

Capítulo IX

Carregamento de transformadores

Por Manuel Luis Barreira Martinez*

A tipificação dos transformadores contempla três agrupamentos distintos, o que em tese significa três diferentes tipos de curvas diárias de carregamento. Estes comportamentos, em maior ou menor escala, impactam o perfil de perdas em carga dos transformadores e, por conseguinte, das redes.

O ponto em questão está no ganho que se obtém ao se projetar para estas condições. Também não é só o projeto dos transformadores que deve ser levado em conta e sim como as políticas de aquisição, estoque e manutenção trabalham com estes diferentes projetos.

De modo a simplificar os procedimentos, é usual adotar uma política de projeto que contemple uma única unidade apta a atender economicamente as três condições de carregamento - clientes.

Neste contexto, as figuras 1 a 6 apresentam a distribuição do valor mais provável das médias e seus limites para os consumos residencial, comercial, industrial, rural, outros e por transformador, respectivamente. Os dados, como mencionado, foram retirados das tabelas associadas a cada uma das distribuições que modelam as características de consumo dos clientes conectados aos transformadores monofásicos objeto do estudo.

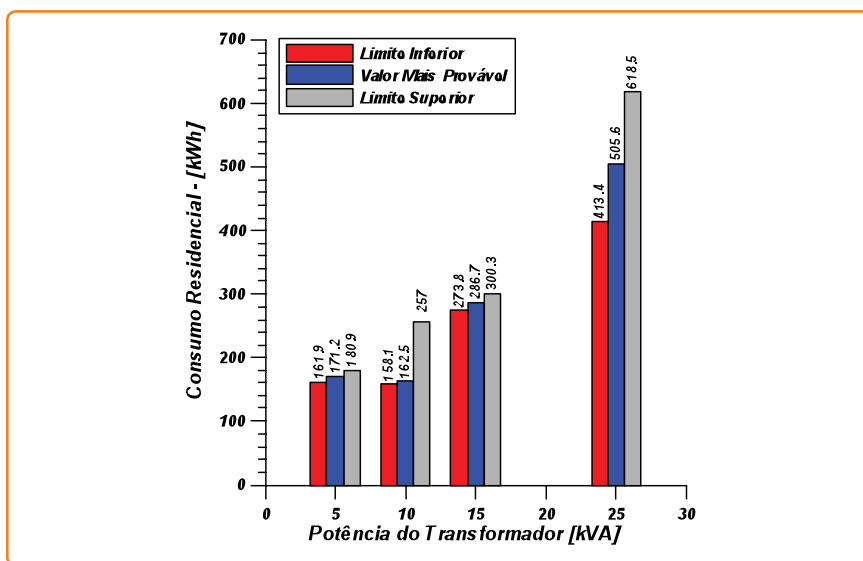


Figura 1 - Limites e valor mais provável para consumo residencial.

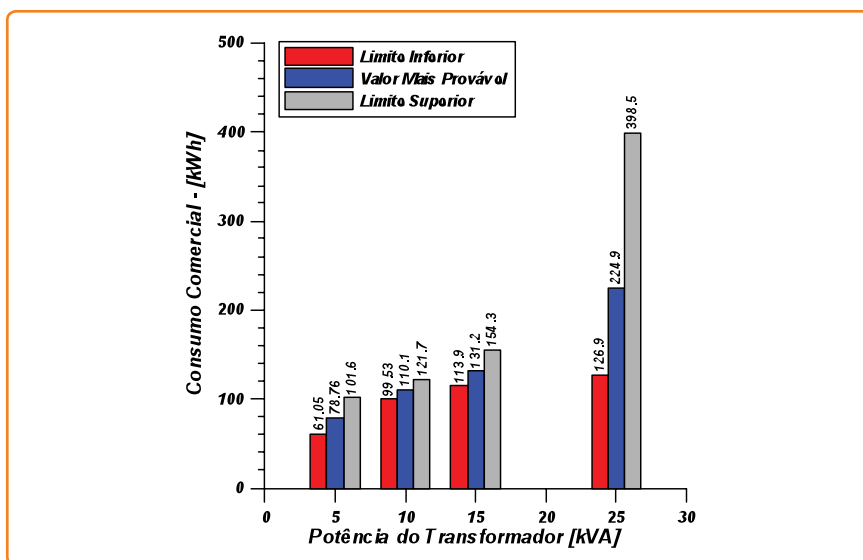


Figura 2 - Limites e valor mais provável para consumo comercial.

