

XV SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - SENDI 2002

Comportamento de carga sensível à temperatura ambiente

M.A.H.G. Silva – ANEEL

E-mail: mangelo@aneel.gov.br

Palavras-chave - Contratos de Energia
Gerenciamento do consumo
Planejamento de mercado

Resumo - A meteorologia tem um impacto significativo em diversos setores da economia, no Brasil estima-se que cerca de 30% do volume de negócios depende das condições climáticas. O mercado de energia elétrica é particularmente sensível uma vez que há uma estreita relação entre consumo e temperatura ambiente. Esta dependência pode influenciar sobremaneira a receita dos comercializadores de energia pois verões mais quentes que o previsto ou invernos mais frios que o normal afetam significativamente o montante da energia a ser comercializada. Tais impactos são claros quando se pode comprovar matematicamente esta dependência.

O objetivo desta contribuição técnica é comprovar a correlação entre consumo de energia elétrica e a temperatura ambiente e, assim, provocar reflexões sobre a aplicação dos derivativos de clima e sua recente aplicação no setor elétrico. Foi desenvolvida a partir da apropriação diária dos dados destas duas grandezas, no Rio de Janeiro, desde a implantação do racionamento, abrangendo pois o período junho de 2001 a fevereiro de 2002 onde, por força da gestão da crise no fornecimento de energia, houve forte monitoramento das unidades de consumo assim como uma estratificação mais ampla das diversas classes. Foram também analisados os dados do mês de março de 2002 caracterizados pelo término do racionamento e sob a pressão de forte onda de calor.

A metodologia desenvolvida se baseia na análise de regressão e tem como principal objetivo a previsão de consumo (variável dependente ou de resposta) com base nos valores de temperatura ambiente (variável independente ou explicativa), ou seja determinar a quantidade de energia requerida para o incremento unitário de temperatura. São incorporadas técnicas como a análise dos resíduos e a avaliação dos pressupostos de regressão tais como a homocedasticidade, normalidade e independência.

1. INTRODUÇÃO

Verão 98/99. Final de uma fiscalização rigorosa quanto ao cumprimento de uma série de determinações emanadas pelo órgão regulador após o desastroso desempenho do sistema elétrico do Rio de Janeiro no verão anterior (97/98). Consolidava-se o primeiro ano de efetiva atuação da Aneel e a fiscalização de uma concessionária do porte da Light atraía a atenção da

opinião pública, de diversos órgãos governamentais, do ministério público, etc.... Esperava-se ansiosamente por um relatório de fiscalização consistente e conclusivo.

Na coordenação da equipe de fiscalização, após ter percorrido praticamente todas as subestações da zona oeste e baixada fluminense comprovando por meio de extenso acervo fotográfico o incremento anual da capacidade instalada da ordem de 600 MVA (o que na época representava a demanda total de Mato Grosso do Sul ou até mesmo do Distrito Federal), e feito incursões às câmaras de transformação no centro da cidade para comprovar a revitalização da rede subterrânea de distribuição, havia a tranquilidade quanto a metodologia e abrangência do processo de fiscalização. Faltava porém um detalhe importante, a conclusão do relatório de fiscalização que sabíamos seria altamente requisitado pelos órgãos públicos, (como o foi).

Enfim, naquela tarde quente de janeiro, ocorreu-nos a idéia de apropriar os valores de demanda e de temperatura máxima, durante o período de fiscalização e compará-los ao igual período do ano anterior e assim avaliar o desempenho do sistema.

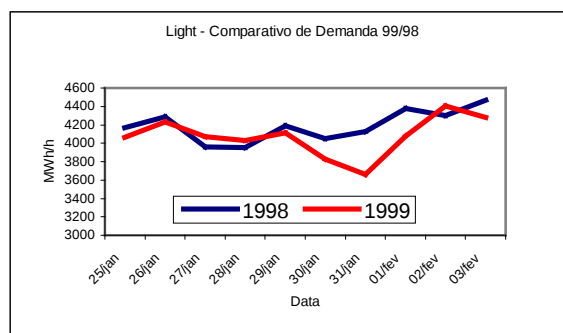


Figura 1

A figura 1 mostra as duas curvas de demanda relativas aos períodos citados. A queda abrupta na demanda para um mesmo dia típico, refletia uma redução de 41° para 37 °C na temperatura máxima, sinalizando a necessidade de um estudo mais apurado visando verificar a existência de uma estreita relação entre essas duas variáveis.

2. CONCEITUAÇÃO

O boletim Resenha de Mercado da Eletrobrás em sua última publicação antes do início do racionamento, apresentou a seguinte tabela que estratifica o consumo

faturado pelas concessionárias de energia elétrica nos últimos 12 (doze) meses anteriores a março de 2001.

Tabela nº 1

12 meses até março 2001		
Classe	Consumo GWh	%
Residencial	84.252	27,33
Industrial	132.276	42,75
Comercial	48.338	15,62
Outros	44.567	14,40
Total	309.433	100,00

As figuras nº 2, 3 e 4 referem-se ao uso final de energia no Brasil, de acordo com dados apresentados pela Agência para Aplicação de Energia no Induscon 96 (Conferência Internacional sobre Aplicação Industrial de Eletricidade e Exposição, São Paulo, Brasil, Na Direção do Ano 2000). Pela figura nº 2 pode-se notar três usos finais que são responsáveis por aproximadamente 80% do consumo residencial de eletricidade:

- Refrigeração, na qual são predominantes as geladeiras, freezers e ar-condicionado;
- Aquecimento, no qual se destaca o uso dos chuveiros;
- Iluminação.

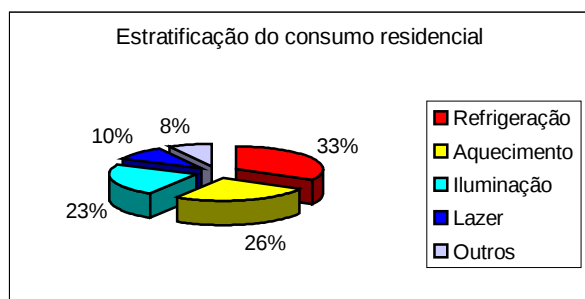


Figura nº 2

Na figura nº 3 observam-se três usos finais que juntos correspondem a praticamente 80% do consumo comercial de energia elétrica: Iluminação, principal responsável pelo consumo de eletricidade desse setor; Ar-condicionado e Refrigeração.

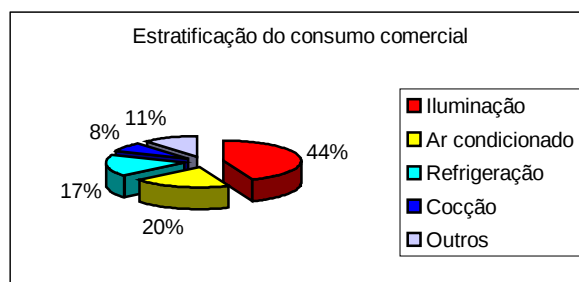


Figura nº 3

Por fim, na figura nº 4, notam-se dois usos finais que se destacam pela sua importância no consumo de eletricidade do setor industrial: força motriz e aquecimento.

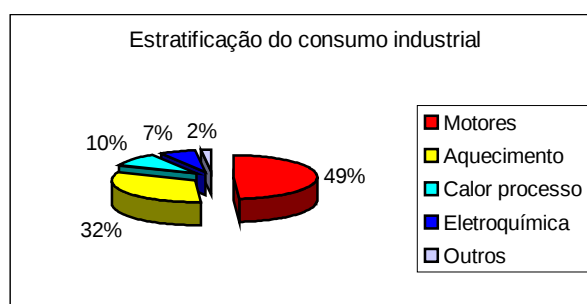


Figura nº 4

Torna-se então evidente que, nas três principais classes de consumo (residencial, comercial e industrial), a variável temperatura exerce forte influência sobre o uso final da energia elétrica.

2.1. Influência da temperatura no consumo/ demanda

Em 1996 quando o setor elétrico brasileiro atravessava dificuldades para atender a demanda (ponta), previsões feitas pela Eletrobrás indicavam, para as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, um total aproximado de 18 milhões de chuveiros elétricos como responsáveis por 20% de toda a demanda na hora da ponta dessas regiões. Só esses aparelhos consumiam, nesse horário, 20% mais do que toda a demanda de todo o Estado do Rio de Janeiro, avaliada na época em 4.900 megawatts.

