

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP
Departamento de Engenharia de Energia e
Automação Elétricas

ISSN 1413-2214
BT/PEA/9608

Utilização de Curvas de Carga de
Consumidores Residenciais Medidas
para Determinação de Diversidade de
Carga, e Carregamento de
Transformadores de Distribuição

Eduardo Luiz Ferrari
José Antonio Jardini

São Paulo - 1996

O presente trabalho é um resumo da dissertação de mestrado apresentada por Eduardo Luiz Ferrari, sob orientação do Prof. Dr. José Antonio Jardini: "Utilização de Curvas de Carga de Consumidores Residenciais Medidas para Determinação de Diversidade de Carga, e Carregamento de Transformadores de Distribuição", defendida em 08/02/96, na EPUSP.

A íntegra da dissertação encontra-se à disposição com o autor e na biblioteca de Engenharia de Eletricidade da Escola Politécnica da USP.

Ferrari, Eduardo Luiz

Utilização de curvas de carga de consumidores residenciais medidas para determinação de diversidade de carga, e carregamento de transformadores de distribuição / E.L. Ferrari, J.A. Jardini. -- São Paulo : EPUSP, 1996.

20p. -- (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, BT/PEA/9608)

1. Distribuição (Energia elétrica) 2. Transformadores elétricos 3. Medidas elétricas I. Jardini, José Antonio II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas III. Título IV. Série

ISSN 1413-2214

CDD 621.319
621.314
621.37

UTILIZAÇÃO DE CURVAS DE CARGA DE CONSUMIDORES RESIDENCIAIS MEDIDAS PARA DETERMINAÇÃO DE DIVERSIDADE DE CARGA, E CARREGAMENTO DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO.

Nome: Eduardo Luiz Ferrari
Professor Doutor José Antonio Jardini

RESUMO

Este trabalho apresenta algumas aplicações de curvas de cargas residenciais, obtidas através de medições pelas Concessionárias de Energia Elétrica do Estado de São Paulo, em campanha de medições desenvolvida junto ao CED.

Na primeira aplicação determinou-se, inicialmente, uma curva de coincidências de ocorrência de picos de cargas, em função do número de consumidores ligados simultaneamente a um determinado transformador de distribuição eminentemente residencial. Esta curva fornece então, a indicação de quantos consumidores apresentam picos de cargas coincidentes relativamente ao número total de consumidores ligados ao transformador de distribuição.

De posse desta curva e com as medições de curvas de cargas com tempos de integração mais longos (60 minutos), nas quais está sendo considerado o efeito da energia dos chuveiros, mas não a ponta provocada pelos mesmos, pode-se compor as curvas de diversidade.

Na segunda aplicação enfocou-se o cálculo da perda de vida de transformadores de distribuição. Para isto foram consideradas as curvas diárias medidas para o transformador de distribuição, suas curvas de média (M) e de desvio-padrão (DP).

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento das características do pico de carga é um fator que está ligado intimamente às Concessionárias de Distribuição de Energia Elétrica. De posse do valor numérico deste pico e do instante de ocorrência, as Concessionárias fazem o dimensionamento de sua rede e ajustam os seus contratos de compra de energia em grandes blocos com outras Concessionárias, reponsáveis pela transmissão da energia desde as fontes de Geração até os domínios da Concessionária de Distribuição.

Um dimensionamento inadequado, da rêde da Concessionária responsável pela Distribuição de Energia Elétrica, pode comprometer a qualidade das atividades desenvolvidas pelo consumidor final, e em última instância prejudicar a Sociedade como um todo.

Do exposto acima pode-se perceber a importância do conhecimento do pico de carga para as Concessionárias. Por outro lado a posse das curvas de cargas dos consumidores permite aprimorar os projetos dos sistemas de Distribuição. Neste trabalho dois destes aspectos são analisados.

Primeiramente estuda-se a diversidade das cargas residenciais sendo que a ênfase maior foi dada ao uso do chuveiro elétrico, que se constitui num dos aparelhos de maior potência dentro de uma residência, e com uma contribuição importante no pico de carga das Concessionárias.

Em seguida estuda-se um aprimoramento na metodologia de cálculo de carregamento de transformadores residenciais de distribuição, com relação a perda de vida.

O trabalho baseia-se em medições de curvas de cargas efetuadas pelas Concessionárias de Energia Elétrica do Estado de S. Paulo (CESP, CPFL e ELETROPAULO).

2.1 ESTUDOS ANTERIORES

a) Estudo da carga

Um dos primeiros estudos de carga no estado de São Paulo foi realizado pela Jorge Wilhelm Consultores [2]. Através da análise do trabalho da Jorge Wilhelm pode-se depreender várias conclusões de interesse, a saber:

- O setor residencial representa 20 % do consumo de eletricidade.
- Quanto à participação dos eletrodomésticos na ponta residencial global obteve-se para o chuveiro elétrico o valor de 49 %.

Os estudos realizados no âmbito do Centro de Excelência em Distribuição (CED), tiveram por objetivo o conhecimento da curva diária de carga do consumidor residencial e dos transformadores predominante residenciais. Numa etapa posterior, análise semelhante foi desenvolvida para consumidores comerciais e industriais.

Foram medidas 4018 curvas de consumidores residenciais e 2316 de transformadores.

Um trabalho desenvolvido pela CEMIG, relativo a energia solar para aquecimento de água [5], teve como objetivo principal desenvolver uma análise sobre o comportamento do consumo de energia elétrica dos equipamentos de aquecimento complementar e de circulação forçada utilizados nos sistemas de aquecimento solar de água residenciais. Analisa vantagens do ponto de vista da Concessionária e também do ponto de vista dos usuários mostrando vantagens na aplicação de prédios.

O trabalho considera que 67,6 % das residências brasileiras possuem chuveiro elétrico, sendo seu uso um hábito nacional. Os maiores índices de difusão são alcançados nas regiões Sul, Sudeste e Centro Oeste, conforme o estudo realizado pelo PROCEL (Pesquisa de Posse de Eletrodomésticos e de Hábitos de Consumo).

O uso do chuveiro elétrico dá-se principalmente das 18:00 h às 19:00 h, quando em cerca de 50 % das residências existe pelo menos uma pessoa tomando banho. Entre 18:00 h e 19:00 h a influência do chuveiro corresponde a 8,5 % da ponta total de energia elétrica no Brasil.

b) Carregamento de transformadores

Na dissertação relativa à política de carregamento de transformadores [6], o autor desenvolveu uma metodologia alternativa ao uso corrente, pelas Concessionárias de Energia Elétrica, da função kVAs, a qual correlaciona para cada localidade o consumo em kWh e a demanda máxima, em kVA.

Na sua proposição, o autor, utilizando curvas de cargas diárias, desenvolveu uma metodologia alternativa ao uso da função kVAs, obtendo resultados menos conservativos, porém mais próximos da realidade para o cálculo de perda de vida dos transformadores. Esta metodologia considera as curvas de cargas médias e dos desvios padrão dos transformadores residenciais, obtidas de medições de curvas diárias em campo.

