

**INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS NOS PADRÕES DE
VARIABILIDADE DA CARGA DE ENERGIA ELÉTRICA E OFERTA
HIDROENERGÉTICA NO PAÍS**

Camila Silva Amaral¹ & Carlos Henrique Ribeiro Lima²

RESUMO - Variáveis climáticas são fatores determinantes na variabilidade da carga de energia elétrica e oferta hidroenergética no Brasil, afetando diretamente a gestão de recursos hídricos no país. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da temperatura, precipitação e umidade nos padrões diário, mensal e anual de carga de energia elétrica ao longo do país assim como na energia natural afluyente mensal e anual nas regiões que compõem o sistema hidroelétrico nacional. Os resultados mostraram que o maior impacto da temperatura diária na carga de energia ocorre nas regiões norte, nordeste e sudeste/centro-oeste durante os meses de julho a setembro, sendo que na região sul a variabilidade diária de umidade mostrou-se como fator mais importante. Na escala mensal, o aumento da temperatura levou a um aumento da carga em todos os locais com exceção da região norte, que apresentou um baixa amplitude térmica. Na escala anual, foram removidas tendências das séries e não foram observadas influências significativas da temperatura diária média anual na carga média de energia elétrica. Os dados mensais e anuais de energia natural afluyente mostraram-se pouco sensíveis a variações na temperatura mas bastante correlacionados com o total anual precipitado, particularmente na região sul.

ABSTRACT - Climate variables are key factors to determine the variability of the energy load and hydroenergy supply in Brazil, directly affecting the water resources management in the country. Here we evaluate the influence of temperature, precipitation and humidity on the daily, monthly and annual patterns of electrical energy load as well as on the monthly and annual hydroenergy inflow across the regions of the hydropower system. The results show that the major impact of the daily temperature on the energy load takes place in the North, Northeast and Southeast-Center west regions during the July-September period, whereas in the South region the daily variability of humidity was the most important factor. On the monthly scale, the increase in the temperature led to an increase in the load in all regions but north, which showed a low temperature range. On the annual scale, after removing temporal trends in the series we did not observe any influence of the annual mean daily temperature on the average electrical energy load. The monthly and annual data of natural energy inflow did not show any sensibility to changes in the temperature but were well correlated with the annual rainfall, particularly in the South region.

Palavras-chave: carga de energia elétrica, influência climática, oferta hidroenergética.

1) Estudante de Graduação. Engenharia Ambiental. Universidade de Brasília. E-mail: camiila_amarall@hotmail.com.

2) Prof. Adjunto. Depto. de Eng. Civil e Ambiental. Universidade de Brasília. E-mail: chrlima@unb.br.

1 - INTRODUÇÃO

Com um grande parque de usinas hidroelétricas responsáveis por aproximadamente 80% da capacidade elétrica instalada no país, o Brasil ostenta uma matriz energética praticamente renovável e com baixo impacto ambiental no que se refere a emissão de gases poluentes da atmosfera. Entretanto, como a produção hidroelétrica é diretamente proporcional ao nível de água dos reservatórios de acumulação e à vazão turbinada, a disponibilidade futura dessa energia torna-se extremamente dependente da variabilidade climática. Somado a isso, tem-se a influência da variabilidade climática, particularmente relacionada a temperatura, nos padrões de consumo de energia elétrica. Por exemplo, sabe-se que verões com temperaturas acima da média tendem a aumentar a demanda por energia elétrica em praticamente todos os setores da sociedade. Num contexto de mudanças climáticas globais, crescente aumento da demanda energética e limitações na disponibilidade hídrica, torna-se imprescindível o conhecimento científico de como a variabilidade climática afeta os padrões de demanda e oferta hidroenergética no país e como esse entendimento pode auxiliar na operação do sistema com máxima eficiência e numa melhor gestão dos recursos hídricos. Nesse sentido, este trabalho busca investigar o efeito da variabilidade climática, particularmente da temperatura, umidade e precipitação, na demanda por energia elétrica e na afluência hidroenergética ao longo do país em diversas escalas temporais, objetivando a construção de conhecimentos que possibilite o desenvolvimento e aperfeiçoamento de modelos de previsão de consumo e oferta hidroenergética que auxiliem no planejamento operacional e de expansão do sistema hidroelétrico nacional.