Na década de 80 estudo elaborado pela Divisão de Operações da Regional Serrana da Companhia de Eletricidade do Rio de Janeiro - Cerj, mostrou que, apesar das características da cidade de Petrópolis-RJ (serrana com vocação turística), o consumo de energia elétrica comportava-se praticamente de maneira uniforme, nos períodos de inverno e de verão conforme ilustrado na tabela nº 2. A análise do comportamento da carga indicava, para o inverno, forte influência de aquecimento elétrico (regulagem máxima dos chuveiros e aquecedores de ambiente) e, um verão sem a necessidade de ar-refrigerado.

Tabela nº 2

Energia Distribuída - GWh				
Mês/Ano	1986	1987	1988	Média
Janeiro	27,06	28,37	30,67	28,70
Fevereiro	24,89	26,59	27,45	26,31
Março	26,93	28,59	30,93	28,82
Abril	27,52	28,38	29,15	28,35
Mai	29,04	29,43	30,12	29,53
Junho	27,95	28,31	29,74	28,67
Julho	30,13	28,63	30,78	29,85
Agosto	30,09	28,67	30,56	29,77
Setembro	29,71	29,19	28,98	29,29
Outubro	30,84	29,88	29,26	29,99
Novembro	28,46	28,19	28,68	28,44
Dezembro	28,27	28,82	28,75	28,62

Em outros sistemas o comportamento do consumo é fortemente influenciado pelo calor, como ocorre no Rio de Janeiro e que será objeto de análise.

Na figura nº 6 estão representadas as curvas de carga típicas de inverno e verão no sistema de distribuição do Rio de Janeiro. Para o inverno, a curva se comporta de uma maneira tradicional com a ponta de carga ocorrendo entre 18 e 19 h, observando-se, para o verão, a ocorrência da carga máxima no entorno das 23 h.

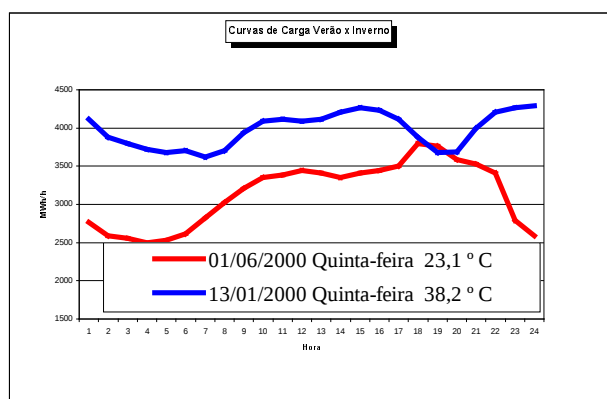


Figura nº 6

A relação entre demanda e calor ficou evidenciada quando em 23 de dezembro de 1997 a Light registrou um consumo recorde de energia que provocou a queda e o desligamento de vários transformadores ao mesmo tempo. Os recordes de demanda foram sucessivamente quebrados nos meses de janeiro e fevereiro de 1998, conforme a tabela nº 3.

Tabela nº 3

Picos de Demanda Máxima		
Dia	Demanda MW	Hora da Ponta
23/12/1997	4.272,10	23 h
28/01/1998	4.357,60	23 h
02/02/1998	4.377,80	23 h
04/02/1998	4.465,60	23 h

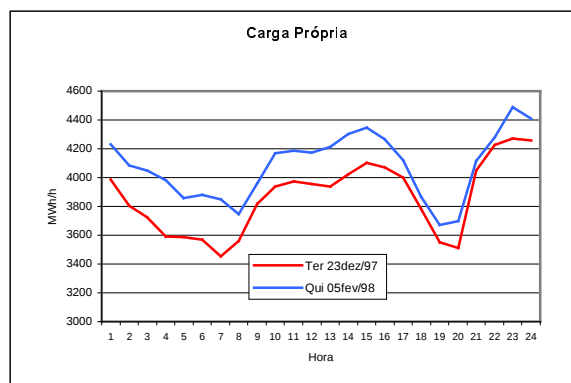


Figura nº 7

Observa-se, na figura nº 7, que o formato da curva de carga diária, para o verão é típico, conforme já mostrado na figura nº 5.

2.2. Definições e Conceitos

O sistema elétrico pode ser subdividido, em subsistemas de transmissão, subtransmissão, distribuição e comercialização.

Quando se liga uma determinada carga, em uma residência, numa empresa comercial ou em uma indústria, demanda-se, entre outros elementos, uma enorme quantidade de equipamentos para atendê-la. A energia elétrica deve satisfazer a determinados padrões de qualidade e continuidade no seu fornecimento. Reduções nos investimentos necessários levarão, mais cedo ou mais tarde, a perda desta qualidade. Por outro lado, investimentos em excesso, poderão, em tese, aumentar o custo do produto ofertado. Torna-se então necessário um bom planejamento e uma adequada operação para se chegar a uma solução de compromisso que atenda, pelo menos, os padrões mínimos de qualidade, ao mesmo tempo em que remunere adequadamente os investimentos realizados pela concessionária.

Em sistemas de distribuição como o da Light pode-se relacionar as cargas envolvidas da seguinte forma:

- Carga da unidade consumidora;
- Carga do transformador de distribuição;
- Carga de uma rede primária ou de uma linha de distribuição;
- Carga de uma subestação.

É importante considerar que o regime dessas cargas não é fixo, variando de um valor mínimo a um valor máximo, devendo, o sistema, estar preparado para atender a esse valor máximo.

As curvas de carga variam de acordo com as características de uso e hábito das unidades consumidoras. Assim, as unidades consumidoras residência, industrial, comercial, iluminação pública entre

outras, apresentam efeitos combinados sobre o sistema elétrico.

2.2.1. Energia Elétrica Ativa

É o uso da potência ativa em qualquer intervalo de tempo, sua unidade usual é o quilowatt-hora (kWh). É a energia elétrica que pode ser convertida em outra forma de energia. É usual se referir a energia elétrica ativa em termos de Megawatts médios, assim:

Se para um período de 24 horas temos um energia consumida de 48.000 MWh é equivalente dizer que o consumo naquele período foi de:

$$\frac{48.000}{24} = 2.000 \text{ MW (MEGAWATTS médios)}$$

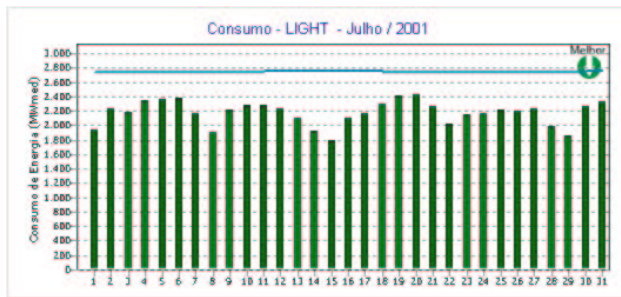


Figura nº 8

A figura nº 8 representa a energia ativa consumida no mês de julho de 2001, no sistema de distribuição da Light, onde se pode ver a variação para cada dia da semana e, até mesmo entre semanas, quando da influência de fatores externos como a temperatura ambiente. Observa-se que a unidade do eixo das ordenadas (consumo) é megawatts médios. Pode-se também em função da característica de utilização de cada classe de consumo, montar a curva de carga diária do sistema, conforme ilustrado no gráfico nº 8.

2.2.2. Demanda

É a média das potências elétricas, solicitadas ao sistema pela parcela da carga instalada em operação na unidade consumidora, durante um intervalo de tempo especificado. Esta potência média pode ser calculada dividindo-se a energia elétrica absorvida pela carga em um certo intervalo de tempo Δt , por este intervalo de tempo Δt . Os medidores instalados no Brasil operam com intervalo de tempo $\Delta t = 15$ minutos (Decreto nº 62.724 de 17 de maio de 1968).

2.2.3. Demanda Máxima

É a maior de todas as demandas verificadas durante um determinado período (diário, mensal, anual etc.)

2.2.4. Demanda média

É a relação entre a energia elétrica (MWh) consumida durante um certo intervalo de tempo e o número de horas desse período.

2.2.5. Fator de carga

O fator de carga (F_c) é a razão entre a demanda média e a demanda máxima, ocorridas no mesmo intervalo de tempo especificado.

$$F_c = \frac{D_{med}}{D_{max}} = \frac{D_{med} \cdot \Delta t}{D_{max} \cdot \Delta t} = \frac{MWh}{D_{max} \cdot \Delta t}$$

Representa pois a relação entre a energia realmente consumida e aquela que seria consumida se a demanda máxima fosse constante para todo o intervalo de tempo considerado.

O Fator de Carga do sistema é de fundamental importância para a concessionária pois influi significativamente no faturamento e na operação. Para o faturamento da Empresa uma vez que, face à característica de não armazenabilidade da energia elétrica, quanto mais próximo da unidade for o Fator de Carga, mais próximo da demanda máxima estará operando o sistema para todo o intervalo de tempo considerado, maximizando assim a comercialização da energia. Para a operação pois cuidados especiais de monitoramento e manutenção deverão ser adotados pois o sistema operará durante todo o intervalo de tempo com a demanda próxima da máxima.