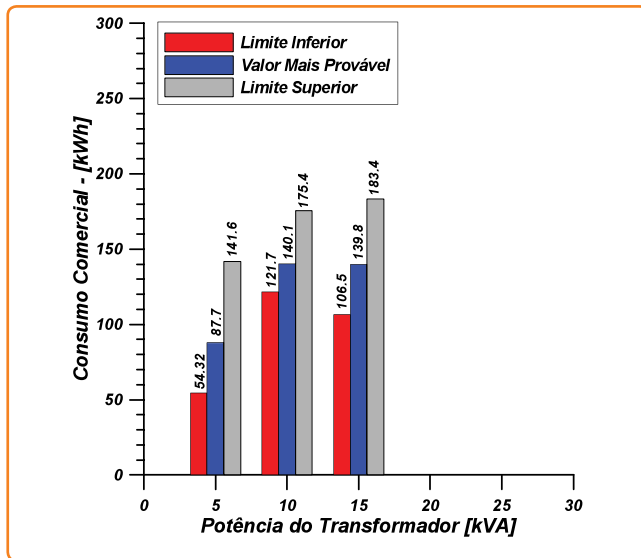


Figura 3 - Limites e valor mais provável para consumo industrial.

Com respeito ao consumo residencial, observa-se na Figura 1 a existência de superposições parciais dos limites de confiança do valor mais provável “médio” para os transformadores de 5 kVA, 10 kVA e 15 kVA. Isto implica a conveniência em se reavaliar o agrupamento destes transformadores. Como a semelhança entre o consumo dos transformadores de 5 kVA e 10 kVA é aparentemente mais evidente, é possível considerar um agrupamento de potência em três níveis, ou seja: 5 kVA–10 kVA, 15 kVA e 25 kVA.

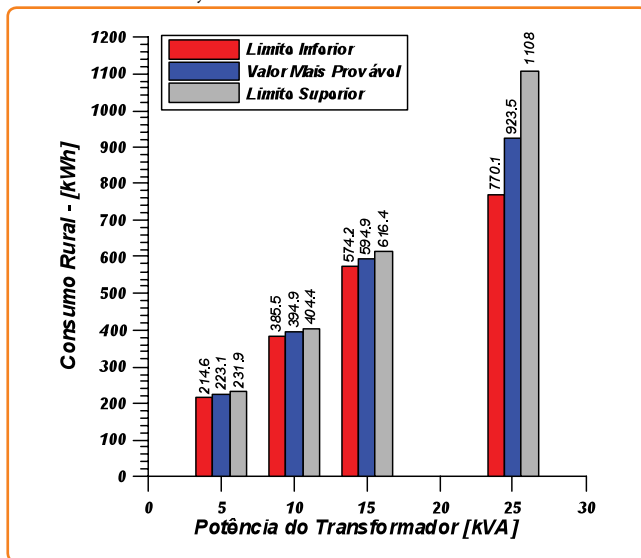


Figura 4 - Limites e valor mais provável para consumo rural.

A Figura 2, relativa ao consumo comercial, mostra a existência de superposições dos limites de confiança do valor mais provável “médio” para todos os transformadores. Isto implica a impossibilidade de obter uma divisão adequada para os níveis de potência, ou, em última análise, a necessidade de considerar um único agrupamento.