A variabilidade climática tende a ter uma significativa influência nos padrões de carga (consumo médio) de energia elétrica ao longo do país. Por exemplo, para o verão, em que se observa o domínio de altas temperaturas, é acionada uma maior quantidade de equipamentos de ar condicionado, que requerem grande quantidade de energia elétrica na otimização de seu funcionamento, afetando assim todos os setores da sociedade: privado, indústria, comércio e governamental. Os efeitos mais significativos na demanda podem ser observados nas grandes cidades, quando o aumento da temperatura no verão, somado às suas densidades populacionais, tornam-se responsáveis pela formação das ilhas de calor urbanas, agravando ainda mais o consumo de energia elétrica (Alves, 2008). Já no inverno, caracterizado pelo decaimento da temperatura, particularmente nas regiões sul e sudeste do país, existe a busca por equipamentos aquecedores que, assim como o ar condicionado, requerem grandes cargas elétricas destinadas à manutenção do conforto do metabolismo humano, que combina ótimas umidades relativas e temperaturas. Alves (2008), por exemplo, em estudos relativos ao ano de 2006, realizados em algumas capitais brasileiras, encontrou que os maiores índices de desconforto durante tal período concentram-se nos

três primeiros meses do ano. No entanto, para a região Norte, em especial, o índice de desconforto é constante ao longo do ano, o que se deve a elevada umidade da região em todas as estações, não as diferenciando em termos de conforto térmico.

Assim, uma melhor previsão da carga média de energia em cada região do país e por conseguinte a definição da energia a ser despachada em cada usina do sistema hidroelétrico é fator fundamental para uma melhor gestão dos recursos hídricos. Atualmente o Operador Nacional do Sistema (ONS), entidade responsável por definir as regras de operação do sistema hidroelétrico nacional interconectado, trabalha com o *software* ANNSTLF (Falco, 2005) para previsões de demanda de carga de curto prazo (horária e até 35 dias para frente), onde a temperatura diária aparece como uma das covariáveis do modelo. Entretanto, em virtude de ser desenvolvido com base em Redes Neurais Artificiais (Falco, 2005), o *software* ANNSTLF não apresenta as relações funcionais existentes entre a variável resposta (carga ou demanda por energia elétrica) e as covariáveis (temperatura e algumas outras), dificultando com isso uma melhor inferência sobre os parâmetros do modelo e eventualmente a construção de modelos mais robustos.

Da mesma forma, mudanças climáticas tendem a influenciar no padrões de oferta hidroenergética, visto que a produção dessa energia é diretamente proporcional aos níveis dos reservatórios hidroelétricos e portanto as vazões afluentes aos mesmos (veja por exemplo, Lucena, 2010; Lima *et al.*, 2007; Silva *et al.*, 2007). Pela sua extensão territorial, o Brasil está sujeito a diversas forçantes climáticas que podem levar a padrões diferentes de vazão entre as diversas regiões do país. Assim, o conhecimento científico de como esses padrões podem influenciar nos padrões de oferta hidroenergética é fundamental para uma melhor otimização da produção energética nas diferentes regiões e uma melhor gestão dos recursos hídricos, visto que as regras de operação definidas para os reservatórios hidroelétricos de múltiplos usos impactam diretamente no uso da água.

Nesse sentido, este trabalho buscar entender a sensibilidade dos padrões de carga elétrica diária nas diversas regiões do país com a mudanças nos padrões de temperatura e umidade e, a partir disso, definir relações funcionais que possam ser utilizadas na construção de modelos de previsão de carga em escala diária. Além disso, busca-se analisar a influência dessas variáveis climáticas, incluindo a precipitação, nos padrões de variabilidade mensal e anual de oferta hidroenergética e carga elétrica ao longo das regiões do país.

2 - DADOS HIDROCLIMÁTICOS E ENERGÉTICOS

Dados diários de temperatura, precipitação e umidade relativa do ar para 291 estações meteorológicas compreendendo o período Janeiro/1961 a Fevereiro/2012 são disponibilizados pelo

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A localização das estações utilizadas é apresentada na Figura 1. Para cada uma das estações meteorológicas, foi determinada a temperatura de bulbo seco média e máxima diária, a precipitação total diária e a umidade relativa média para o dia. Os valores diários para cada uma das regiões do país (Norte, Nordeste, Centro-Oeste/Sudeste e Sul) foram tomados como sendo a média simples dos valores diários de cada estação localizada na região. Falhas em dados das estações não foram nem preenchidos e nem considerados nos cálculos.