Uma vez definidos esses conceitos, pode-se aplica-los às curvas de carga típicas de verão e inverno para o sistema Light, assim:

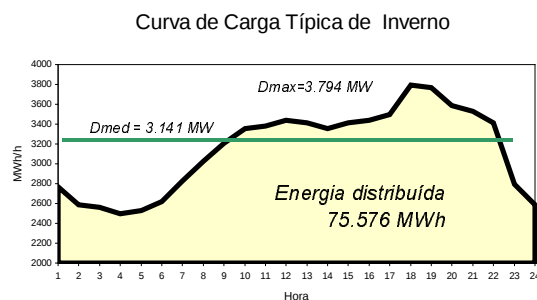


Figura nº 9

Para essa condição (inverno) o fator de carga é igual a 0,83, assim:

$$F_c = \frac{3.141}{3.794} = 0,83$$

pode também ser calculado através da relação entre a energia realmente consumida e aquela que seria

consumida se, no intervalo de tempo considerado, na demanda máxima fosse constante

$$Fc = \frac{75.576,48}{3.794 \times 24} = 0,83$$

Esta última formulação é importante pois, conhecendo o Fator de Carga e a Demanda Máxima no período considerado, pode-se obter diretamente o consumo registrado no mesmo período.

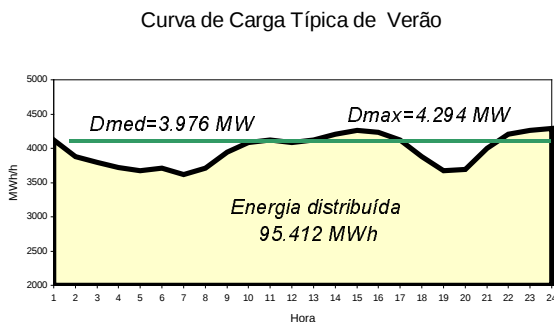


Figura nº 10

Para a curva de carga característica de verão, o Fator de Carga é igual à

$$Fc = \frac{95.412}{4.294 \times 24} = 0,93$$

3. REGRESSÃO LINEAR E CORRELAÇÃO

3.1. Considerações Gerais

A análise de regressão é utilizada principalmente com o objetivo de previsão. Tem como propósito o desenvolvimento de um modelo estatístico que possa ser utilizado para prever os valores de uma variável dependente ou variável de resposta, com base nos valores de pelo menos uma variável independente ou explicativa. A análise de correlação, por sua vez, é utilizada para medir a força da associação entre essas variáveis. Das técnicas estatísticas que têm aplicação em engenharia e economia, as análises de regressão e de correlação talvez sejam as de uso mais difundido e, infelizmente, as mais amplamente mal utilizadas. As dificuldades geralmente decorrem das seguintes origens:

- Falta de atenção aos pressupostos da regressão dos mínimos quadrados.
- Dificuldade em avaliar os pressupostos da regressão.

- Desconhecimento de alternativas para a regressão quando do não atendimento a determinado pressuposto.
- Utilizar um modelo de regressão sem o conhecimento prévio do assunto em questão.

A ampla disponibilidade de software estatísticos e de planilhas vem quebrando a barreira relativa à cálculos que dificultava a adoção da análise de regressão em situações onde previsões se faziam necessárias. Entretanto, a necessidade de ir além do simples tratamento dos números, de calcular a interseção de y, a inclinação e o coeficiente de correlação é evidenciada por um estudo apresentado por F.J. Anscombe em *Graphs in Statistical Analysis* onde são apresentados quatro conjuntos de dados que, relativamente às estatísticas pertinentes associadas a uma regressão linear simples são idênticos. Entretanto, apenas o primeiro conjunto não apresenta anomalia.

Tabela nº 4

Conj. A		Conj. B		Conj. C		Conj. D	
Xi	Yi	Xi	Yi	Xi	Yi	Xi	Yi
10	8,04	10	9,14	10	7,46	8	6,58
14	9,96	14	8,10	14	8,84	8	5,76
5	5,68	5	4,74	5	5,73	8	7,71
8	6,95	8	8,14	8	6,77	8	8,84
9	8,81	9	8,77	9	7,11	8	8,47
12	10,84	12	9,13	12	8,15	8	7,04
4	4,26	4	3,10	4	5,39	8	5,25
7	4,82	7	7,26	7	6,42	19	12,50
11	8,33	11	9,26	11	7,81	8	5,56
13	7,58	13	8,74	13	12,74	8	7,91
6	7,24	6	6,13	6	6,08	8	6,89

Para os quatro conjuntos obtém-se:

$$\bar{X} = 9,0$$

$$\bar{Y} = 7,50$$

$$\sum XX = 110,0$$

$$\sum YY = 41,27$$

$$\sum XY = 55,00$$

Observando os quatro diagramas de dispersão do gráfico nº 12 nota-se que as equações e os coeficientes de determinação são idênticos apesar da distribuição dos pontos ser totalmente diferente. No conjunto A a reta de tendência parece ser adequada. Para o conjunto B, uma curva deveria ser adotada pois parece estranho adotar uma reta. Também no conjunto C há um ponto atípico e, portanto, deve-se possivelmente desprezá-lo. Dos onze pares de dados do conjunto C o ponto $X=19$ tem uma

grande influência na determinação da reta, uma vez que há apenas dados para $X=8$ ou $X=19$.

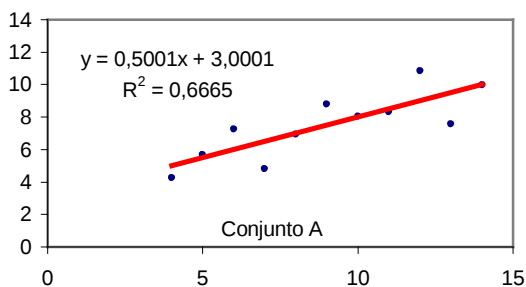


Figura nº 11

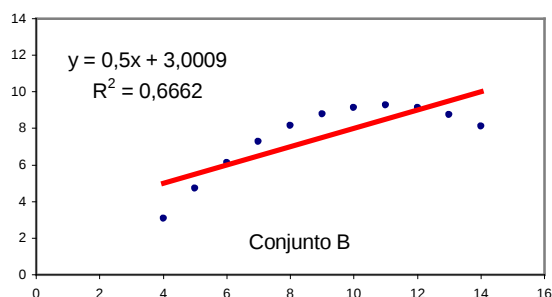


Figura nº 12

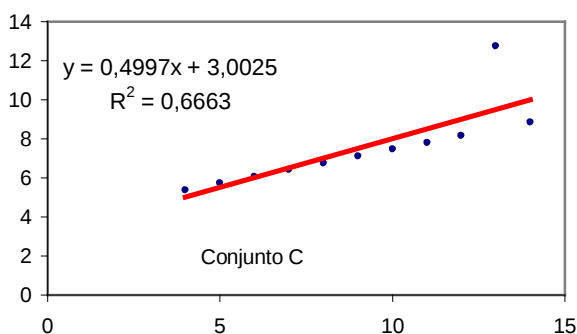


Figura nº 13

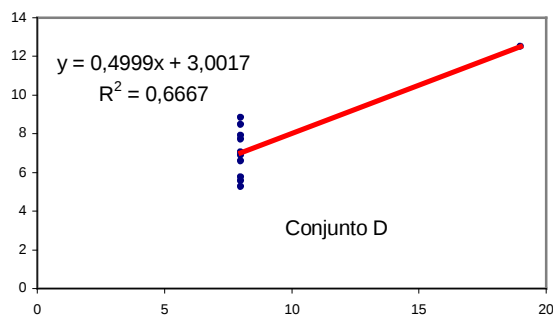


Figura nº 14

3.2. Pressupostos da Regressão e da Correlação

A aplicação apropriada de um determinado procedimento estatístico depende do bom cumprimento de um conjunto de pressupostos para esse procedimento. Dentre os principais pressupostos da regressão destacam-se:

1. Normalidade
2. Homocedasticidade
3. Independência de erros

A *normalidade* requer que os valores de Y sejam normalmente distribuídos para cada valor de X. Enquanto a distribuição dos valores de Y_i em torno de cada nível de X for próxima de uma distribuição normal, inferências sobre a linha de regressão e sobre coeficientes de regressão não serão seriamente afetadas.

A *homocedasticidade* requer que as variações em torno da linha de regressão sejam constantes para todos os valores de X. Isto significa que Y varia na mesma proporção, quando X for um valor baixo e quando X for um valor elevado.

