



## **Determinação do Carregamento Máximo Admissível de Transformadores de Potência Através de Curvas de Carga Características**

**Vagner Vasconcellos**  
**CPFL Piratininga**  
vagnervasco@cpfl.com.br

**Luiz Cera Zanetta Jr.**  
**PEA – USP**  
lzanetta@pea.usp.br

### **RESUMO**

No contexto atual do setor elétrico as concessionárias de distribuição, por conta da revisão tarifária, necessitam cada vez mais da máxima utilização de seus ativos. Sendo o transformador de potência o ativo de maior valor na subestação, sua utilização deve ser a máxima possível, possibilitando a maior remuneração no período de utilização. Uma das formas de otimização dos transformadores de potência é através do seu carregamento máximo admissível. O presente artigo apresenta uma metodologia que utiliza curvas de cargas características das subestações, obtidas a partir de um processo estatístico e através delas calcula-se o máximo carregamento admissível em concordância com a norma brasileira NBR-5416/97 [1].

### **PALAVRAS CHAVE**

Carregamento Máximo, Curvas de Carga, Transformador de Potência.

### **1. INTRODUÇÃO**

Componente fundamental no Sistema Elétrico, os transformadores de potência necessitam de tecnologia e acompanhamento constante a fim de manter sua confiabilidade ao longo de sua vida útil. De uma maneira geral, os Sistemas Elétricos das concessionárias de energia encontram-se com seus níveis de carregamento cada vez mais elevados, tornando essencial o conhecimento aprofundado de seus equipamentos, especialmente dos transformadores de potência, pela sua condição estratégica e custos envolvidos.

O transformador de potência é definido a partir de estudos de planejamento, levando em conta premissas de expansão do sistema elétrico. As curvas de carga são fundamentais nas análises de planejamento, em especial a determinação da demanda anual de um determinado transformador através das medições de janeiro a dezembro.

O processo utilizado para a obtenção das curvas foi o da análise de agrupamento. Essa ferramenta estatística separa as curvas de carga em grupos conforme a similaridade existente entre elas. Com base nessas curvas características foi obtido o carregamento máximo admissível dos transformadores de acordo com a norma NBR-5416/97 – Aplicação de Cargas em Transformadores de Potência – Procedimento, [1].

## 2. DEFINIÇÕES SOBRE O MÉTODO ESTATÍSTICO

Através de um software chamado R e de um desenvolvimento específico no qual se leva em conta a representatividade, dias consecutivos, demanda média e desvio padrão, são obtidas as demandas de planejamento e suas respectivas curvas características. O método pode ser visto de forma detalhada em [2].

A figura 1 a seguir mostra o cluster com as curvas agrupadas, de onde se extraiu a curva característica para os estudos dos transformadores. Neste caso, aplicando a metodologia citada na referência [2], a curva de carga característica foi extraída do cluster 2.