Valores médios anuais de temperatura média diária são mostrados na Figura 2. Uma tendência monotônica de aumento de temperatura é observada praticamente em todas as regiões, porém mais suave na região sul. Tendências similares são também observadas para a média anual das máximas diárias (não mostrado aqui).

Os dados de vazão média mensal para cada um dos principais reservatórios do sistema hidroelétrico interconectado (total = 64 reservatórios) são fornecidos pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) e compreendem o período 1931-2006. A localização dos reservatórios é mostrada na Figura 1. A partir desses dados, os valores mensais de energia natural afluyente média (M_{wmed}) para cada uma das regiões do país foram determinados pela formulação:

$$E_i(j) = \sum_k \delta_{ik} \gamma Q_k(j) h_k \quad (1)$$

onde $j = 1, \dots, 12$ refere-se ao mês, $i=1, \dots, 4$ a região em estudo, $Q_k(j)$ a afluência média em m^3/s ao reservatório k ($k = 1, \dots, 64$) no mês j , γ é o peso específico da água, h_k é a queda hidráulica média do reservatório k e $\delta_{ik} = 1$ se o reservatório j está localizado na região i , e $\delta_{ik} = 0$ noutro caso.

Valores médios anuais de energia natural afluyente (em M_{wmed}) para cada uma das regiões são mostrados na Figura 3. Devido ao grande número de reservatórios hidroelétricos localizados na região sudeste, a mesma apresenta os maiores valores de energia afluyente, com uma leve tendência monotônica de crescimento ao longo dos anos. Nas demais regiões não existem evidências significativas de tendências monotônicas.

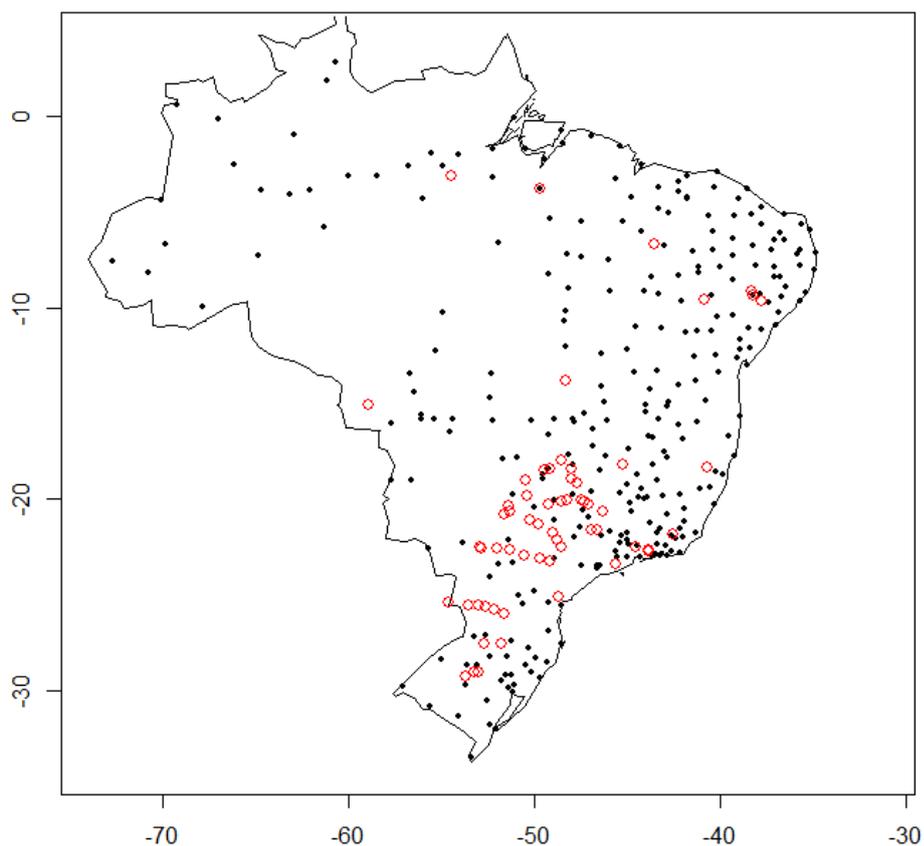


Figura 1 – Localização das estações meteorológicas (pontos pretos) e reservatórios (círculos vermelhos) para cálculo da energia natural afluyente utilizados neste trabalho.