A *independência de erros* requer que o erro (a diferença residual entre valores observados e previstos) deva ser independente para cada valor de X.

3.2.1. Análise de resíduos

A análise de resíduos é um método gráfico que permite avaliar a adequação do modelo de regressão que foi ajustado aos dados. Além disso, esse método permite também verificar potenciais violações dos pressupostos do modelo de regressão.

Os valores de erros estimados (e_i), ou *resíduos*, são definidos como a diferença entre os valores de (Y_i) observados e o valores previstos de ($\hat{Y}_i$) da variável dependente para valores dados de (X_i), assim;

$$e_i = Y_i - \hat{Y}_i$$

Além dos *resíduos* (diferença entre os valores observados e previstos) devem também ser calculados os *resíduos padronizados* e os *resíduos de Student*. Os resíduos padronizados representam cada resíduo dividido pelo seu erro padrão. Os resíduos de Student, por sua vez, são os resíduos padronizados ajustados para a distância do valor de X médio, assim:

$$\text{Resíduo de Student} = \text{RSi} = \frac{e_i}{S_{YX} \sqrt{1 - h_i}}$$

Onde:

$$h_i = \frac{1}{n} + \frac{(X_i - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

A adequação do modelo de regressão ajustado pode ser avaliada plotando-se os resíduos de Student no eixo das ordenadas e os valores correspondentes aos valores de X_i da variável independente no eixo das abcissas. Se o modelo ajustado for apropriado para os dados, os resíduos deverão estar uniformemente espalhados acima e abaixo de 0, para os diferentes valores de X .

Os pressupostos de *homocedasticidade* e *normalidade* são avaliados através dos resíduos de Student. A *Independência de erro*, por sua vez, é avaliada através da estatística de Durbin-Watson que analisa a evolução dos resíduos padronizados ao longo do tempo.

Assim, os gráficos de resíduos são de grande importância para uma análise de regressão completa. Uma análise criteriosa de um estudo de regressão linear deve envolver a seguinte metodologia:

1. Iniciar com um diagrama de dispersão para avaliar a possível relação entre as variáveis livre e dependente;
2. Verificar os pressupostos da regressão depois que o modelo tiver sido ajustado, antes de prosseguir e utilizar os resultados do modelo;
3. Elaborar os gráficos dos resíduos em relação à variável independente. Isso possibilitará checar a adequabilidade do modelo permitindo a verificação visual de qualquer violação do pressuposto da homocedasticidade;
4. Elaborar um histograma ou um gráfico normal de probabilidade dos resíduos, para avaliar graficamente se o pressuposto da normalidade foi seriamente violado;
5. Para dados coletados em ordem seqüencial, fazer o gráfico dos resíduos em função do tempo e calcular a estatística de Durbin-Watson;
6. Se após concluídas as etapas de nº 3 a 5 for constatada violação nos pressupostos, utilizar modelos de mínimos quadrados alternativos (regressão curvilínea ou regressão múltipla), dependendo do que a avaliação tiver indicado;
7. Caso a avaliação feita nestas etapas não indique violação dos pressupostos, pode-se então adotar os aspectos de inferência da análise de regressão e realizar testes para os

coeficientes de significância e de correlação.

4. APROPRIAÇÃO DIÁRIA DO CONSUMO E DA TEMPERATURA

4.1. Considerações Gerais

A conclusão do Relatório de Fiscalização reproduzida no documento nº 1 apresentou, para o período de 25/01 a 03/02/1999 um acompanhamento de Demanda (MW) e Temperatura (°C) conforme a tabela nº 5.

Tabela nº 5

1999		
Dia	Demanda	Temp. °C
25/01/1999	4.065,00	34,7
26/01/1999	4.232,00	36,6
27/01/1999	4.070,00	35,1
28/01/1999	4.031,00	34,4
29/01/1999	4.111,00	37,5
30/01/1999	3.830,80	36,9
31/01/1999	3.659,20	37,6
01/02/1999	4.076,00	37,2
02/02/1999	4.409,00	38,9
03/02/1999	4.281,00	38,8

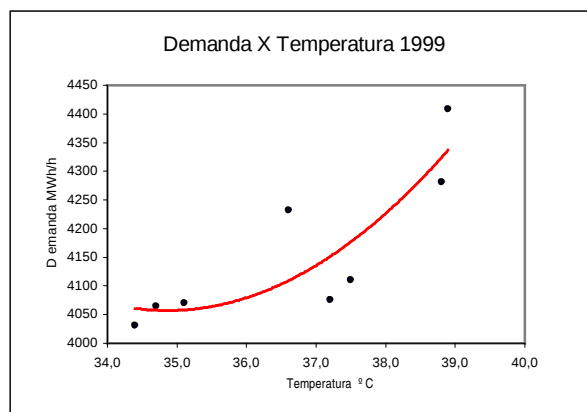


Figura nº 15

A figura nº 15 mostra uma correlação curvilínea com razoável aderência, apesar de não terem sido observados os conceitos descritos no capítulo 2. Em uma primeira abordagem, pode-se observar que foram retirados do cálculo, os pares ordenados relativos aos dias 30 e 31/01/1999, respectivamente sábado e domingo uma vez que as características da carga relativas à esses dias e dias úteis são totalmente distintas. Apesar do reduzido número de observações ($n=8$), pode-se inferir que:

- a) existe uma zona de insensibilidade até os 35 °C ;
- b) uma variação na temperatura, em dia útil, de 35 a 39 °C provoca um aumento na demanda em torno de 344 MW.

o que sugere uma análise mais substancial uma vez que, as mudanças estruturais que vem sendo implementadas no setor elétrico principalmente na área de comercialização de energia, exigem dos agentes um perfeito conhecimento de sua carga e das variáveis explicativas que a influenciam.

4.2. Períodos de Análise

A implantação do estado de racionamento decretado pela Medida Provisória nº 2.147 de 15 de maio de 2001 impôs às concessionárias de distribuição das Regiões Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste um rígido controle diário do consumo, estratificado por classes, cujos valores em MW médios eram enviados diariamente à Aneel que, uma vez consolidados, permitiam a confrontação com a curva guia dos reservatórios sinalizando à Câmara de Gestão da Crise de Energia Elétrica para a conseqüente adoção de medidas restritivas ao consumo.

Esse período de exceção e de restrição ao consumo trouxe, entretanto, alguns aspectos positivos principalmente quanto à racionalização do consumo de energia elétrica, reduzindo drasticamente o desperdício e propiciando às empresas um aprofundamento do conhecimento do seu mercado.