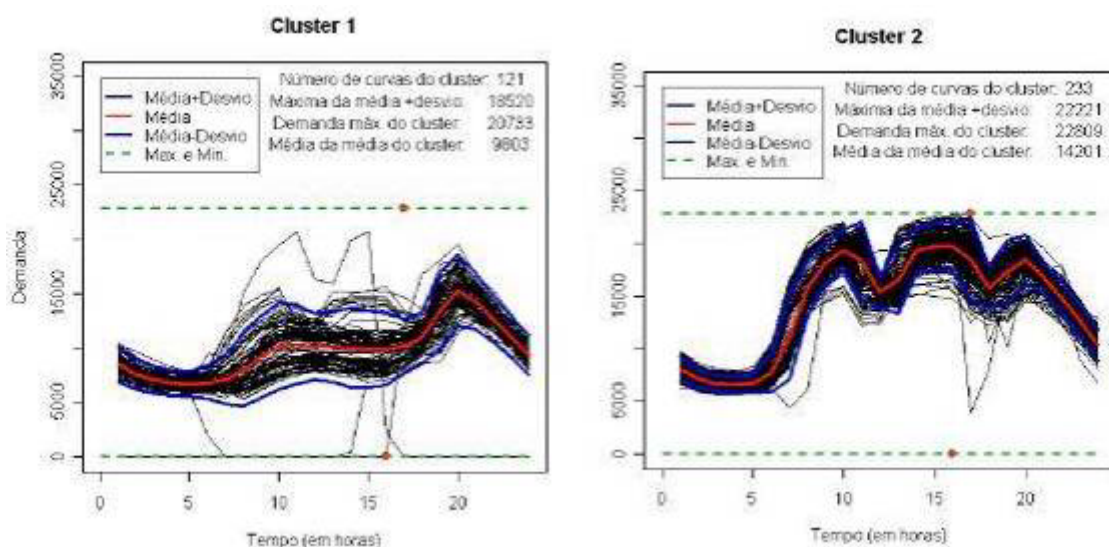


Figura 1 – Grupo de Curvas 1 e 2 da SE Franca.

Nas figuras anteriores, as curvas de carga do ano de 2005 foram divididas em 2 grupos de acordo com a similaridade e entre elas e através do processo estatístico citado anteriormente. A curva na cor vermelha representa a média das curvas do grupo, enquanto que as azuis os valores de  $\pm 1,64$  Desvio Padrão. Neste caso ilustrado na figura anterior, a curva característica foi extraída do grupo 2 através do processo estatístico descrito na referência [2].

## 3. CARREGAMENTO MÁXIMO ADMISSÍVEL

Com base nas curvas utilizadas pelo Planejamento para a expansão do Sistema Elétrico obtidas pelo método citado, foi feito um estudo em dois transformadores idênticos que apresentaram valores de demanda de planejamento muito próximos.

A curva obtida através dessa metodologia estatística torna-se uma “fotografia” da carga alimentada pelo transformador ao longo do ano. Com base nessa curva característica foi calculado o carregamento máximo admissível de acordo com a norma brasileira NBR-5416/97, [1] e mostrado que, para um valor muito próximo de demanda de planejamento, dois transformadores similares apresentam carregamentos máximos admissíveis bem diferentes à mesma temperatura ambiente.

Segundo a norma de carregamento de transformadores de potência NBR-5416/97 [1] um transformador de potência pode operar acima das condições nominais por certos períodos sem prejuízo de sua vida útil.

Certamente, tais condições dependem de uma série de aspectos como condição do óleo isolante, manutenção, histórico de falhas, etc. Os transformadores estudados neste artigo encontram-se em condições de uso adequadas no que tange aos seus planos de manutenção, condições do óleo isolante e sistemas de proteção em geral.

#### 4. TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA – DIRETRIZES DE CARREGAMENTO

Alguns tópicos que definem a normalização nacional e internacional sobre aplicação de cargas em transformadores de potência abordam questões fundamentais.

*Hottest spot winding*: (temperatura do ponto mais quente do enrolamento) designado pelas normas é a suposta temperatura máxima de um ponto do enrolamento em estudo, enquanto que a temperatura do óleo (*Top Oil*) é utilizada para conhecer os gradientes de temperatura óleo – enrolamento.

As constantes de tempo previstas na NBR-5416/97 [1] são diferentes para duas situações: para o topo do óleo é da ordem de 3 horas; e para o ponto mais quente do enrolamento menor que 15 minutos, vide figura 3 a seguir. De acordo com a norma de carregamento de transformadores NBR-5416/97, [1] a potência do transformador está associada à elevação de temperatura em relação à temperatura ambiente que os enrolamentos alcançam quando por eles circula a corrente que alimenta a carga, vide figura 2 a seguir:

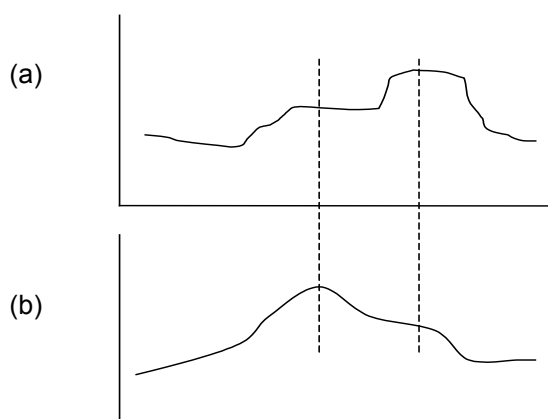


Figura 2 – (a) Carregamento Típico e (b) Temperatura Ambiente

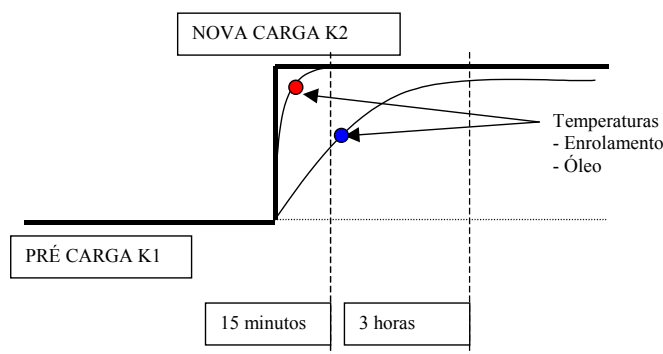


Figura 3 – Comportamento Básico de Aquecimento do Enrolamento e Óleo

Assim, quando considerarmos uma temperatura ambiente constante de 40°C e carga constante e igual à nominal, os enrolamentos do transformador estarão submetidos à elevação de temperatura especificada.

Nesta condição, considerando-se que as condições de manutenção do equipamento são adequadas (qualidade do óleo isolante, estanqueidade, integridade mecânica e elétrica, etc.), o consumo da vida útil do equipamento se resume ao envelhecimento do material isolante.

A NBR-5416/97 [1] estabelece valores de referência para a vida útil, baseada apenas no envelhecimento do papel à temperatura especificada, conforme pode ser visto na figura 3 a seguir.

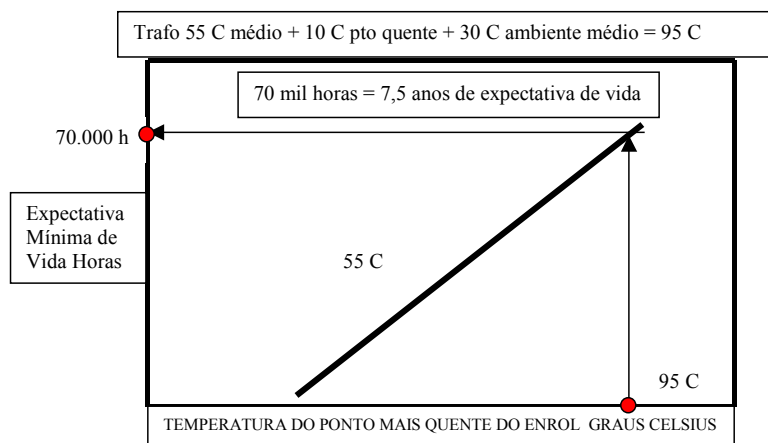


Figura 4 – Modelo Térmico Normalizado / Arrhenius

Porém, quando em operação numa subestação, tanto a temperatura ambiente quanto a curva de carga da subestação impõem condições diferentes das acima descritas, o que permitem, felizmente, o uso do transformador por períodos superiores a 7,5 anos.

Baseado nos parâmetros físicos dos equipamentos, dados do ensaio de aquecimento e uma curva de carga típica da subestação podemos calcular o máximo carregamento admissível dos transformadores em concordância com a norma NBR-5416/97 [1].

Através de algoritmos normatizados, estimamos, hora a hora, as temperaturas no chamado "ponto quente" dos enrolamentos do transformador, associando-se, a cada ciclo de carga diário, um consumo acumulado de vida útil.

Os níveis de consumo de vida esperados ou admitidos em cada condição de operação, bem como os riscos operativos associados conjuntamente, estabelecem os carregamentos liberados, que são classificados em ordem crescente de temperatura de operação e risco, em:

- Carregamento em Condições Normais de Operação,
- Carregamento Planejado Acima das Condições Normais,
- Carregamento de Emergência de Longa Duração,
- Carregamento de Emergência de Curta Duração.

Todos esses níveis de carregamento são aplicáveis para fins operativos, nos quais o consumo de vida em um ciclo diário equivale ou supera o correspondente a uma vida útil de 7,5 anos.

## 5. DETERMINAÇÃO DO CARREGAMENTO MÁXIMO ADMISSÍVEL – ESTUDO DE CASO

Uma vez que as condições operativas de um transformador de potência estejam adequadas, condições do óleo isolante, estanqueidade, manutenção, etc, podemos estimar o seu carregamento máximo admissível baseado numa curva de carga característica e temperatura ambiente de operação do equipamento.