Observa-se, na Figura 4, a inexistência de superposições dos limites de confiança do valor mais provável “médio” para o consumo rural, que constitui a maioria dos consumidores supridos por transformadores monofásicos. Isto implica a possibilidade de adotar

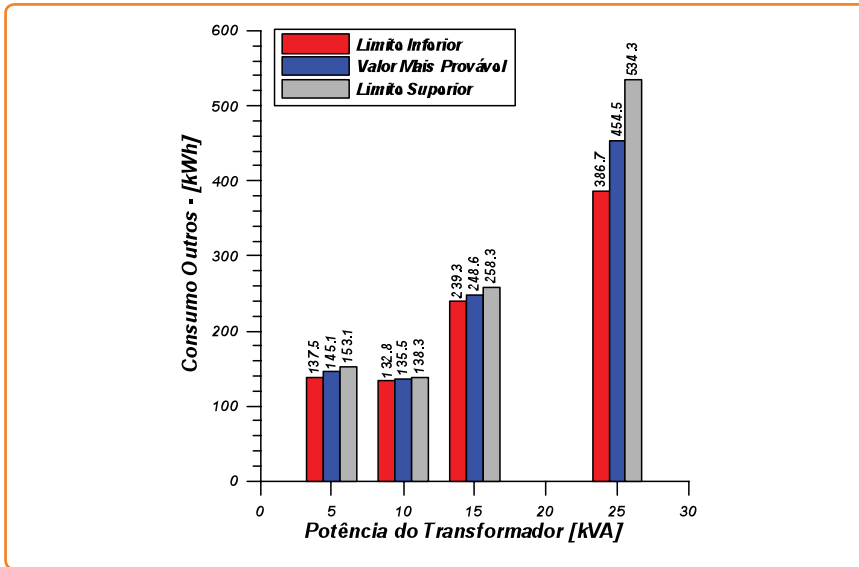


Figura 5 – Limites e valor mais provável para consumo outros

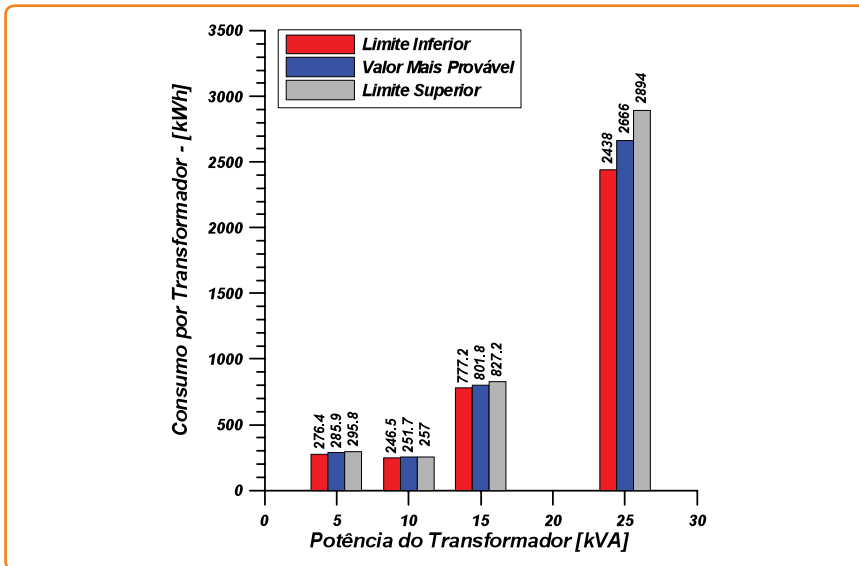


Figura 6 - Limites e valor mais provável para a energia suprida pelos transformadores.