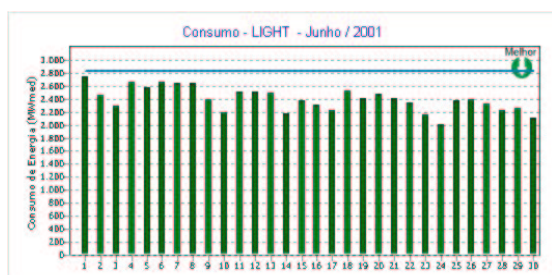


Figura nº 16

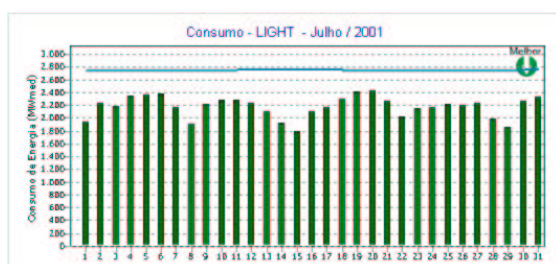


Figura nº 17

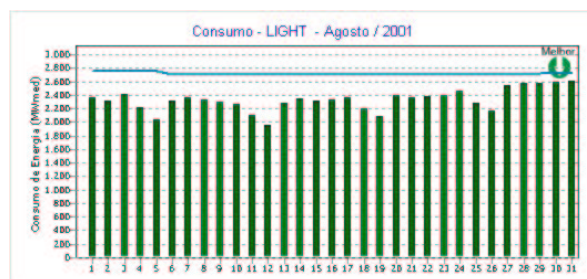


Figura nº 18

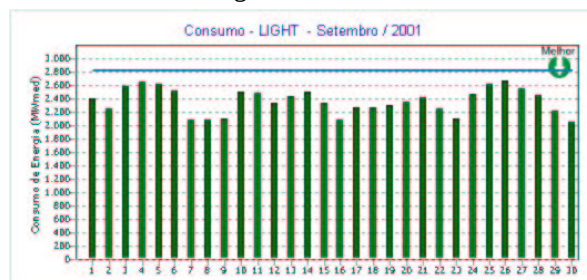


Figura nº 19

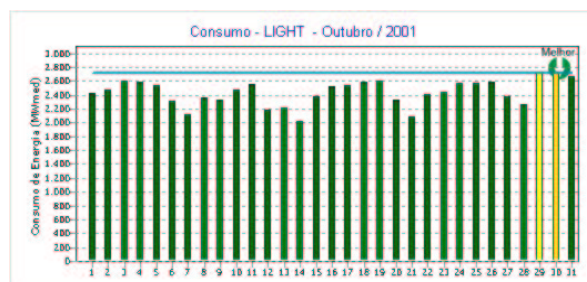


Figura nº 20

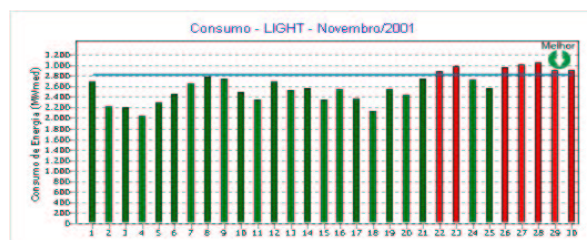


Figura nº 21

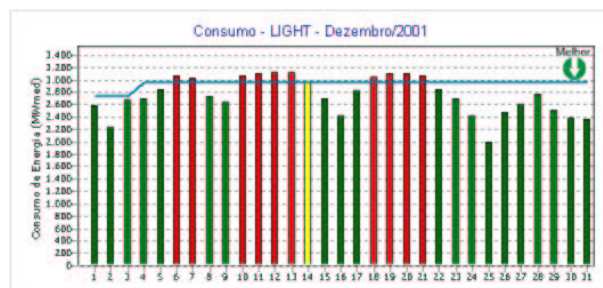


Figura nº 22

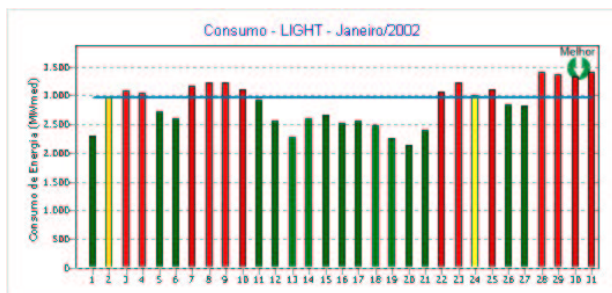


Figura nº 23

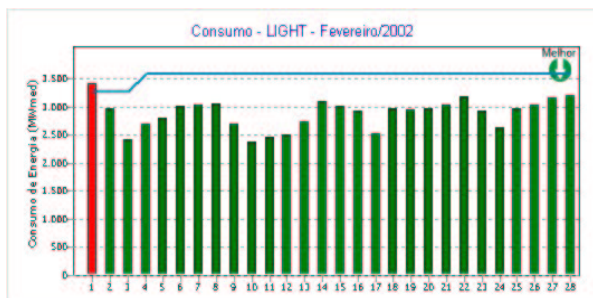


Figura nº 24

As figuras de nº 16 a 24 retratam, dia a dia, o consumo de energia elétrica da Light (em MW médios) durante o racionamento. Trata-se de um gráfico de farol onde as cores verde, amarelo e vermelho indicam, para o determinado dia, o grau de adequação à meta previamente estabelecida para a concessionária (linha azul horizontal). A característica marcante da apropriação dos dados neste período foi o monitoramento diário e direto, por parte da Agência Reguladora, complementado por 2 (duas) ações de fiscalização respectivamente nos meses de agosto e novembro de 2001.

Paralelamente, foram apropriados os dados diários de temperatura máxima e mínima de modo a subsidiar esta dissertação.

Assim, as variáveis consumo e temperatura ambiente foram objeto de atenção constante durante os 9 (nove) meses de racionamento o que representou um universo considerável de pares ordenados para o estudo em questão.

Deve-se entretanto considerar que, as intervenções externas nos hábitos de consumo, por força das Resoluções da Câmara de Gestão da Crise de Energia - GCE, principalmente no período agosto/novembro (críticos em termos de nível de reservatório) tenderam por mascarar o resultado da análise estatística com um considerável número de pontos atípicos. Assim, optou-se por se fazer uma análise dos diagramas de dispersão para os dias úteis, sábados e domingos e feriados e, posteriormente um estudo completo para os dias úteis no mês de março de 2002, pós-rationamento, trazendo ainda os hábitos naturais adquiridos de racionalidade do consumo, livres entretanto das imposições legais. Este período foi também caracterizado por forte onda de calor

com conseqüente utilização maciça de aparelho de ar-refrigerado e refrigeração em geral.

5. ESTUDO INICIAL - RACIONAMENTO

O estudo inicial para se determinar a correlação entre consumo de energia elétrica *versus* temperatura máxima diária previa contemplar todo o período de racionamento ou seja de junho de 2001 a fevereiro de 2002 com uma análise específica para cada dia da semana.

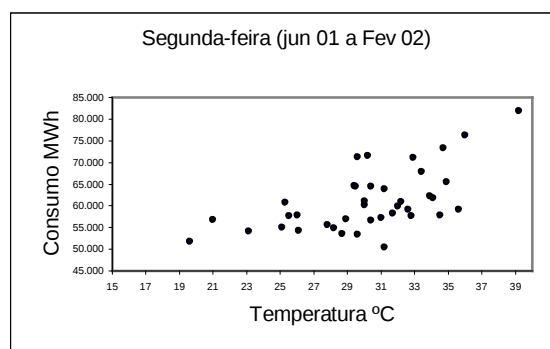


Figura nº 25

A simples observação do diagrama de dispersão para as segundas-feiras, alerta para um sem número de pontos atípicos, com elevada variância, como ocorre para a temperatura de 29 °C onde existem valores que variam de 50.000 MWh a 75.000 MWh. Esses pontos foram conseqüência das intervenções externas nos hábitos de consumo, por força das Resoluções da Câmara de Gestão da Crise de Energia - GCE dos quais pode-se destacar:

- efetivação de transações bilaterais;
- interrupção abrupta do consumo para a não-violação da meta;
- aumento da taxa de suspensão do fornecimento por inobservância de metas

Várias pois foram as ações que atuaram como vetores restritivos e/ou indutores do consumo, traduzindo-se por uma série de pares ordenados cuja imagem refletiam pontos atípicos que fatalmente inviabilizariam o estudo. As figuras de nº 26 a 31, representam os diagramas de dispersão para os demais dias da semana.