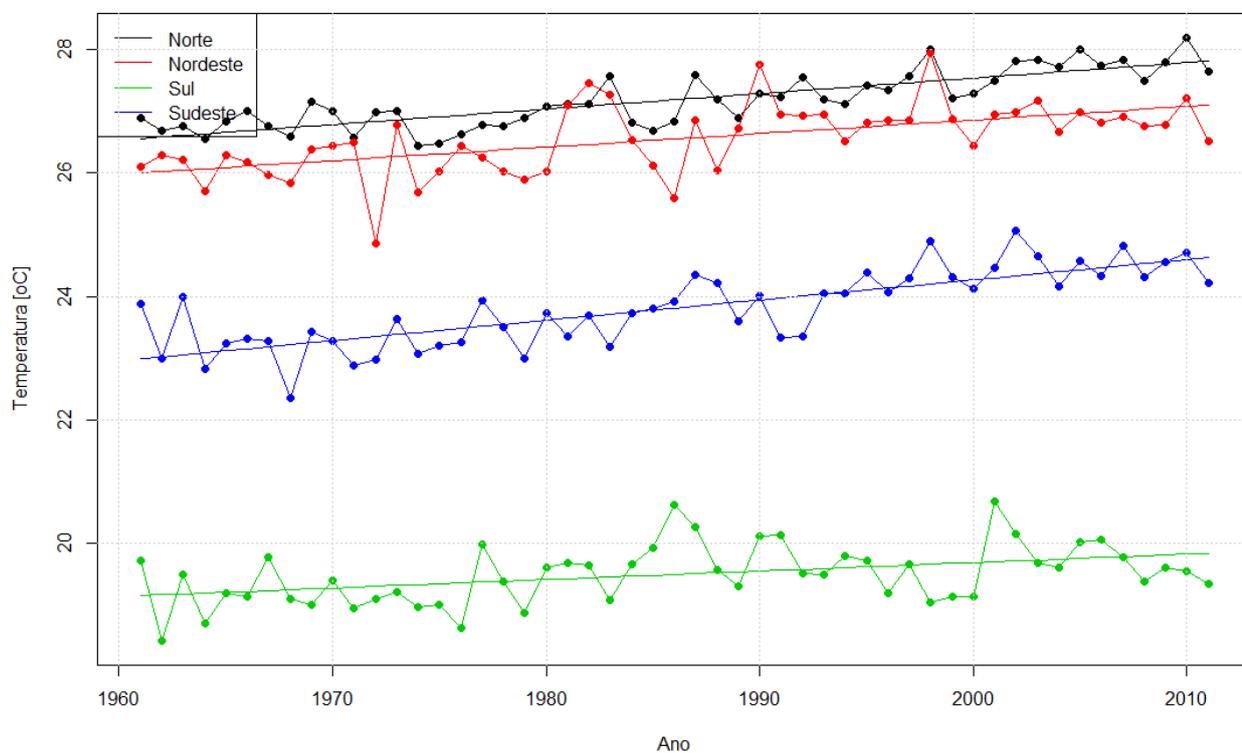


Figura 2 – Média anual da temperatura média diária para cada uma das regiões do país. As linhas sólidas mostram uma curva de ajuste linear aos dados.