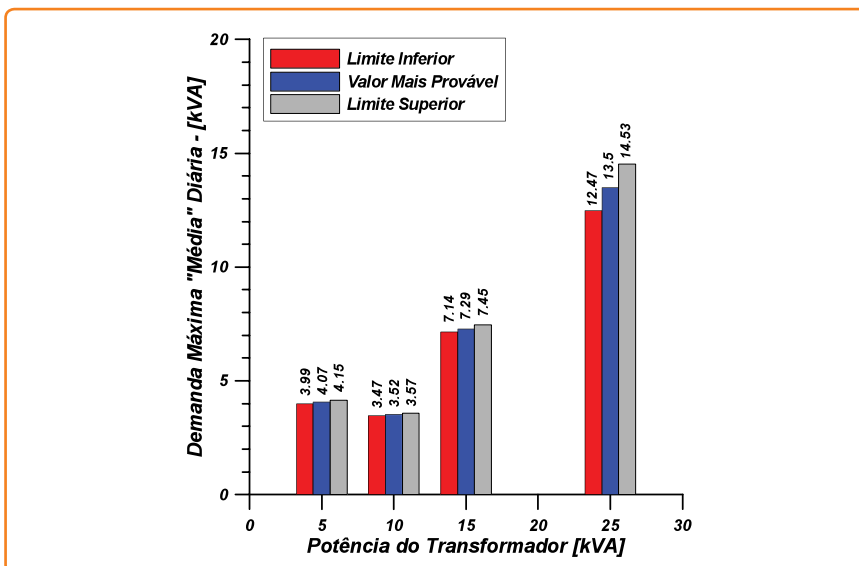


Figura 7 - Limites e valor mais provável para a demanda máxima fornecida pelos transformadores.

uma divisão do conjunto de transformadores em quatro níveis de potência como usual.

No entanto, conforme mostra a figura 5, existem superposições dos limites de confiança do valor mais provável “médio” para o consumo outros relativos aos transformadores de 5 kVA e 10 kVA. Isto implica uma possível divisão do agrupamento de transformadores em três níveis de potência, ou seja, 5 kVA – 10 kVA, 15 kVA e 25 kVA.

Quando se considera o universo dos transformadores monofásicos (figura 6) como um todo, é possível observar a ausência de superposição dos limites de confiança do valor mais provável “médio” do consumo. Mesmo considerando a proximidade entre as médias assume-se como adequado dividir a classe de transformadores monofásicos em suas respectivas potências nominais. Uma vez que o consumo médio por transformador de 10 kVA é inferior ao consumo médio por transformador de 5 kVA, essa decisão precisa ser confirmada por meio de uma análise que considere as demandas médias por unidade, o que pode comprometer essa avaliação.

As mesmas técnicas podem ser aplicadas para a demanda máxima dos transformadores obtidas a partir das relações características entre a "Demanda versus Energia Consumida". A Figura 7 mostra os valores da demanda máxima média diária para o conjunto de transformadores monofásicos avaliados, onde se observa que o carregamento médio máximo dos transformadores de 10 kVA é inferior ao de 5 kVA, fato que pode indicar uma subutilização dos ativos, uma vez que a lógica indica que transformadores com maior potência nominal devem ser mais carregados.

A equação 1 pode ser utilizada para avaliar a expectativa de vida útil técnica – n , em anos, de um transformador, em termos da taxa de crescimento de carga anual – k , da potência nominal – S_{NTR} e do fator de carregamento máximo – F_S .

$$n = \frac{1}{\ln(1 + k)} \ln \frac{F_S \times S_{NTR}}{D_{Máxima}} \quad (1)$$

Assumindo uma relação entre a potência nominal e a demanda máxima igual a 0,50, um fator de carregamento máximo de 1,2 e uma taxa de crescimento anual de carga de 4%, a equação 1 indica uma expectativa de vida de aproximadamente 22 anos, compatível e adequada para os transformadores de 15 kVA e 25 kVA, conforme Figura 7. No entanto, inadequada para os transformadores de 10 kVA, que demandariam aproximadamente 31 anos para alcançar as mesmas condições de carregamento final assumidas, período superior ao seu valor contábil, normalmente de 15 anos. Neste mesmo contexto, os transformadores de 5 kVA, em média, possuem vida útil remanescente de aproximadamente dez anos.

A adequação ou não destes números, obviamente, depende das políticas assumidas pelas empresas concessionárias e, por certo, da taxa de crescimento da carga, que se forem inferiores ao padrão de 4% conduzem a outros resultados nos quais os ativos perdem seu valor contábil e não atingem seu carregamento nominal máximo de projeto.

A tabela 1 fornece uma avaliação estatística para as condições de demandas diurna e noturna dos transformadores monofásicos avaliados. Os resultados foram retirados do melhor modelo estatístico para os dados fornecidos e contemplam os valores de demanda máxima e porcentagem das unidades com carregamento inferior a estas demandas.