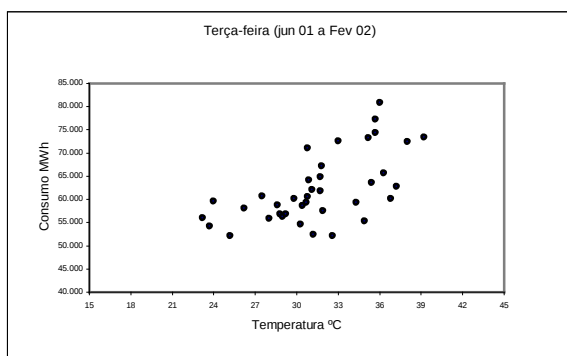


Figura nº 26

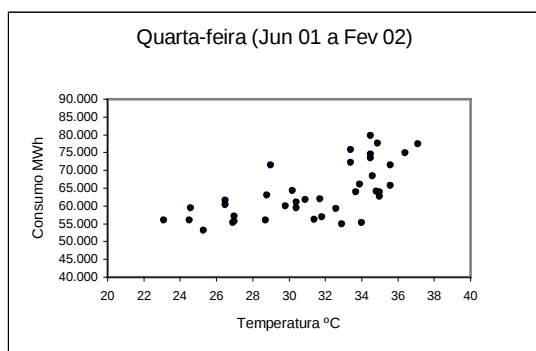


Figura nº 27

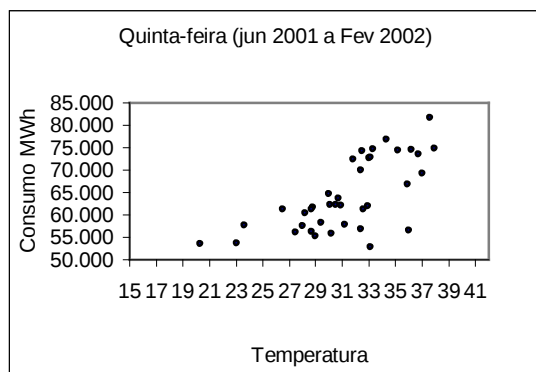


Figura nº 28

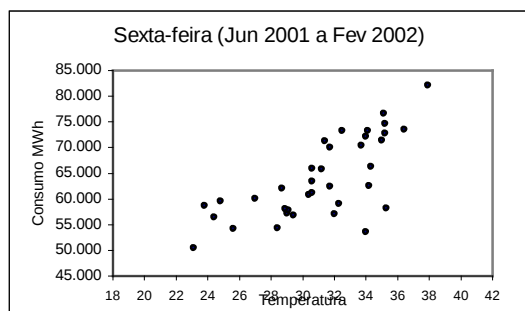


Figura nº 29

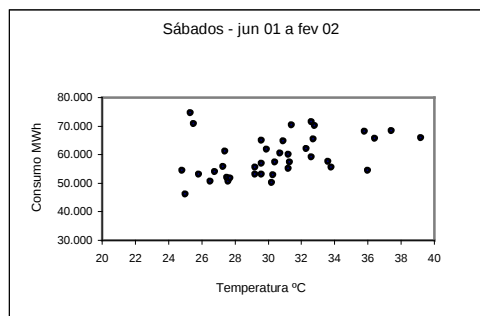


Figura nº 30

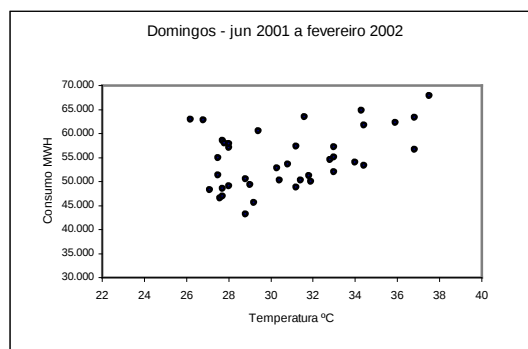


Figura nº 31

Os diagramas de dispersão relativos à sábados e domingos apresentam pouco ou nenhum padrão de relacionamento entre as variáveis.

6. ESTUDO FINAL - MARÇO 2002

6.1. Apropriação de dados

O estudo completo envolvendo os dias úteis do mês de março de 2002, pós-acionamento. Esse período foi escolhido por ter sido caracterizado por forte onda de calor, com conseqüente utilização maciça de aparelho de ar-refrigerado e refrigeração em geral e os consumidores praticando ainda os hábitos naturais adquiridos de racionalidade do consumo, livres entretanto das imposições legais. Os pares ordenados de temperatura (variável independente ou explicativa) e de consumo de energia elétrica (variável dependente ou de resposta) encontram-se na tabela nº 6. Foram expurgados os dados relativos à sábados, domingos e feriados.

Tabela nº 6

X	X quad.	Y observ.	Y prev.	Resíduos	Resíd.s padrão
29,70	882,09	73,68	78,10	-4,424630	-1,990084912
30,00	900,00	82,78	77,91	4,868964	2,189935392
31,40	985,96	77,13	77,40	-0,268892	-0,120940933
33,00	1.089,00	78,44	77,56	0,878500	0,395126834
34,30	1.176,49	78,61	78,29	0,323836	0,145653076
34,80	1.211,04	75,71	78,70	-2,990500	-1,345050412
35,50	1.260,25	82,35	79,42	2,923574	1,314948573
35,60	1.267,36	79,11	79,54	-0,430761	-0,193745138
36,80	1.354,24	79,17	81,16	-1,993030	-0,896413594
37,60	1.413,76	83,59	82,50	1,095972	0,492940272
37,80	1.428,84	79,90	82,86	-2,965905	-1,333987808
38,20	1.459,24	83,65	83,63	0,015449	0,006948518
38,40	1.474,56	86,93	84,03	2,896179	1,302627144
39,10	1.528,81	85,49	85,54	-0,055596	-0,025005648
39,10	1.528,81	85,84	85,54	0,298104	0,134079544
39,30	1.544,49	84,75	86,00	-1,254655	-0,564311625
39,40	1.552,36	88,02	86,23	1,786766	0,803641751
40,20	1.616,04	89,37	88,22	1,149259	0,516907378
40,50	1.640,25	87,15	89,02	-1,864059	-0,838405723
41,10	1.689,21	90,71	90,69	0,011422	0,005137311

6.2. Diagrama de Dispersão

A figura nº 32 retrata o diagrama de dispersão dos pares ordenados relativos a temperatura máxima ambiente e consumo de energia elétrica para os dias úteis do mês de março de 2002. Foi obtido através do Microsoft Excel 2000.

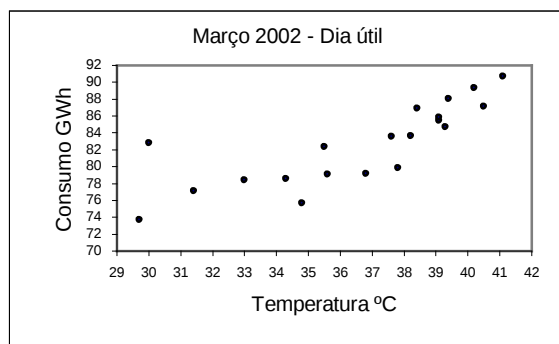


Figura nº 32

Analisando o diagrama de dispersão pode-se observar, inicialmente, uma zona de insensibilidade até os 34 °C (consumo praticamente independente do valor da temperatura). Para valores superiores de temperatura, observa-se uma correlação positiva, ou seja, para um aumento de temperatura há um aumento do consumo de energia elétrica.

Voltando ao ponto de partida, isto é, à figura nº 15 onde apresentamos um estudo sucinto de correlação entre temperatura máxima diária e demanda máxima para o sistema do Rio de Janeiro, durante as duas semanas coincidentes com a fiscalização da Aneel. Pode-se

observar, certa semelhança, com o gráfico de consumo *versus* temperatura, relativo aos dias úteis do mês de março de 2002. Essa semelhança torna-se evidente ao relembrarmos o valor do Fator de Carga, para dia típico e verão, quando obtivemos o valor próximo à unidade, ou seja, $F_c = 0,93$.

Uma correlação curvilinear parece, a primeira vista, se ajustar de uma maneira adequada aos pares ordenados plotados no diagrama de dispersão da figura nº 32. Uma zona de insensibilidade (correlação nula), até os 35 °C, evoluindo, posteriormente, para uma correlação fortemente positiva.

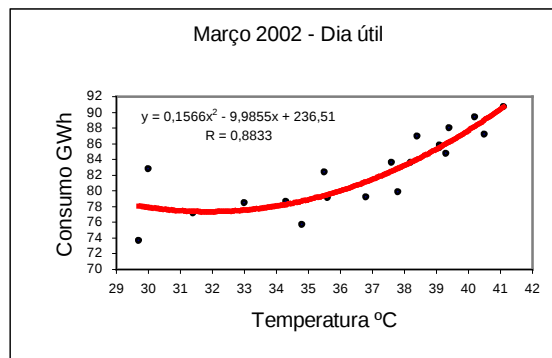


Figura nº 33

Uma análise mais detalhada do gráfico nº 36 mostra que aparentemente não há violação dos pressupostos, face ao posicionamento relativo entre a imagem dos pares ordenados e a curva (polinômio de 2ª ordem). Cabe, entretanto, uma verificação, semelhante à feita para a regressão linear.

Tabela nº 7

X	X quad.	Y observ.	Y prev.	Resíduos	Resíd.s padrão
29,70	882,09	73,68	78,10	-4,424630	-1,990084912
30,00	900,00	82,78	77,91	4,868964	2,189935392
31,40	985,96	77,13	77,40	-0,268892	-0,120940933
33,00	1.089,00	78,44	77,56	0,878500	0,395126834
34,30	1.176,49	78,61	78,29	0,323836	0,145653076
34,80	1.211,04	75,71	78,70	-2,990500	-1,345050412
35,50	1.260,25	82,35	79,42	2,923574	1,314948573
35,60	1.267,36	79,11	79,54	-0,430761	-0,193745138
36,80	1.354,24	79,17	81,16	-1,993030	-0,896413594
37,60	1.413,76	83,59	82,50	1,095972	0,492940272
37,80	1.428,84	79,90	82,86	-2,965905	-1,333987808
38,20	1.459,24	83,65	83,63	0,015449	0,006948518
38,40	1.474,56	86,93	84,03	2,896179	1,302627144
39,10	1.528,81	85,49	85,54	-0,055596	-0,025005648
39,10	1.528,81	85,84	85,54	0,298104	0,134079544
39,30	1.544,49	84,75	86,00	-1,254655	-0,564311625
39,40	1.552,36	88,02	86,23	1,786766	0,803641751
40,20	1.616,04	89,37	88,22	1,149259	0,516907378
40,50	1.640,25	87,15	89,02	-1,864059	-0,838405723
41,10	1.689,21	90,71	90,69	0,011422	0,005137311

Uma vez que os resíduos de Student são obtidos pela relação entre os resíduos padronizados e uma constante h e considerando que o *Microsoft Excel 2000* já calcula, pela ferramenta *Analisar Dados/Regressão*, os gráficos serão plotados considerando os resíduos padronizados como variável dependente.