Com base na norma NBR-5416/97 [1], foi desenvolvido um programa para este fim que estima os máximos patamares de carregamento com base no máximo valor de temperatura do enrolamento denominada como ponto quente.

Foram escolhidos 2 equipamentos de potência similar que apresentaram valores de demanda de planejamento na ordem de 22 MVA segundo o método estatístico descrito na referência [2].

Com base nas curvas de carga destes equipamentos determinamos os máximos carregamentos admissíveis de acordo com a NBR-5416/97 utilizando o programa citado.

Apesar de apresentarem demandas de planejamento quase iguais, as características das curvas de carga são bem diferentes entre si como pode ser visto na figura 6 a seguir.

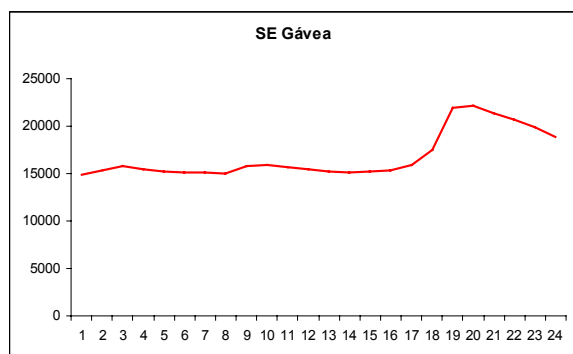


Figura 5 – Curva de Carga SE Gávea

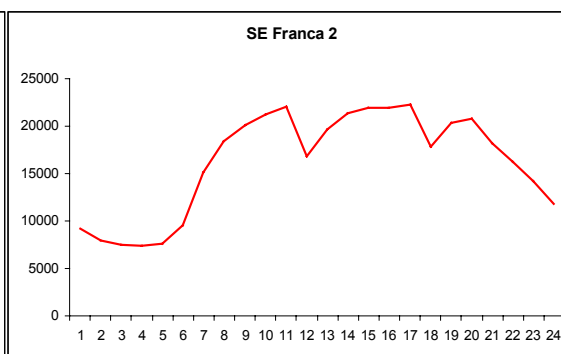


Figura 6 – Curva de Carga SE Franca

Observando a figura 6 vemos que a SE Franca apresenta uma curva de carga mista, (residencial/comercial e industrial) com um pico no horário fora de ponta, enquanto a SE Gávea tem predominância de carga residencial e também apresenta pico no horário de ponta.

Com base nestas duas curvas características simulamos na planilha de cálculo mostrada na figura 5 os máximos carregamentos admissíveis para cada um dos transformadores.

### 5.1 Simulação de Carregamento dos Transformadores SE Franca e SE Gávea

Para a realização dos cálculos de carregamento máximo admissível dos transformadores, foi considerado como valor de temperatura ambiente 35° C constante. Na prática sabemos que isso não ocorre, porém, de acordo com a NBR-5416/97 [1], a temperatura ambiente é mantida constante durante todo o período. Procedendo desta forma estamos sendo conservadores, mas por outro lado, provemos uma maior confiabilidade ao equipamento no caso da necessidade de operação acima das condições nominais.

Transformador da SE Gávea  
 Potência Nominal – 25 MVA;  
 Tensão – 138 / 13,8 kV  
 Ano de Fabricação – 1973  
 Classe 55° C

Através da Planilha de cálculo que utiliza as equações da norma NBR-5416/97 [1], obtivemos os seguintes valores máximos de carregamento.

Tabela 1 – Carregamento Máximo Admissível SE Gávea.

CARREGAMENTO	%
Condições Normais de Operação (105°C)	27
Acima das Condições Normais (110°C)	29
Emergência de Longa Duração (115°C)	29
Emergência de Curta Duração (120°C)	29

Como podemos ver na tabela 1, para o carregamento descrito através da curva de carga da SE Gávea podemos operar o transformador até 27% acima de sua potência nominal sem detrimento de sua vida útil. Isto é possível já que a maior parte do período o transformador fica no patamar de 15 MVA e o pico de carga, atingindo cerca de 22 MVA, ocorre num curto espaço de tempo, 2 horas aproximadamente.

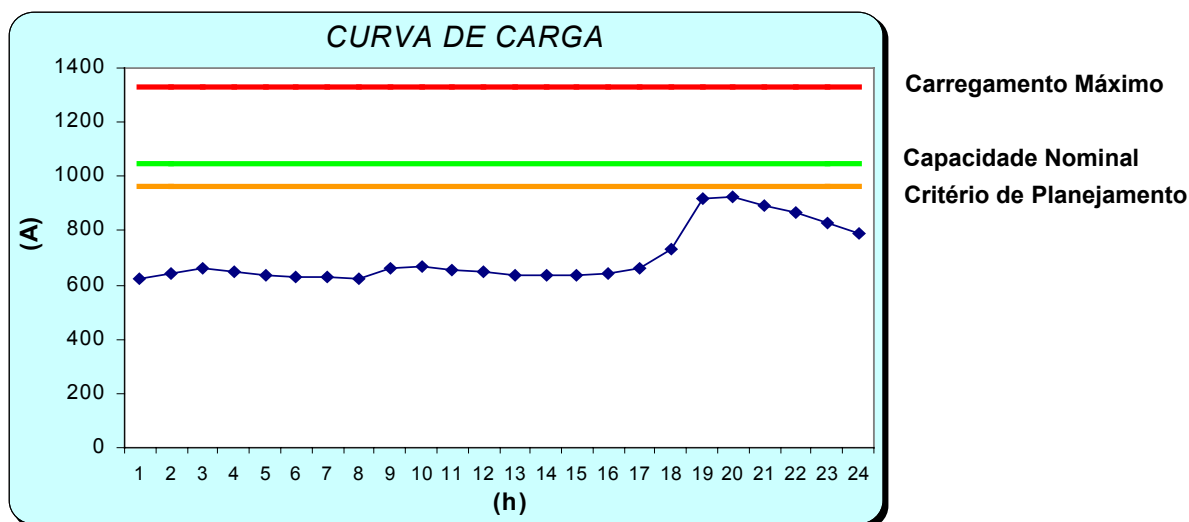


Figura 7 – Curva de Carga - SE Gávea.

Transformador da SE Franca  
 Potência Nominal – 25 MVA;  
 Tensão – 138 / 13,8 kV  
 Ano de Fabricação – 1981  
 Classe 55° C

Da mesma forma, através da Planilha de cálculo que utiliza as equações da norma NBR-5416/97 [1], obtivemos os seguintes valores máximos de carregamento.

Tabela 2 – Carregamento Máximo Admissível SE Franca.

CARREGAMENTO	%
Condições Normais de Operação (105°C)	11
Acima das Condições Normais (110°C)	11
Emergência de Longa Duração (115°C)	11
Emergência de Curta Duração (120°C)	11

Observando a tabela 2 podemos perceber que a situação da SE Franca é bem diferente da SE Gávea. Nesse caso o carregamento máximo admissível é de apenas 11% sem que haja detrimento da vida útil do transformador.

A razão para esse menor patamar é devido ao fato que na maior parte do tempo o transformador opera na casa dos 22 MVA, ou seja, o transformador trabalha muito mais aquecido. Por essa razão o valor máximo de temperatura enrolamento é atingido mais rapidamente e a patamares inferiores de sobrecarga.