Deste modo, para os transformadores de 5 kVA, 23% das unidades apresentam, em média, demanda máxima diurna superior a potência nominal. Em termos de demanda máxima noturna, este nível sobe para 28%. Com relação a um carregamento de 1,2 vezes a potência nominal, as demandas máximas diurnas e noturnas são superadas em 14% e 18% dos casos, respectivamente. Finalmente, com

TABELA 1 - MODELO ESTADÍSTICO PARA A DEMANDA MÁXIMA DOS TRANSFORMADORES AVALIADOS

CARGA [P.U]	DEMANDA							
	DIURNA [%]				NOTURNA [%]			
	5	10	15	25	5	10	15	25
<0,40	<15	<41	<52	<41	<10	<44	<60	<40
<0,70	<52	<66	<80	<80	<44	<68	<80	<79
<1,00	<77	<82	<91	<97	<72	<83	<90	<96
<1,20	<86	<88	<95	<99	<82	<90	<93	<99
<1,40	<91	<93	<96	<100	<90	<93	<95	<100

relação a um carregamento de 1,4 vezes a potência nominal, as demandas máximas diurnas e noturnas são superadas em 9% e 10% dos casos, respectivamente. Raciocínio similar pode ser aplicado aos transformadores monofásicos de 10 kVA, 15 kVA e 25 kVA.

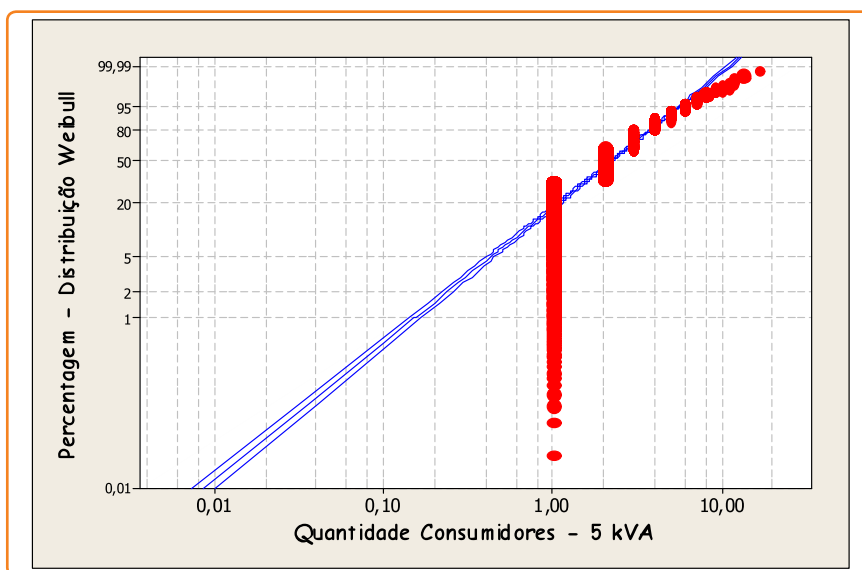
A tabela 1 também mostra que entre 41% e 44% dos transformadores de 10 kVA atendem a uma demanda máxima, diurna e noturna, respectivamente, inferior a 0,40 p.u, ou seja, 4 kVA. Esta análise confirma os pontos anteriormente levantados quanto ao carregamento dos transformadores.

Considerando que algumas análises avaliam os valores mais prováveis do carregamento por transformador, é necessário trabalhar com modelos estatísticos para a quantidade de consumidores por transformador. Deste modo, é possível comparar, dentre

outros, o consumo e a quantidade mais provável de consumidores por classe de potência obtendo-se então uma ideia de consumo mais provável “médio” por transformador.

As Figuras 8 e 9 apresentam, respectivamente, o modelo estatístico, o histograma e a curva de tendência, com base na distribuição log-logistic, para a quantidade de consumidores, ou seja, “clientes” para os transformadores de 5 kVA.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos a partir das distribuições mostradas na Figura 8. Neste caso, o valor mais provável para o número de consumidores por transformador de 5 kVA é 2,18 consumidores. Os limites estatísticos superiores e inferiores estão situados entre 0,40 e 0,45 e entre 5,33 e 5,60 consumidores, respectivamente, para os transformadores de 5 kVA.