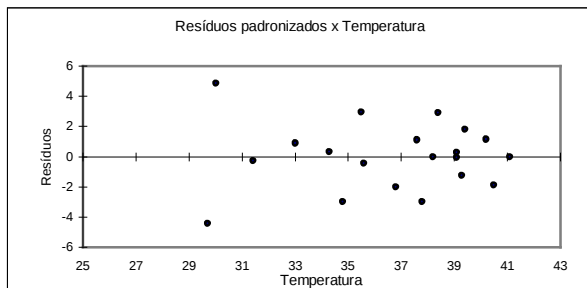


Figura nº 34

6.3. Avaliação dos pressupostos

6.3.1. Homocedasticidade

O pressuposto da Homocedasticidade pode ser avaliado pela análise da figura nº 34. Pode-se concluir que parece haver muito pouco ou quase nenhum padrão na relação entre resíduos e os valores de temperatura e de temperatura ao quadrado. Portanto, levando-se em consideração apenas esse pressuposto, pode-se concluir que o modelo de regressão curvilínea é apropriado para se prever o consumo de energia elétrica em função da temperatura máxima diária.

6.3.2. Normalidade

O pressuposto da normalidade da regressão é também avaliado através de uma análise de resíduos posicionando-os em uma distribuição de frequência e exibindo-se os resultados em um histograma.

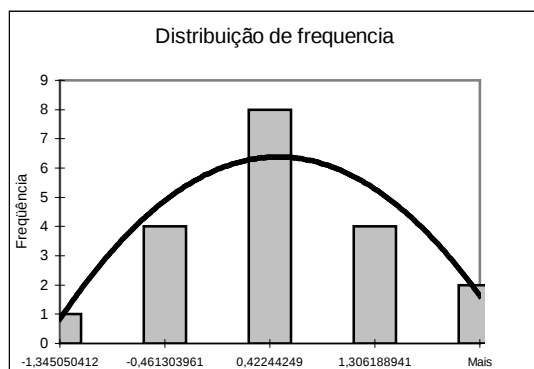


Figura nº 35

Da mesma maneira que observado para a regressão linear, é muito difícil analisar o pressuposto da normalidade para

uma amostra de somente 20 observações. Entretanto, observa-se no gráfico nº 35 que os dados parecem ter o formato aproximado de um sino podendo-se concluir que não existe evidência preponderante de violação do pressuposto da normalidade.

6.3.3. Independência

O pressuposto da independência pode ser avaliado pela análise do gráfico dos resíduos versus a data sequencial em que os mesmos foram observados. Os dados coletados ao longo de um período de tempo geralmente apresentam um efeito de autocorrelação entre observações sucessivas. Isto é, existe correlação entre uma determinada observação e o valores que a antecedem ou que lhe sucedem. Esses padrões que violam o pressuposto da independência, são prontamente aparentes no gráfico dos resíduos em relação ao tempo em que eles foram coletados.

Tabela nº 8

Data	Dia	Temp.	Observ.	Previsto	e
Mar-01	SEX	36,80	79,17	81,12	-1,94698
Mar-04	SEG	35,60	79,11	79,49	-0,38788
Mar-05	TER	37,80	79,90	82,81	-2,91714
Mar-06	QUA	38,20	83,65	83,58	0,06532
Mar-07	QUI	39,30	84,75	85,95	-1,20168
Mar-08	SEX	39,10	85,49	85,49	-0,00320
Mar-11	SEG	37,60	83,59	82,45	1,14418
Mar-12	TER	39,10	85,84	85,49	0,35050
Mar-13	QUA	39,40	88,02	86,18	1,84002
Mar-14	QUI	38,40	86,93	83,98	2,94660
Mar-15	SEX	35,50	82,35	79,38	2,96620
Mar-18	SEG	40,50	87,15	88,96	-1,80760
Mar-19	TER	40,20	89,37	88,16	1,20484
Mar-20	QUA	41,10	90,71	90,64	0,06966
Mar-21	QUI	30,00	82,78	77,89	4,89850
Mar-22	SEX	29,70	73,68	78,08	-4,39574
Mar-25	SEG	33,00	78,44	77,53	0,91490
Mar-26	TER	31,40	77,13	77,37	-0,23624
Mar-27	QUA	34,30	78,61	78,25	0,36342
Mar-28	QUI	34,80	75,71	78,66	-2,94966

A simples observação da sequência de resíduos na tabela nº 8 evidencia a não existência de *autocorrelação*. Esta afirmação torna-se clara através da análise da figura nº 36 onde os resíduos são plotados na sequência da observação.

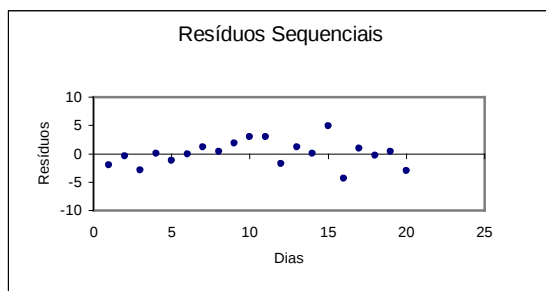


Figura nº 36

Outra maneira de se testar a existência de autocorrelação é através da estatística de *Durbin-Watson*. Essa estatística mede a correlação entre cada resíduo e o resíduo para o período de tempo imediatamente antecedente àquele de interesse. A estatística de *Durbin-Watson* (D_{DW}) é assim definida:

e_i = resíduo no período de tempo i

$$D_{DW} = \frac{\sum_{i=2}^n (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n e_i^2}$$

A análise da equação de *Durbin-Watson* possibilita o entendimento do que está sendo mensurado. O numerador, representa a diferença ao quadrado entre dois resíduos sucessivos, somados desde a segunda observação até a n ésima observação. O denominador representa a soma dos quadrados dos resíduos. Quando resíduos sucessivos são positivamente autocorrelacionados, o valor de D_{DW} irá se aproximar de 0. Se os resíduos não forem correlacionados, D_{DW} será próximo de 2.

A dificuldade na utilização da estatística de *Durbin-Watson* está em precisar o momento em que a autocorrelação é grande o suficiente fazendo com que D_{DW} se situe suficientemente abaixo de 2, causando assim, preocupação quanto à validade do modelo.

Para solucionar essa questão, *Durbin-Watson* elaboraram uma tabela relacionando nível de significância (α), tamanho da amostra (n) e número de variáveis independentes no modelo (p).

Tabela nº 9

Nível de Significância = 0,05				
	p=1		p=2	
N	di	ds	di	ds
15	1,08	1,36	0,95	1,54
16	1,10	1,37	0,98	1,54
17	1,13	1,38	1,02	1,54
18	1,16	1,39	1,05	1,53
19	1,18	1,40	1,08	1,53
20	1,20	1,41	1,10	1,54
21	1,22	1,42	1,13	1,54
22	1,24	1,43	1,15	1,54
23	1,26	1,44	1,17	1,54
....				

Analisando a tabela nº 9 observa-se que são exibidos dois valores para cada combinação de nível de significância, tamanho da amostra e número de variáveis independentes. Esses valores delimitam um intervalo sendo que, o limite inferior d_i , representa o valor crítico inferior abaixo do qual há evidências de correlação entre os resíduos. Já o segundo valor, d_s representa o valor crítico superior de D_{DW} , acima do qual concluiremos que não há evidências de autocorrelação. Caso D_{DW} se situe entre esses valores, não se pode tirar uma conclusão definitiva.

Tabela nº 10

e_1	$e - e_1$	$(e - e_1)^2$	e^2
*	*	*	3,79075
-1,94698	1,55911	2,43082	0,15045
-0,38788	-2,52927	6,39720	8,50973
-2,91714	2,98246	8,89507	0,00427
0,06532	-1,26700	1,60529	1,44404
-1,20168	1,19849	1,43637	0,00001
-0,00320	1,14738	1,31648	1,30916
1,14418	-0,79368	0,62993	0,12285
0,35050	1,48952	2,21867	3,38569
1,84002	1,10658	1,22452	8,68248
2,94660	0,01960	0,00038	8,79834
2,96620	-4,77380	22,78917	3,26742
-1,80760	3,01244	9,07477	1,45163
1,20484	-1,13517	1,28862	0,00485
0,06966	4,82884	23,31766	23,99530
4,89850	-9,29424	86,38297	19,32257
-4,39574	5,31064	28,20294	0,83704
0,91490	-1,15114	1,32511	0,05581
-0,23624	0,59965	0,35958	0,13207
0,36342	-3,31308	10,97650	8,70052
$\Sigma =$		209,87	93,96

$$D_{DW} = \frac{209,87}{93,96} = 2,23$$

Desse modo, consultando a tabela nº 9 para os dados relativos ao consumo e temperatura dos dias úteis de março de 2002, com 20 observações, duas variáveis independentes temos que $2,23 > 1,54$. Pode-se então concluir que não existe *autocorrelação* entre os resíduos, viabilizando o modelo de regressão curvilínea adotado.