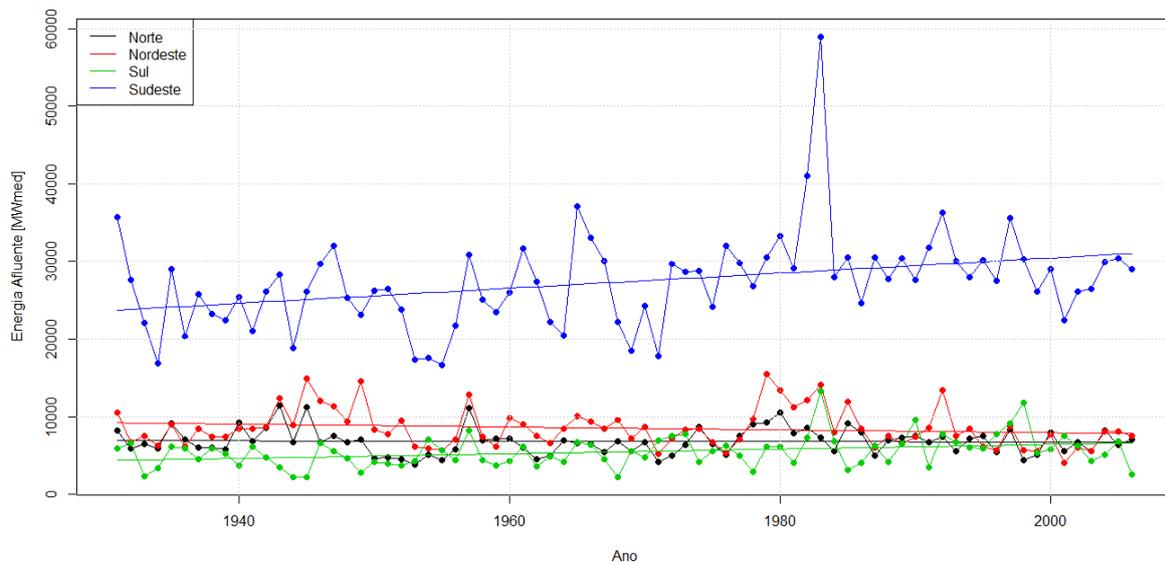


Figura 3 – Média anual da energia natural afluente para cada uma das regiões do país. As linhas sólidas mostram uma curva de ajuste linear aos dados.

Dados de carga de energia elétrica diária (demanda média diária de energia elétrica), assim como valores médios mensais e anuais para cada uma das regiões que compõem o sistema hidroelétrico brasileiro interconectado são fornecidos pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Os dados diários compreendem o período 03/08/2005 a 16/02/2012, enquanto os dados mensais cobrem o período janeiro/2000 a maio/2012 e os anuais vão de 1992 a 2012 (média de janeiro a maio). A evolução temporal da carga de energia mensal é mostrada na Figura 4. Como esperado, uma tendência monotônica de crescimento aparece em todas as regiões. A redução na demanda durante a crise energética de 2001 pode também ser visualizada no gráfico. Devido a grande população e ao maior parque industrial, a região sudeste apresenta a maior carga energética.

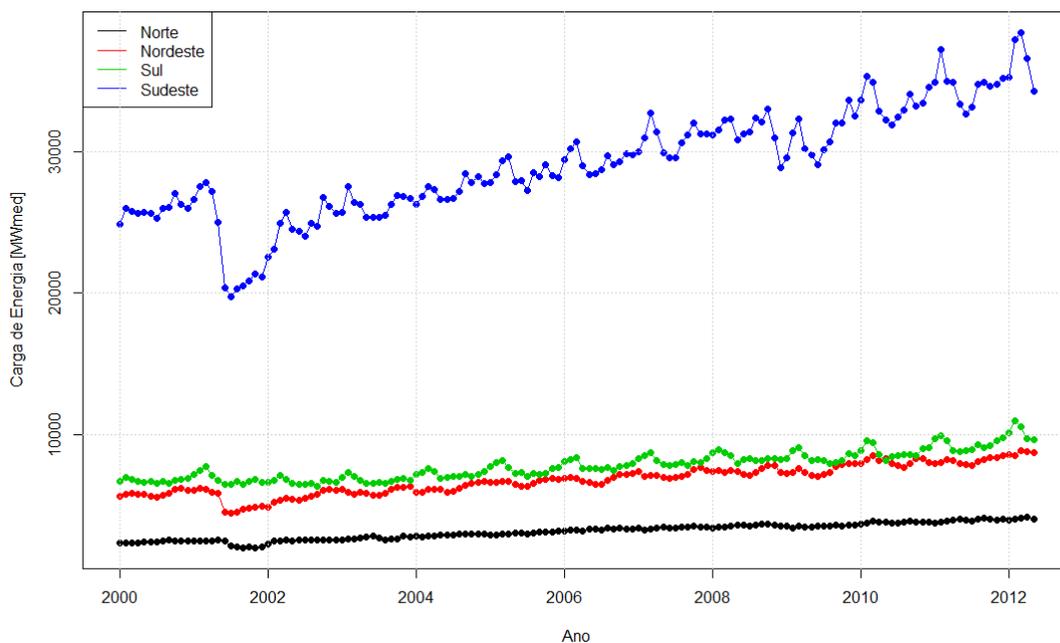


Figura 4 – Carga de energia mensal em [MWmed].

3 – RESULTADOS

3-1 Influência das variáveis hidroclimáticas na carga de energia diária

A influência da temperatura média diária na carga de energia diária de cada uma das regiões estudadas pode ser visualizada no gráfico de dispersão mostrado na Figura 5. Apesar da dispersão dos dados, com exceção da região norte, todos os valores obtidos para o coeficiente de correlação linear de Pearson são estatisticamente significantes ao nível de significância de 5%. Os resultados para a temperatura diária máxima são similares aos mostrados na Figura 5.

Entretanto, uma análise mais detalhada dos dados diários de carga mostra tendências monotônicas (Figura 6) que tendem a influenciar qualquer análise comparativa com a temperatura, que não apresenta tendências monotônicas mas uma sazonalidade (não mostrado). Dessa forma, analisou-se os mesmos dados após remoção das tendências mostradas na Fig. 6 e separadamente para os meses de verão (janeiro-março) e inverno (julho-setembro). Ademais, selecionou-se dados de carga de energia apenas para os dias da semana (segunda-feira a sexta-feira) com intuito de focar nos padrões que ocorrem nesses dias. Os resultados para o verão são apresentados na Figura 7. Em contraste com a Fig. 6, os valores de correlação tendem a diminuir (com exceção da região norte), mostrando que dentro da estação a sensibilidade da carga de energia à temperatura não é tão elevada, particularmente na região sul. Para o período do inverno (Figura 8), uma maior sensibilidade é verificada em todas os locais com exceção da região sul. Uma análise para os dados de temperatura máxima diária (não mostrados aqui) apresentou resultados similares.