Figura 8 - Distribuição de probabilidade para quantidade de consumidores por transformador 5 kVA.

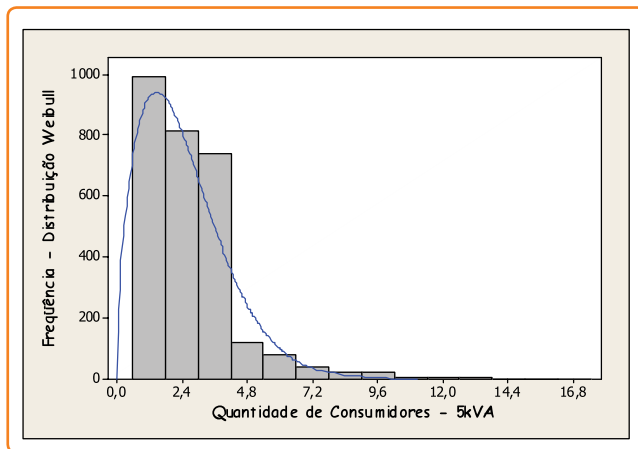


Figura 9 - Histograma e curva de tendência para quantidade de consumidores por transformador 5 kVA.

TABELA 2 - QUANTIDADE DE CLIENTES, VALORES A PARTIR DOS MODELOS ESTADÍSTICOS

	TRANSFORMADORES 5 KVA		
	Média	Limite Mínimo	Limite Máximo
1%	0,15	0,14	0,17
5%	0,42	0,40	0,45
50%	2,18	2,12	2,24
95%	5,46	5,33	5,60
99%	7,16	6,96	7,37

Estes procedimentos e análises podem ser aplicados para as demais potências de transformadores existentes nos bancos de dados, sendo os resultados apresentados na Figura 10.

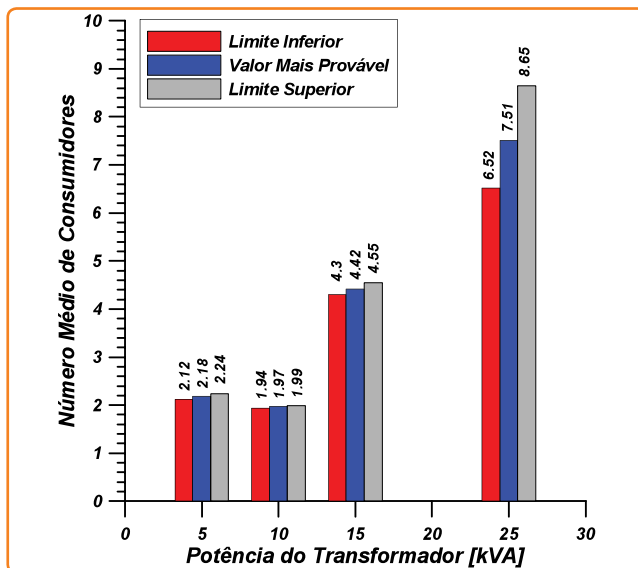


Figura 10 - Limites e valor mais provável para o número médio dos consumidores dos transformadores.

A tabela 3 mostra o consumo mais provável – “médio” e o número de consumidores mais provável – “médio” por potência de transformadores avaliados. A partir destes valores é possível, através da equação 2, calcular o “consumo médio por cliente” para cada um dos níveis de potência nominal dos transformadores, conforme mostrado na Figura 11.