6.3.4. Teste de Significância

Uma vez assegurado de o modelo de regressão curvilínea é apropriado, deve-se verificar se existe relação significativa entre a variável dependente e o conjunto de variáveis explicativas. As hipóteses nula e alternativa podem ser assim equacionadas:

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = 0$$

$$H_1: \text{Pelo menos um } \beta_j < > 0$$

Essa hipótese nula pode ser testada com um teste F (utilizado para testar razão entre duas variâncias). A estatística F é igual ao quadrado médio devido à regressão ($QMReg$) dividido pelo quadrado médio devido à variação residual ($QMRes$).

$$F = \frac{QMReg}{QMRes}$$

rejeita-se H_0 no nível de dignificância α se $F > F_{S(p, n-p-1)}$; caso contrário não se rejeita H_0 .

P = número de variáveis explicativas no modelo de regressão

F = estatística de teste, a partir de uma distribuição F com p e $n-p-1$ graus de liberdade.

O *Microsoft Excel 2000* já calcula, pela ferramenta *Analisar Dados/Regressão*, os valores de $QMReg$ e $QMRes$ e, obviamente F , assim:

$$F = 30,17$$

Comparando com o valor de F crítico obtido para 95% de significância e respectivamente 2 e 17 graus de liberdade temos: $30,17 > 3,59$ aceitando assim, a hipótese de que existe relação entre consumo e temperatura.

7. CONCLUSÃO

Na regressão múltipla, desde que existam pelo menos duas variáveis explicativas, o *coeficiente de determinação múltipla* representa a proporção da variação em Y que é explicada pelo conjunto das variáveis explicativas selecionadas. Para dados com duas variáveis explicativas, o coeficiente de determinação múltipla $r^2_{y,12}$ pode ser

calculado pela relação entre a soma dos quadrados devido à regressão e a soma total dos quadrados.

$$r^2_{y,12} = \frac{SQReg}{STQ}$$

onde

$$SQReg = b_0 \sum_{i=1}^n Y_i + b_1 \sum_{i=1}^n X_{1i} Y_i + b_2 \sum_{i=1}^n X_{2i} Y_i - n\bar{Y}^2$$

$$STQ = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - n\bar{Y}^2$$

Estatística de regressão	
<i>R múltiplo</i>	0,883311
<i>R-Quadrado</i>	0,780238
<i>R-quadrado ajustado</i>	0,754384
<i>Erro padrão</i>	2,350486
<i>Observações</i>	20

Este coeficiente de determinação múltipla, calculado como 0,780238, pode ser interpretado de modo a significar que, a partir da amostra, 78 % da variação no consumo de energia elétrica para um dia útil podem ser explicados pela relação curvilínea entre consumo e temperatura atmosférica máxima diária.

Quando o modelo ajustado é de *regressão linear*, utiliza-se uma taxa de variação (constante) para a variável dependente (Y), para cada variação unitária da variável explicativa (X). Para a *regressão curvilínea* que foi adotada como modelo para explicar a variação do consumo de energia elétrica em função da temperatura máxima diária, para dias úteis no Rio de Janeiro, o incremento no consumo para cada incremento unitário (1°C) na temperatura máxima diária, também é variável.

Por esse motivo foi elaborada a tabela nº 11 que apresenta, para o intervalo de temperatura compreendido entre 33 °C e 42 °C, os valores previstos de consumo de energia elétrica em MWh, os incrementos unitário e acumulado por faixa de temperatura, que objetiva facilitar a interpretação das grandezas.

Visando também a comparação com outros sistemas e/ou empresas, foram inseridas as colunas contendo as mesmas variações (unitária e acumulada) em $MW_{médios}$ e para a *Demanda em MW*, considerando, para essa grandeza, o Fator de Carga de 0,93 calculado anteriormente para a curva de carga característica de verão no Rio de Janeiro.

Tabela 11

°C	MWh	Diferença (MWh)		Variação no consumo		Variação na Demanda	
30	77.885,00	Por °C	Acumulada	MWmed	Acumulado	MW	Acumulado
31	77.452,10						
32	77.332,40						
33	77.525,90						
34	78.032,60	506,70	506,70	21,11	21,11	22,70	22,70
35	78.852,50	819,90	1.326,60	34,16	55,27	36,73	59,44
36	79.985,60	1.133,10	2.459,70	47,21	102,49	50,77	110,20
37	81.431,90	1.446,30	3.906,00	60,26	162,75	64,80	175,00
38	83.191,40	1.759,50	5.665,50	73,31	236,06	78,83	253,83
39	85.264,10	2.072,70	7.738,20	86,36	322,42	92,86	346,69
40	87.650,00	2.385,90	10.124,10	99,41	421,84	106,90	453,59
41	90.349,10	2.699,10	12.823,20	112,46	534,30	120,93	574,52
42	93.361,40	3.012,30	15.835,50	125,51	659,81	134,96	709,48

A tabela nº 12 apresenta, para o mês de março de 2002, o consumo médio diário em $MW_{médios}$ de várias concessionárias de distribuição no País permitindo assim, comparações que evidenciam a importância desse estudo não só para a comercialização de energia elétrica, uma vez que se cogita a implantação de mercados futuros para a *commodity* energia elétrica, como também para a operação e manutenção do sistema elétrico.

Tabela nº 12

Empresa	MW _{médio}	Empresa	MW _{médio}
ELFSM	26	ENERSUL	302
CENF	28	CEMAT	343
EEVP	62	CEB	374
CAIUÁ	100	CELPA	384
CATLEO	102	COELCE	562
CEAL	181	ESCELSA	630
ENERGIPE	191	CELPE	713
SAELPA	212	CERJ	738
COSERN	276	COELBA	777

A análise de ambas as tabelas, para um dia útil no Rio de Janeiro, leva, entre outras, às seguintes conclusões:

- o aumento de 2 ° C (33°C para 35°C) representa em termos de incremento no *consumo*, aproximadamente 55 MW_{médios} o que supera o consumo médio diário das concessionárias ELFSM (Colatina-ES) e CENF (Nova Friburgo-RJ);
- a variação positiva de 9 °C (33° C para 42°C) representa, em termos de incremento no consumo, aproximadamente 660 MW_{médios}, consumo este superior ao verificado por 15 das 18 empresas relacionadas na tabela nº 22.
- Em termos de demanda, o acréscimo é da ordem de 709 MW ($F_{c=0,93}$), superior à demanda máxima de Mato Grosso do Sul (500 MW) e Distrito Federal (640 MW) e, equivalente à 30 % da demanda máxima do estado do Paraná (Sistema Copel) e 50 % da demanda máxima da CERJ que atende à 66 municípios do Estado do Rio de Janeiro.

[1] Professores e Pesquisadores da EFEL. **Conservação de Energia: eficiência energética de instalações e equipamentos**. Itajubá, MG: FUPAI, 2001. 467 p. ISBN 85-902115-1-7

[2] BELICO, Lineu dos Reis, SILVEIRA Semida (Orgs.) **Energia Elétrica para o Desenvolvimento sustentável**. São Paulo: EDUSP, 2000. 282 p. ISBN 85-314-0544-0

[3] FONSECA, Jairo Simon. MARTINS, Gilberto de Andrade. TOLEDO, Geraldo Luciano. **Estatística Aplicada**. 2 ed. São Paulo: Editora Atlas, 1985. 267 p. ISBN 85-224-1901-9

[4] LEVIN, Jack. **Estatística Aplicada a Ciências Humanas**. 2 ed. São Paulo: Editora Harbra, 1987. 392 p.

[5] LEVINE, David M., BERENSON, Mark L., STEPHAN, David. **Estatística: Teoria e Aplicações**. Rio de Janeiro: Editora LTC: 2000. 811 p. ISBN 0-13-095071-8

[6] KUME, Hitoshi. **Métodos Estatísticos para a Melhoria da Qualidade**. 3 ed. São Paulo: Editora Gente, 1993. 245 p. ISBN 85-85247-43-6

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS