
- 101 RAND, Marcus; Boyle, Stewart Energy-Saving are Energy-Wasting A Review and Critique. **Energy Policy and Research Unit, Atmosphere and Energy Campaign Greenpeace International**, 1991.
- 102 MOREIRA, J.R.; Poole, Alan D.; Burini, Elvo Calixto, Junior. Technology Transfer And Absorption In Developing Countries: A Case Study Of Lighting In Brazil. **Asian Energy Institute**, July, 1992.
- 103 CHANG, P. Y. Three-Dimensional Natural Convection in an A19 100W Incandescent Lamp, **Journal of IES**, p.21- 24, Summer, 1992.
- 104 WEBER, B.; Scholl, R. A Novel Type of Light Source: Continuous Radiation from Small Clusters in Microwave Excited Discharges. **Journal of the Illuminating Engineering Society**, p.93-96, Summer, 1992.
- 105 BERMAN, S. M. Energy Efficiency Consequences of Scotopic Sensitivity. **Journal of the Illuminating Engineering Society**, v.21, n.1, p.3-9, Winter, 1992.
- 106 BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, BRASIL, Ministério de Minas e Energia, 140pg., Brasília, 1990 e 1992.