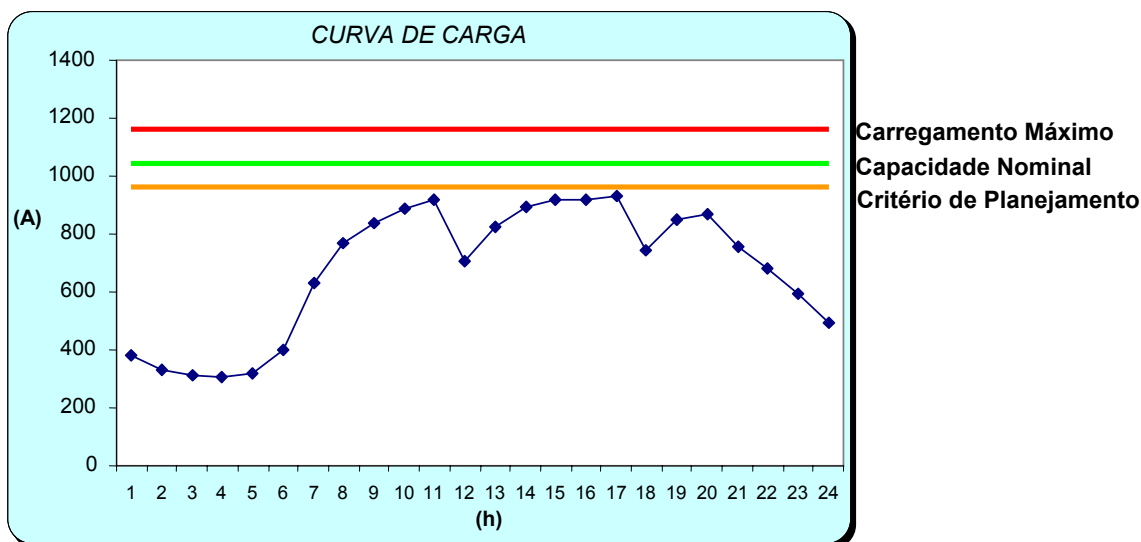


Figura 8 – Curva de Carga SE Franca.

## 6. CONCLUSÕES

Através do estudo realizado neste artigo pudemos comprovar que valores aproximadamente iguais de demanda de planejamento significam níveis de carregamento máximo muito diferentes entre os transformadores envolvidos.

No caso ilustrado entre as subestações Franca e Gávea vemos que a SE Gávea tem a possibilidade de operar em patamares de sobrecarga bem superiores, quando comparada a SE Franca, sem detrimento de sua vida útil e de acordo com a NBR-5416/97 [1]. Esta diferença nos patamares de carregamento máximo admissível permite análises diferenciadas quanto a priorização de obras de expansão, por exemplo.

No caso estudado, sob a ótica do planejamento, as duas subestações necessitam de obras de ampliação, porém, através da análise das curvas de carga poderíamos priorizar a ampliação da SE Franca, no caso de contingenciamento de recursos. Essa priorização seria feita com base no máximo carregamento admissível dos dois transformadores considerando que ambos equipamentos estão em condições ideais de operação, ou seja, condições do óleo isolante, estanqueidade, etc.

Essa metodologia de análise pode ser utilizada também nos casos de pré-operação onde, através dos cálculos do carregamento máximo admissível dos transformadores, podemos estimar os patamares de sobrecarga para se efetuar desligamentos programados de outras unidades, estudos de contingência, etc.

No contexto atual do setor elétrico nacional, além do que já foi citado, podemos lançar mão desta análise para prover a melhor utilização dos seus e dessa forma obter a máxima remuneração de seus investimentos.

Face ao exposto, vale ressaltar a importância da manutenção dos ativos da subestação, sobretudo os transformadores de potência, pois dependendo do caso, um investimento em manutenção realizado ao longo de sua vida operativa, além de manter o nível de confiabilidade adequado pode significar a postergação de investimentos e ganhos tarifários para a empresa.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. NBR-5416/97 – Aplicação de Cargas em Transformadores de Potência – Procedimento;
2. ALEX A. Demandas de Planejamento e Curvas Características de Transformadores de Potência – Estudo Planejamento - CPFL - 2005
3. BUSSAB, Wilton O, MORETTIN, Pedro A. Estatística Básica. 3ª ed. São Paulo, Atual 1986.
4. KLEIBAUM, David G., KUPPER, Lawrence L. Applied Regression Analysis and Other Multivariable Methods. North Scituate, Massachusetts: Duxbury Press, 1978.
5. MENDES J.C. - Redução de falhas em grandes transformadores de alta tensão – Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – 1995.
6. OOMEN T.V – Buble Evolution from Transformer Overload – IEEE 2001;
7. Mc NUTT W.J, Insultation Thermal Life Considerations for Transformers Loading Guides – Transactions on Power Delivery – 1992;
8. BLAKE J.H – Oil Immersed Power Transformer Overload Calculations by Computer – IEEE Transactions on Power – 1969;
9. BARTLEY W.H – Life Cycle Management of Utility Transformer Assets – Breakthrough Asset Management for the Restructured Power Industry – Salt Lake City – Utah – Outubro/2002.
10. <http://www.r-project.org>
11. <http://finzi.psych.upenn.edu/R/library/stats/html/dist.html>
12. <http://www.statsoft.com/textbook/stathome.html>