O Comitê de Distribuição (CODI) elaborou um estudo visando determinar o carregamento de transformadores em prédios residenciais. Baseado em medições na entrada de edifícios, nos apartamentos e no condomínio definiu uma metodologia para determinar a demanda máxima esperada num transformador de prédio residencial considerando a carga do condomínio e a demanda diversificada dos apartamentos.

Da bibliografia analisada concluiu-se sobre a necessidade de investigação dos seguintes aspectos:

- Comportamento das curvas de carga individuais dos consumidores:

Investigar a causa dos altos desvios padrão e a sua influência nos estudos e projetos. Em particular, verificar qual é o impacto do chuveiro elétrico e estabelecer uma regra de fácil utilização quanto à diversidade, na composição (soma) de várias cargas residenciais.

- Carregamento de transformadores:

A representação por curvas de Gauss parece razoável, porém o cálculo da perda de vida é bastante influenciado pelos valores extremos da curva. Assim o truncamento adequado nos extremos da curva Gaussiana precisaria ser melhor analisado.

3. CARACTERÍSTICAS DA CARGA RESIDENCIAL

Para os estudos propostos são utilizadas as curvas de cargas medidas pelas Concessionárias do estado de São Paulo em conjunto com o CED. Estas curvas foram medidas com registradores tipo REP (registrador eletrônico programável). Estes registradores, acoplados a medidores tipo disco de indução, contam o número de voltas do disco e determinam assim a energia e conseqüentemente a potência em intervalos pré determinados (1 ou 5 ou 15 minutos).

Para as medições de cargas residenciais os consumidores foram agrupados em estratos de consumo.

No caso específico do estudo realizado no CED, os estratos foram, inicialmente, divididos em intervalos de 50 kWh/mês. Análises das curvas obtidas para cada um destes estratos, e para cada uma das Concessionárias envolvidas, implicou em agrupamentos de estratos com mesmas curvas de carga.

Assim, exemplificando, os estratos recomendados para a CPFL passariam a ser de 51-100 kWh/mês; 101-200 kWh/mês; 201-300 kWh/mês e 301-400 kWh/mês.

Na Figura 3-1 é apresentada a curva diária de carga de um consumidor residencial. Analisando-se vários dias da curva de carga de um mesmo consumidor pode-se notar que os maiores picos, que são, em geral oriundos do chuveiro, não acontecem sempre no mesmo horário. Mesmo que um consumidor tivesse hábitos mais rígidos de consumo, nem sempre ele tomaria banhos no mesmo horário, podendo quando muito situar seus banhos dentro uma faixa por ele pré determinada

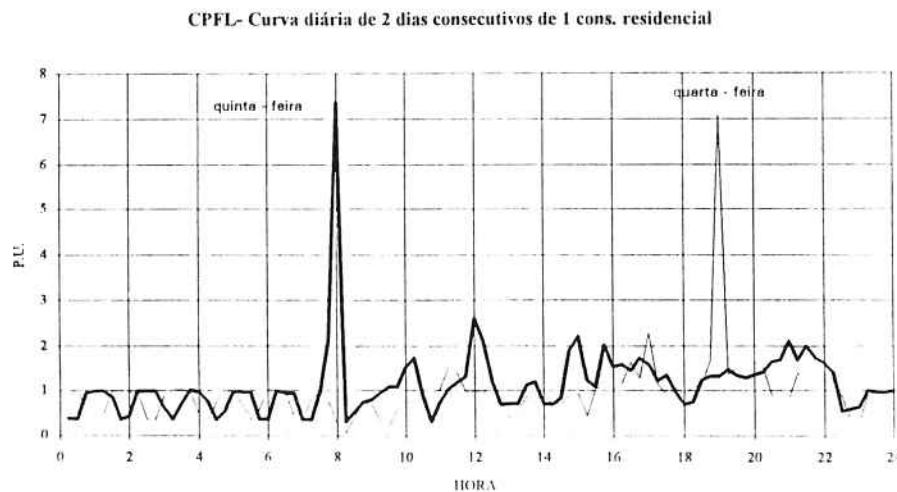


Figura 3-1 - Curva diária de um consumidor residencial.

Analogamente aos consumidores residenciais, as curvas de cargas dos transformadores foram medidas com aparelhos do tipo REP. A curva do transformador mostrou-se mais bem comportada que as curvas individuais de cada consumidor, o que é evidenciado pelo desvio padrão encontrado relativamente baixo, da ordem de 20 % da média.

4. FATOR DE DIVERSIDADE DE CHUVEIROS

Nos estudos já realizados, relativos ao levantamento das curvas de cargas do consumidores residenciais, nota-se que a carga predominante na determinação do valor máximo de carga (ponta) é o chuveiro. A referida carga (chuveiro) apresenta, em geral, instante de ocorrência aleatório durante as 24 horas do dia, considerando-se cada um dos consumidores individualmente, em diversos dias de análise. Esta aleatoriedade faz com que as cargas dos chuveiros não coincidam totalmente no transformador de distribuição.

Assim foi feito um levantamento prático das coincidências, baseando-se em diferentes amostras de consumidores, da CPFL e da CESP.

A metodologia utilizada para determinar as coincidências consistiu basicamente de:

- a) Medições simultâneas das curvas diárias de cargas de um grupo de "n" consumidores residenciais ligados a um mesmo transformador de distribuição.
- b) Tratamento das curvas diárias de cargas dos "n" consumidores, considerando intervalo de integração de 5 minutos. Obtém-se, para cada um dos consumidores individuais, uma planilha onde constam para cada um dos dias medidos, os valores da potência média de 5 minutos ao longo das 24 horas de um dia.
- c) Comparações entre as planilhas dos "n" consumidores com a meta de encontrar as coincidências entre os picos de carga a cada instante.
- d) Tabelamento de todas as coincidências.
- e) Análise estatística das coincidências.

a) Medições da CPFL

Os dados que foram fornecidos pela CPFL contemplaram tempos de integração dos pulsos medidos de 5 minutos. Desta maneira, cada consumidor apresentou, durante um dia completo de medições, 12 pontos/hora multiplicado por 24 horas, ou seja 288 pontos. Os 288 pontos diários medidos foram subdivididos em duas planilhas, uma delas incluindo as medições desde 4:00 h até as 14:00 h e a segunda incluindo medições desde 14:05 h até as 24:00 h

Desenvolveu-se então, uma série de programas em Clipper e DBase IV para tratar convenientemente os dados das medições.

Foram medidas as curvas de cargas em 9 consumidores (C1 a C9) ligados a um transformador T1 e 11 consumidores (C1 a C11) ligados a um transformador T2. Estes consumidores foram medidos simultaneamente em grupos conforme a tabela 3-1 a seguir:

Tabela 3-1 Consumidores medidos pela CPFL

Grupo	Consumidores	Período das medições
G11	C1, C2, C3	29/04/92 - 28/05/92
G12	C4, C5, C6	28/05/92 - 29/07/92
G13	C7, C8, C9	29/08/92 - 5/10/92
G21	C1, C2, C3, C4	27/05/92 - 29/07/92
G22	C5, C6, C7	29/04/92 - 27/05/92
G23	C8, C9, C10, C11	29/07/92 - 4/10/92

Do exame destes grupos pode-se inferir quantas coincidências de chuveiros ocorreram para grupos de até 4 consumidores.

Com objetivo de se obter as coincidências de um maior número de consumidores ligados simultaneamente ao mesmo transformador de distribuição formou-se uma nova amostra assumindo-se que os 9 consumidores medidos para o transformador T1 e os 11 consumidores ligados ao transformador T2 estivessem ligados simultaneamente ao mesmo transformador.

Embora as referidas medições não fossem todas contemporâneas, os consumidores foram deslocados no tempo convenientemente para que as amostras assim obtidas, fossem comparadas para os mesmos dias da semana. Obteve-se assim, cerca de 30 dias de medições para os consumidores ligados a T1 e também para os consumidores ligados a T2.

Ainda com o mesmo propósito de se aumentar mais ainda o número de consumidores ligados ao mesmo transformador de distribuição, foi feito adicionalmente um deslocamento conveniente entre os 9 consumidores de T1 e os 11 consumidores de T2, de modo a se criar uma amostra de 20 consumidores simultaneamente ligados.

b) Medições na CESP

Com a medição simultânea real de 7 consumidores ligados a um mesmo transformador de distribuição residencial da CESP, por um período de 12 dias, foi feita na amostra, a determinação das coincidências duplas, triplas, etc..

Foram elaboradas tabelas, para cada uma das planilhas analisadas, com as estatísticas de coincidências de chuveiros, considerando-se:

- Tipo de coincidências (dupla, tripla, etc.).
- Número de dias em que ocorreu pelo menos uma coincidência.
- Número de vezes em que ocorreu coincidências.

Lembra-se que, num mesmo dia pode ocorrer mais que uma coincidência, sendo portanto o número de vezes em que ocorre coincidências maior ou igual ao número de dias em que ocorre pelo menos uma coincidência.

Na tabela 4-1, a seguir, são apresentados os resultados para cada um dos grupos de consumidores analisados.

Tabela 4-1 Coincidências de chuveiros

Consumidores	Dias	Dupla		Tripla		Quádrupla		Quintupla		Hexa		Hepta	
		d	v	d	v	d	v	d	v	d	v	d	v
G11	30	0,133	0,133	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G12	63	0,508	1,175	0,095	0,127	-	-	-	-	-	-	-	-
G13	37	0,459	0,784	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G21 (3 cons.)	64	0,281	0,438	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G21 (4 cons.)	32	0,656	0,906	0,031	0,031	-	-	-	-	-	-	-	-
G22	30	0,367	0,467	0,033	0,066	-	-	-	-	-	-	-	-
G23 (3 cons.)	68	0,353	0,544	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
G23 (4 cons.)	37	0,270	0,378	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CPFL 9 cons.	25	1,000	7,440	0,640	1,640	0,160	0,200	0,040	0,040	-	-	-	-
CPFL 11 cons.	30	1,000	6,900	0,700	1,633	0,167	0,267	-	-	0,033	0,033	-	-
CPFL 20 cons.	24	1,000	7,125	1,000	6,542	0,958	2,000	0,458	0,750	0,042	0,042	0,042	0,042
CESP 7 cons.	12	1,000	4,000	0,333	0,417	-	-	-	-	-	-	-	-

d número de dias em que houve coincidências dividido pelo número de dias de medições

v número de vezes em que houve coincidências dividido pelo número de dias de medições

A curva de probabilidade de ocorrência para cada tipo de coincidência, mostrada na Figura 4-1 foi ajustada à partir da tabela resumo.

A partir desta figura pode-se obter o tipo de ocorrência em função do número de consumidores com qualquer probabilidade de acerto . Por exemplo, na figura 4-2, apresenta-se as coincidências com probabilidade 10% de serem excedidas.

Dividindo o número de coincidências pelo número de consumidores obtém-se os valores da figura 4-3, denominada Fator de Coincidência.

Observa-se que, nas condições da figura 4-3, o fator de coincidência para transformadores residenciais com 40 consumidores ligados é de cerca de 25 %.

Visto de outra forma a Figura 4-3 indica qual a porcentagem de consumidores que têm chuveiros simultaneamente ligados , em função do número total destes consumidores.

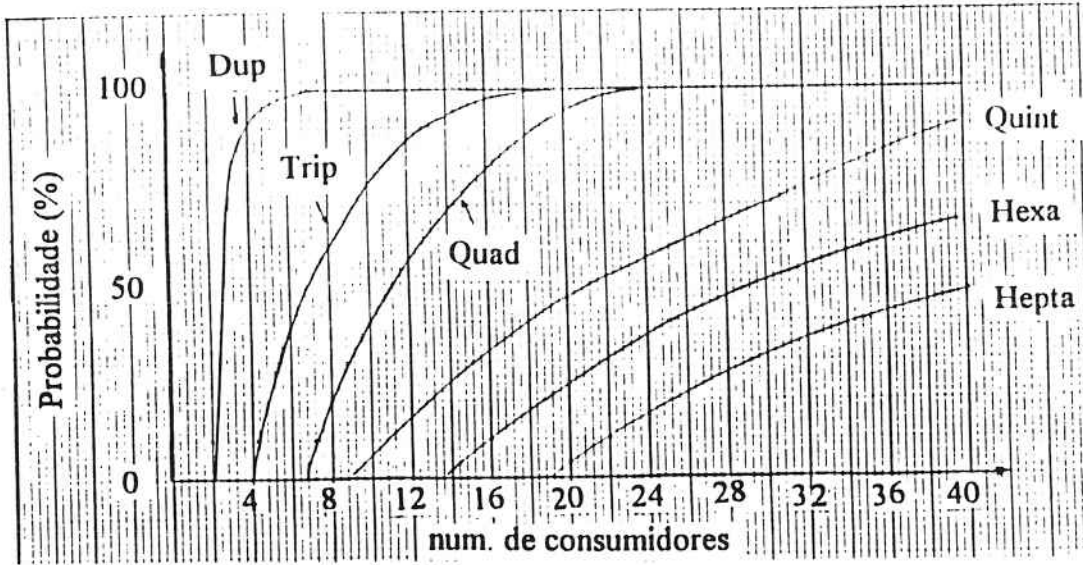


Figura 4-1 Probabilidade de ocorrência para cada tipo de coincidência

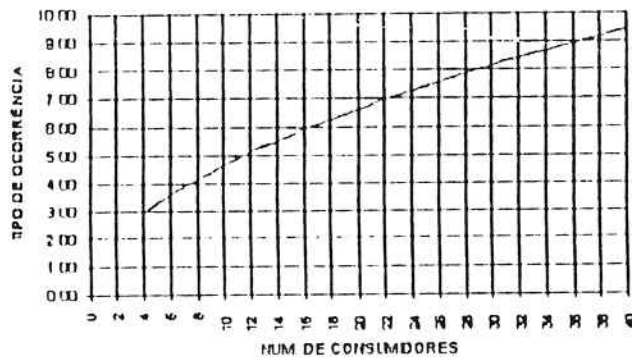


Figura 4-2 Tipo de ocorrência em função do número de consumidores (10 % de probabilidade de ser excedido)

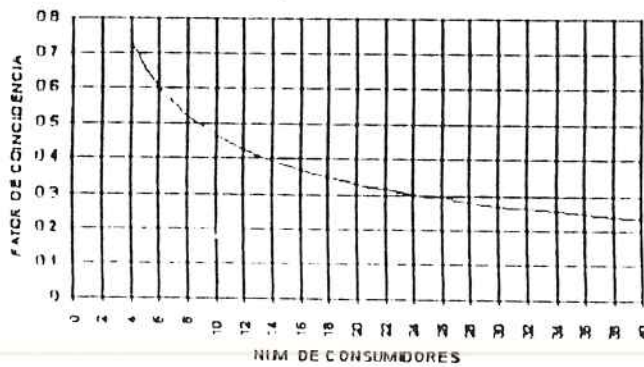


Figura 4-3 Fator de coincidência

5. AVALIAÇÃO DA DIVERSIDADE DE CARGAS RESIDENCIAIS

Neste item está descrita uma metodologia para a obtenção de curvas de demandas diversificadas para os consumidores residenciais.