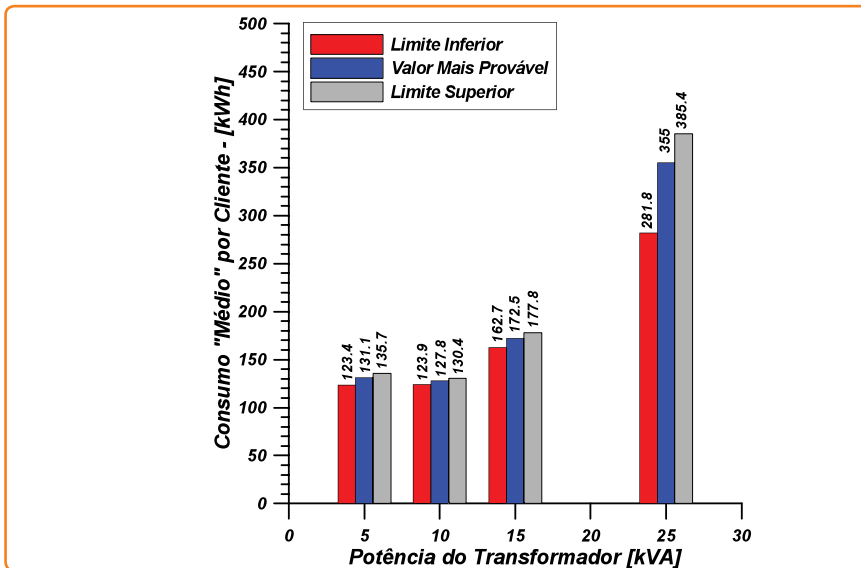
TABELA 3 - CONSUMO E NÚMERO "MÉDIO" DE CLIENTES POR TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

STR [kVA]	CONSUMO "MÉDIO" [kWh]			NÚMERO "MÉDIO" DE CONSUMIDORES		
	Média	Limite Mínimo	Limite Máximo	Média	Limite Mínimo	Limite Máximo
5	285,9	276,4	295,7	2,18	2,12	2,24
10	251,7	246,5	257,0	1,97	1,94	1,99
15	762,6	740,2	785,8	4,42	4,30	4,55
25	2666,0	2437,7	2894,4	7,51	6,52	8,65

$$\bar{C}_C = \frac{\bar{C}_{TR}}{N_{C-TR}} \quad (2)$$

Em que:

- \bar{C}_C = Consumo mais provável "médio" por cliente;
- \bar{C}_{TR} = Consumo mais provável "médio" por transformador;
- N_{C-TR} = Número mais provável "médio" de clientes por Transformador.


Figura 11 - Consumo mais provável "médio" por cliente – consumidor.

Nota: Os valores negativos que por ventura ocorrem nas presentes análises não apresentam significado físico. Nestes casos, é necessário realizar um tratamento dos dados de entrada considerando, de forma criteriosa, a exclusão dos valores de consumo mínimo da amostra, que de forma subsequente também deve ser submetida uma avaliação através da técnica de Box - Plot.

TABELA 4 - CONSUMO E DEMANDA MÁXIMA "MÉDIA" POR TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

STR [kVA]	CONSUMO "MÉDIO" [kWh]			DEMANDA "MÉDIA" [kVA]		
	Média	Limite Mínimo	Limite Máximo	Média	Limite Mínimo	Limite Máximo
5	285,9	276,4	295,7	3,77	3,70	3,85
10	251,7	246,5	257,0	4,98	4,57	5,39
15	762,6	740,2	785,8	5,81	5,65	5,96
25	2666,0	2437,7	2894,4	11,48	10,26	12,70

A Figura 11 mostra que, em termos de consumo mais provável "médio", é possível agrupar os consumidores conectados aos transformadores de 5 kVA e 10 kVA em um único grupo para análise. O mesmo não pode ser realizado para os clientes conectados aos transformadores de 15 kVA e 25 kVA.

Finalmente, com base em todas as análises realizadas, é possível obter os valores mostrados na tabela 4 que indicam o consumo mais provável "médio" e a demanda máxima mais provável "média" por potência de transformador.

A partir dos valores da tabela 4 é possível, através da equação 3, calcular o fator de carga médio por transformador para cada um dos níveis de potência dos transformadores monofásicos, conforme mostrado na Figura 12 para um fator de potência médio de 0,90.

$$\bar{F}_C = \frac{1}{24 \times D_M} \frac{\bar{C}_{TR}}{\bar{D}_{TR} \cos \varphi} \quad (3)$$

Em que:

- \bar{F}_C = Fator de carga mais provável "médio" por transformador;
- D_M = Número de dias do mês;
- \bar{D}_{TR} = Demanda mais provável "média" por transformador;
- $\cos \varphi$ = Fator de potência mais provável "médio" por transformador;

Considerando que a demanda média por consumidor pode ser obtida através da equação 4 que assume, uma vez que não há alternativa aparente para uma análise simplificada, a ocorrência de consumo coincidente, bem como o valor médio por transformador, como mostrado na Figura 11, é possível demonstrar que o fator de carga médio por consumidor é igual ao fator de carga médio por transformador mostrado na Figura 12.

Assim, a Figura 12 mostra que o fator de carga mais provável por transformador, ou de forma simplificada por cliente-consumidor, depende da potência nominal do transformador, bem como que não é possível agrupar os transformadores para efeitos de análise. Também é conveniente realçar que os valores obtidos nesta análise para transformadores com potência nominal inferior a 25 kVA são bem abaixo do tradicional valor de 0,50. Este fato está em acordo com o número médio de consumidores por transformador como mostrado na Figura 10.

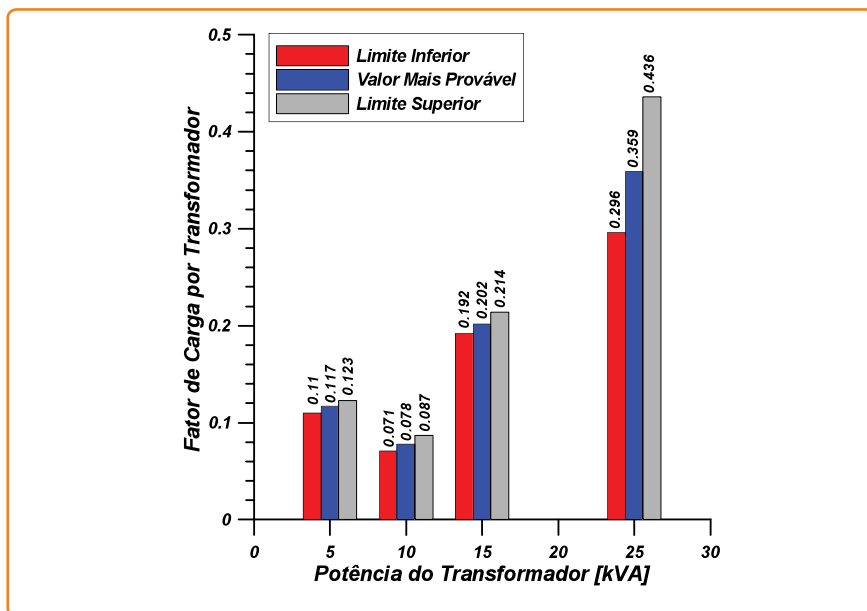


Figura 12 - Fator de carga mais provável "médio" por transformador

$$\bar{D}_C = \frac{\bar{D}_{TR}}{N_{C-TR}} \quad (4)$$

Em que:

\bar{D}_C = Demanda mais provável "média" por consumidor.

As mesmas análises podem ser realizadas para qualquer conjunto de transformadores trifásicos. O único ponto neste caso é que os desbalanços entre as fases não podem ser avaliados uma vez que os dados de consumo sempre são lançados na sua totalidade nos bancos de dados avaliados.

Manuel Luís Barreira Martinez possui graduação e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo. Atualmente, é professor associado da Universidade Federal de Itajubá. Tem experiência na área de engenharia elétrica, com ênfase em equipamentos, materiais elétricos, distribuição de energia elétrica e técnicas em alta tensão. É autor e coautor de 350 artigos em revistas e seminários, associados a trabalhos de engenharia e 45 orientações de mestrado e doutorado. Atua, principalmente, nos seguintes segmentos: métodos de ensaios, ensaios dielétricos, para-raios para sistemas de média e alta tensão e equipamentos elétricos.

CONTINUA NA PRÓXIMA EDIÇÃO

Acompanhe todos os artigos deste fascículo em www.osetoreletrico.com.br
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para redacao@atituedeeditorial.com.br