Esta metodologia procura levar em conta :

- Fatores de coincidências de chuveiros em função do número de consumidores ligados ao transformador de distribuição.
- Curvas de médias e de desvios padrão, já levantadas, com intervalos de integração superiores a 5 minutos, isto é curvas onde está diluído o efeito da ponta proporcionada pelos chuveiros, mas onde está mantida a energia dos chuveiros.

A aplicação desta metodologia foi orientada para as medições feitas pela CPFL, cujos estratos representativos de consumo, foram :

51 a 100 kWh/mês ; 101 a 200 kWh/mês ; 201 a 300 kWh/mês e 301 a 400 kWh/mês. Na figura 5-1 estão apresentadas as curvas representativas do estrato 101 a 200 kwh/mês expressas em p.u. da potência média mensal.

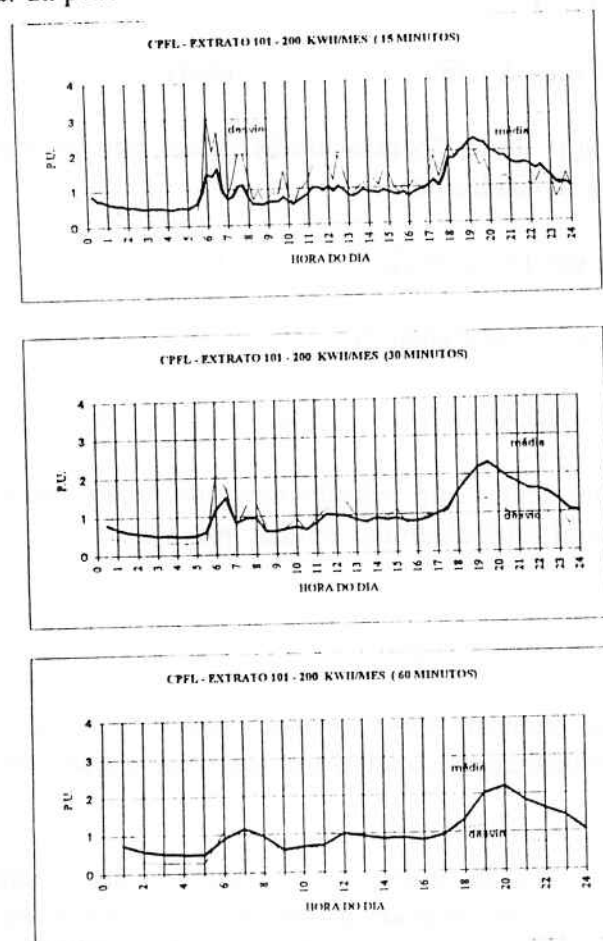


Figura 5-1 Estrato 101 a 200 kWh/mês - média e desvio padrão

A metodologia adotada para agregação de "n" consumidores iguais consiste em:

Na curva de carga representativa de cada estrato de consumo selecionou-se a demanda máxima (D) da curva média e o respectivo desvio padrão (S).

A demanda (D_n) e o desvio padrão (S_n) de "n" consumidores podem ser obtidas pelas fórmulas:

$$D_n = n D \quad (5-1)$$

$$S_n^2 = n S^2$$

$$S_n = \sqrt{n} S \quad (5-2)$$

Os valores obtidos pelas fórmulas (5-1) e (5-2) estão em p.u. da potência média de um consumidor.

No caso de se considerar a potência média dos "n" consumidores, as fórmulas passam a :

$$d_n = n D / n = D \quad (5-3)$$

$$s_n = S_n / n = \sqrt{n} S / n = S / \sqrt{n} \quad (5-4)$$

Os valores de ponta (p.u.) de "n" consumidores iguais com uma certa probabilidade (p%) de não ser excedida são dadas por:

$$\text{ponta (pu)} = d_n + k s_n = D + k S / \sqrt{n}, \quad (5-5)$$

onde k é função do nível de confiança:

$$k = 3 \quad p \% = 99,9 \% ; k = 1,3 \quad p \% = 90,0 \% ; \text{etc.}$$

Observa-se que o cálculo acima está calcado nos valores de desvio padrão, que são muito variáveis devido a aleatoriedade das cargas, principalmente do uso de chuveiros elétricos.

Assim propõe-se a seguinte metodologia:

- a) primeiramente deve-se eliminar os chuveiros como pontas das curvas diárias. Isto pode ser feito representando a curva diária de cada estrato em intervalos de 60 minutos.

Visto que um banho dura da ordem de 7,5 min seu efeito, como ponta, aparece dividido por $(60/7,5) = 8$ na demanda média de 1 hora eliminando assim seu efeito como pico. Notar que o efeito como energia consumida ainda é mantido.

As curvas diárias preparadas desta forma (pontos a cada 60 min) levam a uma nova curva média parecida com aquela obtida com valores em intervalos de 15 ou 5 min., porém a curva do desvio padrão é menor. Pelo equacionamento acima obtém-se os valores da demanda máxima diversificada, sem incluir o chuveiro..

- b) Adicionalmente, os chuveiros como valores de ponta são somados ao valor de ponta das curvas obtidas com intervalo de integração de 60 minutos, (e para uma certa possibilidade de ocorrências) obtendo-se curvas de diversidade contemplando os chuveiros.

Alternativamente pode-se pensar em aplicar as equações 5-1 a 5-5 com os dados das curvas definidas em intervalos de 15 minutos, aparecendo então, em parte, o efeito do chuveiro como ponta.

Os resultados destes vários procedimentos são comparados neste ítem e mostrados na figura 5-2. Na figura 5-2 os valores de demandas diversificadas são calculados por processos diferentes, a saber:

- a) curvas de demanda diversificada de 60 minutos, sem incluir chuveiros
- b) curvas de demanda diversificada originais, isto é, de 15 minutos, incluindo em parte os chuveiros
- c) chuveiros de 4000W / duração de 5 minutos. Para o estrato de 51 a 100 kWh/mês apresenta-se adicionalmente curvas com chuveiros de 3000 W e duração do banho de 4 minutos.

Para a obtenção das curvas de diversidade, por estratos, considerando-se por exemplo potência dos chuveiros de 3000 W e duração do banho de 4 minutos, obtém-se as seguintes equações:

$$\text{Valor (kW)} = V \left(\frac{\text{Média kWh} \times 1000}{720} \right) n + Fc \, n \, 3000 \left(\frac{4}{15} \right)$$

Convertendo os valores para p.u., na base da potência média de "n" consumidores iguais, tem-se:

$$\text{valor (p.u.)} = \frac{\text{Valor (kW)}}{\left(n \frac{\text{Média kWh} \times 1000}{720} \right)} = V + Fc \left(3000 \frac{4}{15} \right) \frac{1}{\frac{\text{Média kWh} \times 1000}{720}}$$

ou de outra forma:

$$\text{valor (p.u.)} = \left[n V + Fc \, n \frac{3000}{0.72} \frac{4}{15} \right] \frac{1}{n}$$

Sendo :

valor (p.u.) - valor da demanda diversificada em p.u. da potência média de "n" consumidores do mesmo estrato, cada um consumindo a energia média (Média kWh) do estrato (75, 150, 250 e 350 kWh/ mês, para os estratos 1, 2, 3 e 4 respectivamente).

$n V$ - produto do número de consumidores n, pelo valor de ponta (V) do estrato. O valor V depende da probabilidade p% fixada de não ser excedido, e é obtido na curva representada em intervalos de 60 minutos (em p.u.).

A Média kWh é a energia média do estrato. Este valor multiplicado por 1000 e dividido por 720 horas fornece a potência média (potência de base), em Watts, no estrato. O valor 4/15 é a redução que aparece no valor da ponta do chuveiro quando a curva é representada em intervalos de 15 minutos (4 minutos é a duração do banho).

Considerou-se, na composição da curva de 60 minutos com curvas de coincidências de chuveiros, o valor com probabilidade de não ser excedido de 90 % ($k = 1,3$).

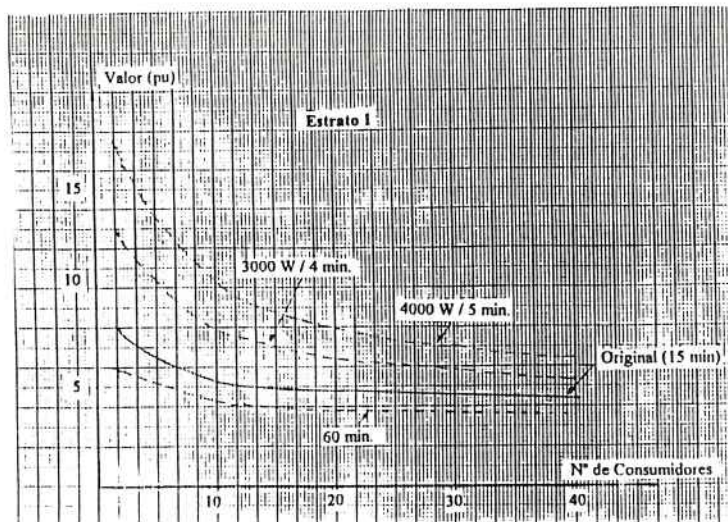


Figura 5-2 (a) Demanda máxima diversificada - Estrato 1

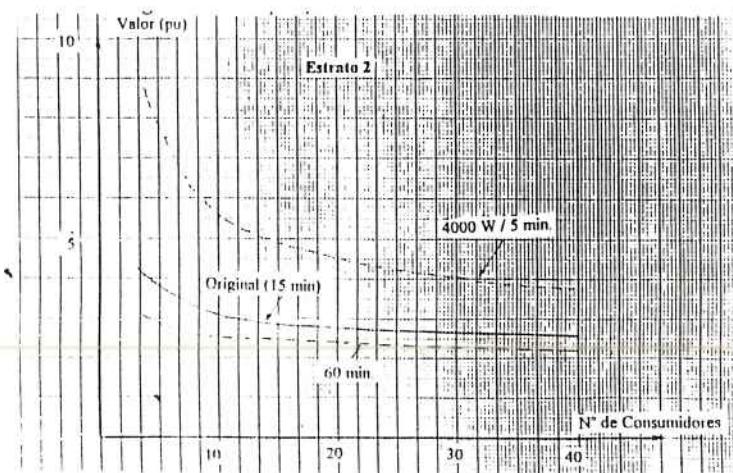


Figura 5-2 (b) Demanda máxima diversificada - Estrato 2

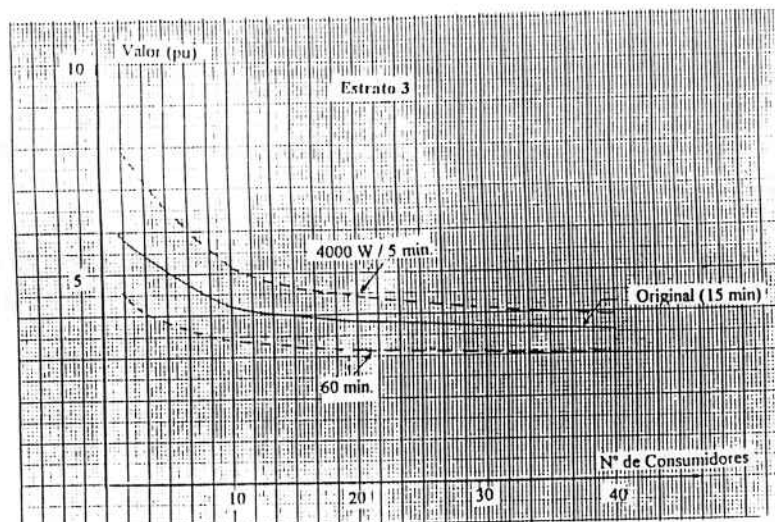


Figura 5-2 (c) Demanda máxima diversificada - Estrato 3

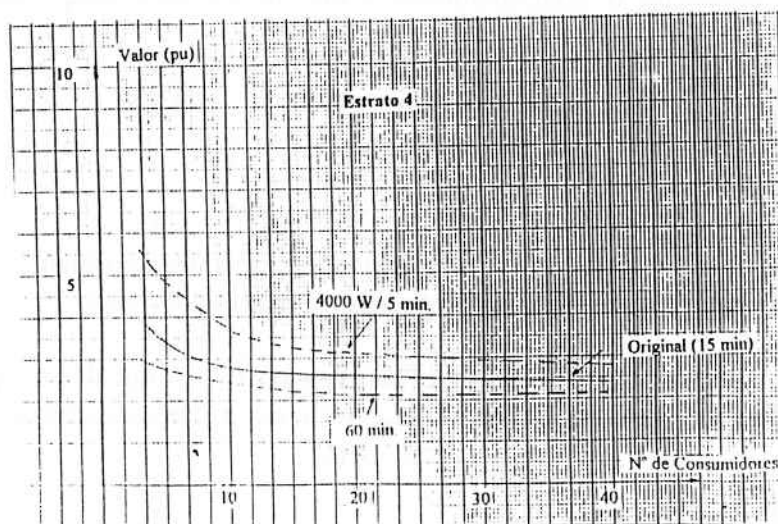


Figura 5-2 (d) Demanda máxima diversificada - Estrato 4

6. PERDA DE VIDA EM TRANSFORMADORES

Neste ítem é abordado o cálculo de perda de vida útil em transformadores considerando as curvas de cargas diárias medidas em campo.

Considera-se o cálculo da perda de vida em transformadores através de suas curvas de carga diárias e também através de curvas de cargas estratificadas, que se baseiam nas curvas da média e do desvio padrão do transformador de distribuição.

Investiga-se, também, a influência do truncamento dos extremos e verifica-se, ainda, neste ítem, a perda de vida para a curva típica do transformador.

6.1 Equações Térmicas

As principais equações que descrevem o comportamento térmico de um transformador são aqui reproduzidas.

A equação a seguir apresenta o relacionamento entre as diversas temperaturas de relevância ao fenômeno.

$$\theta_{hs} = \theta_a + \theta_o + \theta_g \quad (6-1)$$

θ_{hs} = temperatura do Ponto Quente, °C

θ_a = temperatura ambiente, °C

θ_o = elevação da temperatura máxima do óleo sobre a temperatura ambiente, °C

θ_g = elevação da temperatura do Ponto Quente sobre a máxima do óleo.

As equações básicas que nortearam o desenvolvimento do programa de computação utilizado neste trabalho, que simula a perda de vida em transformadores, são descritas a seguir [7].

$$\theta_o = \theta_{oi} + (\theta_{ou} - \theta_{oi})(1 - e^{-t/Tau}) \quad (6-2)$$

θ_o = elevação da máxima temperatura do óleo sobre a ambiente, °C

θ_{oi} = elevação na máxima temperatura do óleo no instante inicial ($t = 0$), °C

θ_{ou} = elevação da máxima temperatura do óleo de regime para a carga aplicada, °C

Tau = constante de tempo térmica do transformador, para o intervalo θ_{oi} a θ_{ou} , em horas.

Além disso:

$$\theta_g = \theta_{gf} (C k^2)^n, \quad (6-3), \text{ onde:}$$

θ_g = elevação da temperatura do Ponto Quente sobre a temperatura do óleo, em °C

θ_{gf} = elevação da temperatura do Ponto Quente em relação à temperatura do óleo, para carga nominal, em °C

C = fator que leva em conta a variação da resistência do enrolamento, dado por r/r_0 (relação da resistência do enrolamento à temperatura θ sobre a resistência na temperatura θ_0)

$k = S/S_{nom}$, carga (S) em p.u. da nominal (S_{nom}) aplicada ao transformador

n = expoente cujo valor varia entre 0,8 a 1,0.

6.2 Simulações efetuadas

O programa utilizado neste trabalho foi elaborado para utilizar curvas de demandas com intervalos de integração de 5 minutos, isto é, as mesmas curvas que nortearam a determinação dos fatores de coincidências de chuveiros.

Neste trabalho, inicialmente foi selecionado um transformador contendo medições de curvas diárias de 5 minutos, contendo 21 dias de medições ininterruptas. A energia média mensal deste transformador foi de 15754 kWh, o que equivale a uma demanda média de 21,88 kW.

Procede-se, então, comparações entre os resultados utilizando-se dois processos distintos. No primeiro processo consideram-se as curvas de médias e de desvios padrão, conforme metodologia desenvolvida na referência [32]. No segundo processo são utilizadas as curvas diárias calculando-se a perda de vida para cada um dos 21 dias medidos, para a seguir calcular a perda de vida do transformador através da média das perdas de vidas diárias individuais.

Enfatiza-se que em ambos os processos utiliza-se uma única curva diária de temperatura ambiente (curva com probabilidade de 50%), desconsiderando-se a curva do desvio padrão das temperaturas.

As curvas estratificadas utilizadas tem probabilidade de ocorrência de 10 % com excessão das curvas de 2,5 % e de 97,5 % que apresentam 5 % de probabilidade cada uma. A obtenção destas curvas é feita através da curva do transformador média (M) e dos desvios padrão (DP), sendo calculadas por :

Curva $P\%$ = $M + k DP$, onde k é o valor normalizado, obtido em tabelas da curva de Gauss.

Considerando que a curva de Gauss tem limite que vai de $-\infty$ a $+\infty$ e que isto fisicamente não ocorre, procurou-se estudar um truncamento adequado desta curva. Para análise do efeito do truncamento foi efetuado o cálculo da perda de vida dia a dia (curva de carga diária).

a) Cálculo com as curvas diárias individualmente.

Na tabela 6-1 apresentam-se as perdas de vida (% / ano) para cada uma das curvas diárias de carga, considerando-se transformadores de diversas potências nominais. Em todos os casos as curvas diárias, em kVA, foram mantidas modificando-se apenas a potência nominal do transformador. Para normalizar os resultados, os valores das

potências nominais do transformador foram divididos pela potência média da curva de carga do transformador, que é de 21,88 kW.

Tabela 6-1 Perdas de vida (% / ano) com curvas de cargas diárias

Dia	Potência Nominal (MVA / p.u.)			
	30/1,38	45/2,06	60/2,75	90/4,12
1	0,5415	0,01089	0,00341	0,00166
2	2,3385	0,01569	0,00377	0,00169
3	0,1626	0,00827	0,00313	0,00163
4	0,3539	0,01056	0,00345	0,00168
5	0,9051	0,01294	0,00361	0,00168
6	0,9445	0,01574	0,00417	0,00181
7	0,3894	0,01024	0,00336	0,00166
8	2,5082	0,02149	0,00471	0,00187
9	1,3934	0,01784	0,00435	0,00182
10	1,6554	0,01315	0,00359	0,00169
11	0,4289	0,01106	0,00348	0,00168
12	1,1972	0,01697	0,00428	0,00181
13	2,443	0,02091	0,00477	0,00191
14	0,9433	0,01499	0,004	0,00176
15	3,5252	0,02196	0,00468	0,00185
16	0,3083	0,00958	0,00326	0,00164
17	0,6284	0,01241	0,00369	0,00172
18	0,56	0,01211	0,00359	0,00169
19	0,767	0,01372	0,00386	0,00175
20	0,3385	0,01003	0,0034	0,00169
21	0,8314	0,01616	0,00441	0,00188
Média	1,103	0,01412	0,00385	0,00174

b) Cálculo utilizando as curvas de carga da média e dos desvios.

Na tabela 6-2 são apresentados os resultados utilizando as curvas estratificadas.

A última curva (97,5 %) conduz a maior parte da perda de vida do transformador, o que levou a necessidade de se averiguar o adequado truncamento da função (curva de Gauss), visto que no caso real a carga não varia de $-\infty$ a $+\infty$.

Através da comparação de cada uma das curvas diárias com a curva (M + 2 DP) e com a curva (M - 2 DP) verificou-se que o truncamento das curvas poderia ser feito no que ultrapassasse a 98 % e no que fosse inferior a 2 %. Na figura 6-1 é mostrada uma das poucas curvas que teve ponto fora da faixa entre (M + 2 DP) e (M - 2 DP). Nota-se que embora possam existir picos acima do truncamento, pode-se inferir que o truncamento não influi nos resultados. Na tabela 6-3 são apresentados os resultados de perda de vida considerando o referido truncamento.

Desta forma recomenda-se que o cálculo seja feito utilizando-se as curvas estratificadas através de média e desvios padrão, considerando-se o truncamento dos dois extremos (acima de +2 DP e abaixo de -2 DP).

A curva que representava o último intervalo, de 95 a 100 %, com probabilidade original de 5 % de ocorrência, foi então substituída pela curva representativa do intervalo de 95 a 98 %, utilizando $k=1,81$ ($p=96,5\%$), e com 3 % de frequência de ocorrência.

Analogamente o primeiro intervalo de 0 a 5 %, passou a ser representado pelo intervalo 2 a 5 %, com $k= - 1,81$ ($p= 3,5\%$), e com 3 % de frequência de ocorrência.

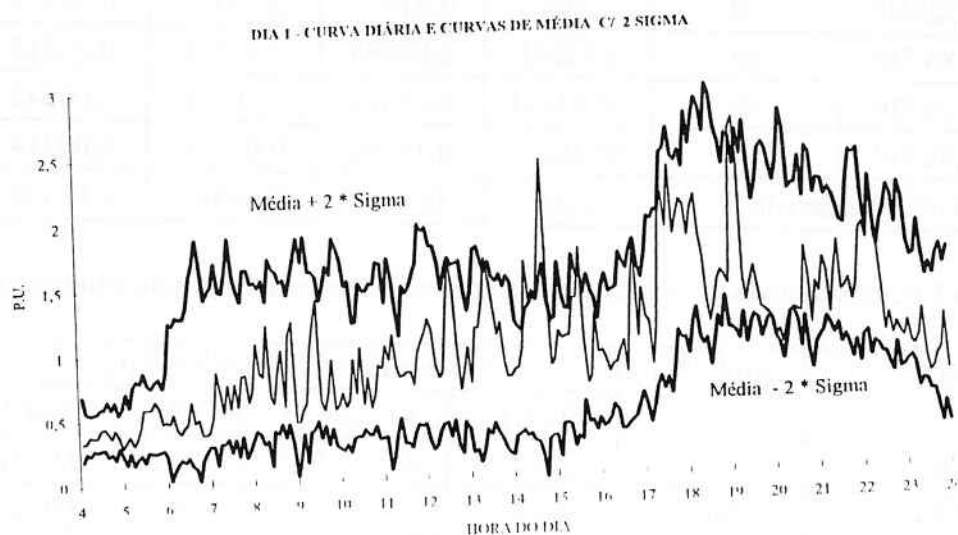


Figura 6-1 Comparação entre uma curva diária com a faixa $M+2 DP$ e $M-2 DP$

Tabela 6-2 Perdas de vida (% / ano) com curvas estratificadas

Estrato	Probab. (%)	Potência Nominal (MVA / p.u.)			
		30/1,38	45/2,06	60/2,75	90/4,12
M-1,96 DP	2,5	0,00585	0,00195	0,00142	0,00115
M-1,28 DP	10	0,01779	0,00303	0,00179	0,00127
M-0,84 DP	20	0,04251	0,00434	0,00216	0,00138
M-0,525 DP	30	0,08479	0,00581	0,00252	0,00148
M-0,255 DP	40	0,158	0,00765	0,00292	0,00157
M	50	0,29854	0,01011	0,00338	0,00167
M+0,255DP	60	0,57618	0,01363	0,00397	0,00179
M+0,525DP	70	1,1947	0,01907	0,00475	0,00193
M+0,84 DP	80	2,91051	0,02894	0,00595	0,00212
M+1,28 DP	90	10,83091	0,05422	0,00838	0,00245
M+1,96 DP	97,5	95,36233	0,15742	0,01516	0,00314
Total Ponderado		6,38	0,0226	0,00441	0,00178

Tabela 6-3 Perdas de vida (% / ano) dos estratos extremos considerando truncamento

Estrato	prob.(%)	Potência Nominal (MVA / p.u.)			
		30/1,38	45/2,06	60/2,75	90/4,12
M-1,81 DP	3,5	0,00728	0,00213	0,00148	0,00117
M+1,81 DP	96,5	58,2211	0,12121	0,01322	0,00296
Total Ponderado		3,5	0,0191	0,00419	0,00176

c) Cálculo pela curva típica

Uma investigação adicional foi feita procurando-se basear o cálculo na curva típica, ou seja aquela curva diária real que mais se aproxima da curva média.

Para se determinar a curva típica foi calculado para cada curva diária um índice (I1) igual a somatória dos quadrados das diferenças entre os pontos desta curva diária e os correspondentes pontos da curva média. Alternativamente calculou-se o índice I2, igual a somatória dos módulos da diferença entre os pontos da curva diária e a curva média. A curva diária de menor valor I1 ou I2 é a que mais se aproxima da média.

Verificou-se que os menores índices (I1 ou I2) foram obtidos para o dia 16.

Na tabela 6-4 são apresentados os valores obtidos com todos os métodos de cálculo:

Tabela 6-4 Comparação entre os vários processos incluindo a curva típica

Potência Nominal (p.u.)	Perda de Vida anual (%)			
	s/trunc.	c/trunc.	curvas diárias	curva do dia 16
1,38	6,38	3,5	1,103	0,3083
2,06	0,0226	0,0191	0,01412	0,00958
2,75	0,00441	0,00419	0,00385	0,00326
4,12	0,00178	0,00176	0,00176	0,00164

d) Comparações entre os resultados

Na figura 6-2 são apresentados os valores comparativos com os vários procedimentos de cálculos:

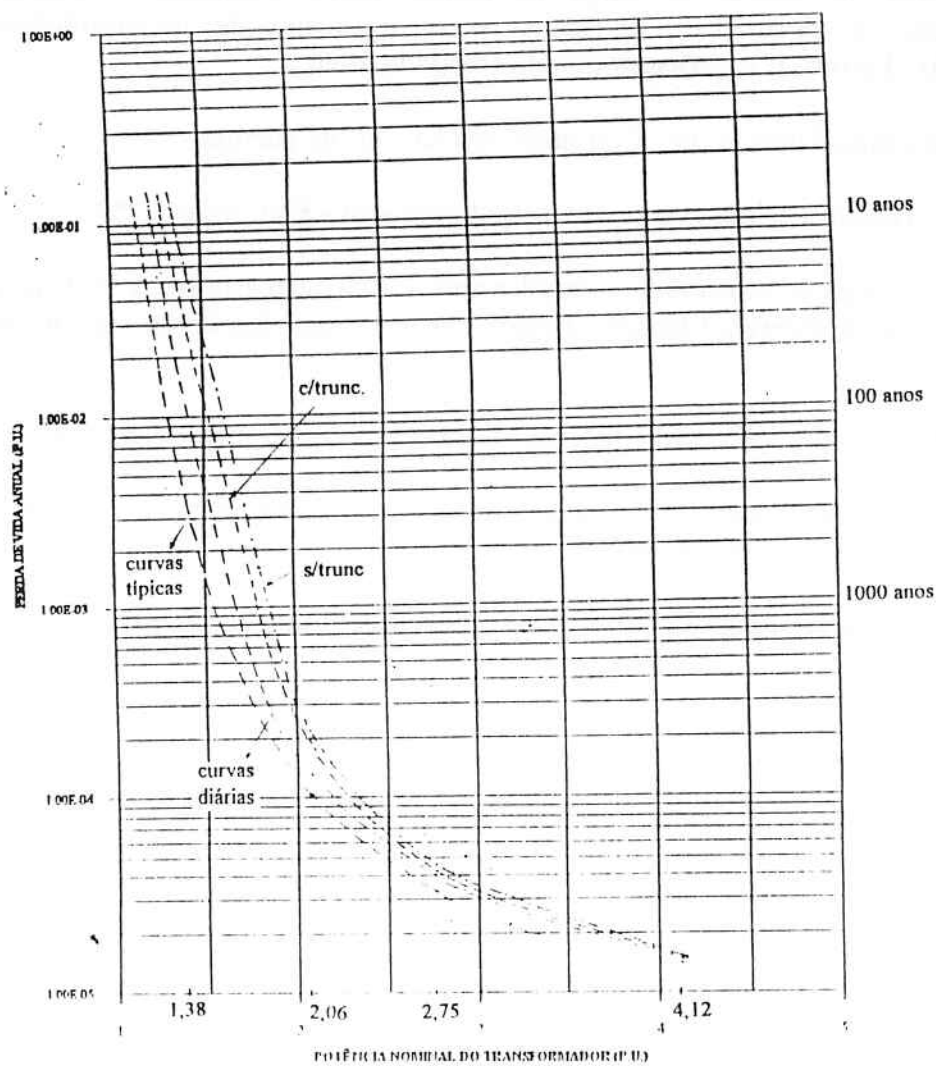


Figura 6-2 Perda de vida - Processos comparativos

Pode-se observar, comparando-se os resultados que, na faixa onde estão estabelecidos os critérios de seleção de transformadores (10^{-1} a 10^{-3} ou seja de 10 a 1000 anos de vida) as curvas apresentam resultados parecidos. Na tabela 6-5 é ilustrado numericamente este fato.

Tabela 6-5 - Potência do transformador para se ter vida útil indicada na coluna 1

Perda de Vida estimada (anos)	Potência do transformador min/max (p.u.)
10	1,15/1,38
100	1,31/1,62
1.000	1,53/1,84

BIBLIOGRAFIA

[1] Utilização de curvas de carga de consumidores residenciais medidas para determinação de diversidade de carga, e carregamento de transformadores de distribuição - Ferrari, E.L. - Dissertação de Mestrado 1996.

[2] Jorge Wilhelm Consultores - Consumos residenciais de energia.

[3] Procel - Pesquisa de posse e uso de eletrodomésticos - Eletrobras, 1989.

[4] Curva de carga de consumidores residenciais - Avaliação estatística -XII Seminário de Distribuição de Energia Elétrica - Jardini, J.A. e outros - Recife 16 a 21 de Outubro de 1994.

[5] CEMIG - Energia solar para aquecimento de água - B. Horizonte, Junho de 1993.

[6] Política de carregamento dos transformadores de distribuição - Dissertação de mestrado, Se Un Ahn, EPUSP 1993.

[7] IEC 354, Loading guide for oil-imersed power Transformers, 1991.

BOLETINS TÉCNICOS - TEXTOS PUBLICADOS

- BT/PEA/9301 - Alguns Aspectos do Problema de Planejamento de Sistemas de Transmissão sob Incertezas - CARLOS MARCIO VIEIRA TAHAN, ERNESTO JOÃO ROBBA
- BT/PEA/9302 - Vibrações em Motores Elétricos Provocadas por Forças Magnéticas - ORLANDO SILVIO LOBOSCO, HENRIQUE PRADO ALVAREZ
- BT/PEA/9303 - Corrente Contínua em Alta Tensão: Aplicação de Equipamentos Elétricos e Modelos para Análises de Confiabilidade - LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9504 - Automação e Informatização Aplicadas a Controle e Supervisão de Processos de Pesagem - EVALDO ARAGÃO FARQUI, EDUARDO MÁRIO DIAS
- BT/PEA/9505 - Modernização e Reabilitação de Usinas Hidrelétricas - DJALMA CASELATO, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/9506 - Estudo do Campo Elétrico Provocado por Linhas de Transmissão em Corrente Alternada - CELSO PEREIRA BRAZ, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9507 - Aspectos Sobre Processos Automatizados de Pesagem Rodoferroviária: Uma Proposta de Modernização de Postos em Operação - SERGIO LUIZ PEREIRA, CÍCERO COUTO DE MORAES
- BT/PEA/9508 - Usinas Hidrelétricas em Rotação Ajustável: Novas Premissas para o Planejamento Energético - MARCO ANTONIO SAIDEL, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9509 - Desenvolvimento de um Sistema de Automação de Subestações pela Integração de Módulos de Software e Hardware Existentes no Mercado Brasileiro - L. C. MAGRINI, J. A. JARDINI, S. COPELIOVITCH, N. KABA FILHO
- BT/PEA/9510 - Proposta de um Modelo para Estudos de Aplicação de Compensadores Estáticos em Sistemas de Potência - JOSÉ TOSHIYUKI HONDA, LUIS CERA ZANETTA JÚNIOR
- BT/PEA/9511 - Metodologia e Testes para Redução das Distâncias Elétricas entre Fases de Barramentos de Subestações de 138kV Abrigadas, ANDRÉ NUNES SOUZA, ORLANDO SILVIO LOBOSCO
- BT/PEA/9512 - Avaliação da Severidade da Poluição para o Dimensionamento da Isolação das Redes Elétricas - ARNALDO G. KANASHIRO, GERALDO F. BURANI
- BT/PEA/9513 - Processos Auto-Adaptativos para Cálculo de Campos Eletromagnéticos pelo Método dos Elementos Finitos - LUIZ LEBENSZTAJN, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9514 - Investigação Experimental sobre os Arcos Sustentados em Sistemas Elétricos de Baixa Tensão - FRANCISCO H. KAMEYAMA, GERALDO F. BURANI
- BT/PEA/9515 - Fast Voltage Compensation: A Mean to Improve the Quality of Energy Supply - H. ARANGO, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9516 - Modelo Avançado para Planejamento de Sistemas Energéticos Integrados Usando Recursos Renováveis - LUIZ ANTONIO ROSSI, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9601 - Metodologias para Planejamento de Sistemas de Distribuição: Estado-da-Arte e Aplicações - PAULO ROBERTO NJAIM, CARLOS MARCIO VIEIRA TAHAN
- BT/PEA/9602 - Integração de Relés Digitais em Sistemas de Automação de Subestação - JERÔNIMO CAMILO SOARES JR., JOSÉ A. JARDINI, LUIZ C. MAGRINI
- BT/PEA/9603 - Paradigma de Planejamento sob Incertezas - Aplicação ao Planejamento dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica - ALBERTO BIANCHI JUNIOR, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9604 - Um Sistema de Controle de Velocidade para Motor de Indução Trifásico - CELSO KAZUMI NAKAHARADA, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/9605 - Controle Vetorial de Motores de Indução, Independente das Alterações de Parâmetros da Máquina - NERY DE OLIVEIRA JÚNIOR, WALDIR PÓ
- BT/PEA/9606 - Compactação de Subestações de 145 kV Através da Redução das Distâncias entre Fases - GERVASIO LUIZ DE CASTRO NETO, ORLANDO SILVIO LOBOSCO
- BT/PEA/9607 - Curvas de Carga de Consumidores Industriais - Agregação com Outras Cargas - RONALDO PEDRO CASOLARI, JOSÉ ANTONIO JARDINI