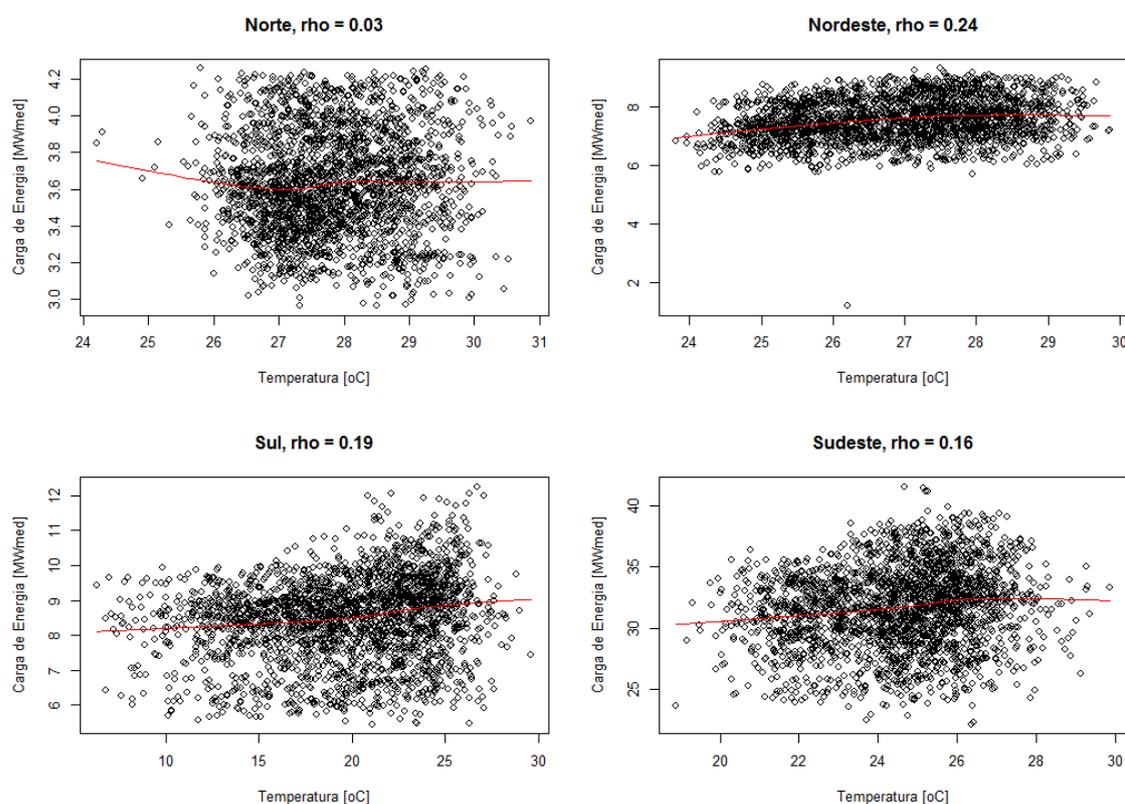


Figura 5 – Carga de energia diária como função da temperatura diária. “rho” indica correlação.

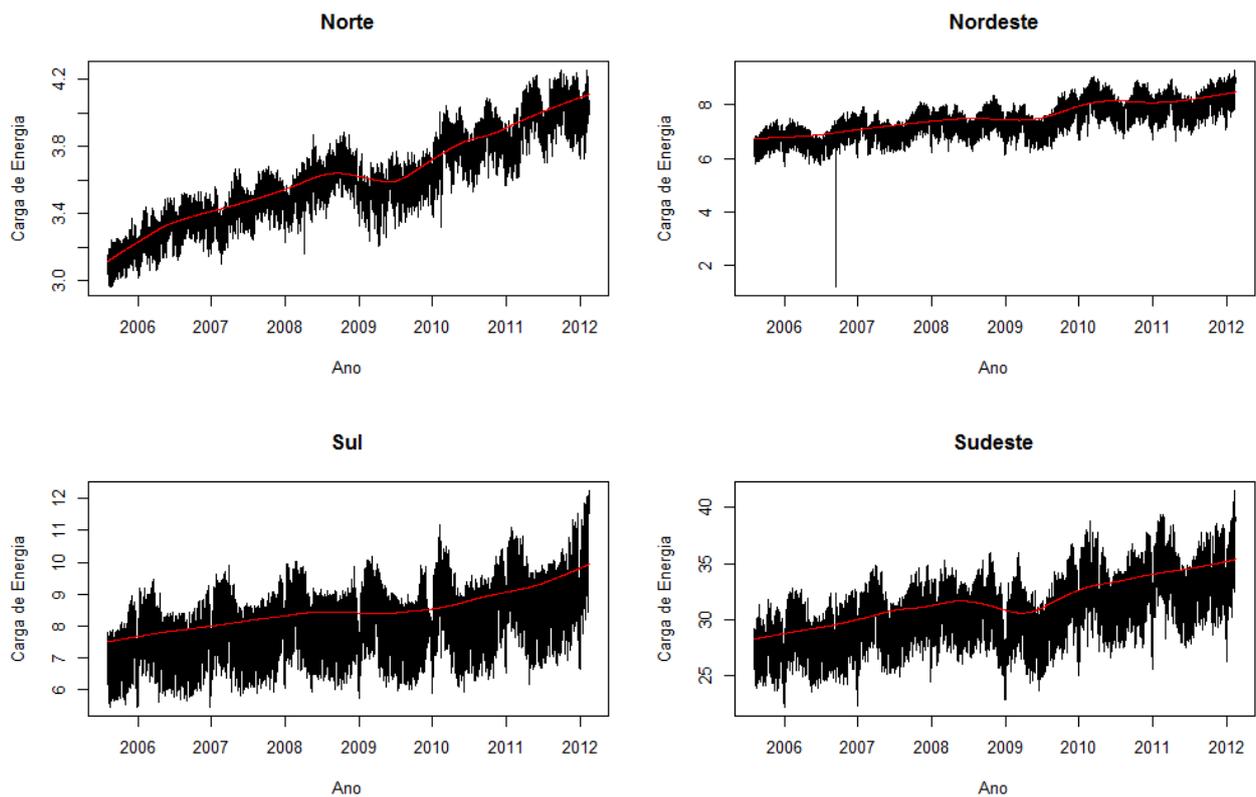


Figura 6 – Carga de energia diária para cada uma das regiões. As linhas vermelhas mostram o melhor ajuste de uma linha de tendência baseado em regressão LOESS.

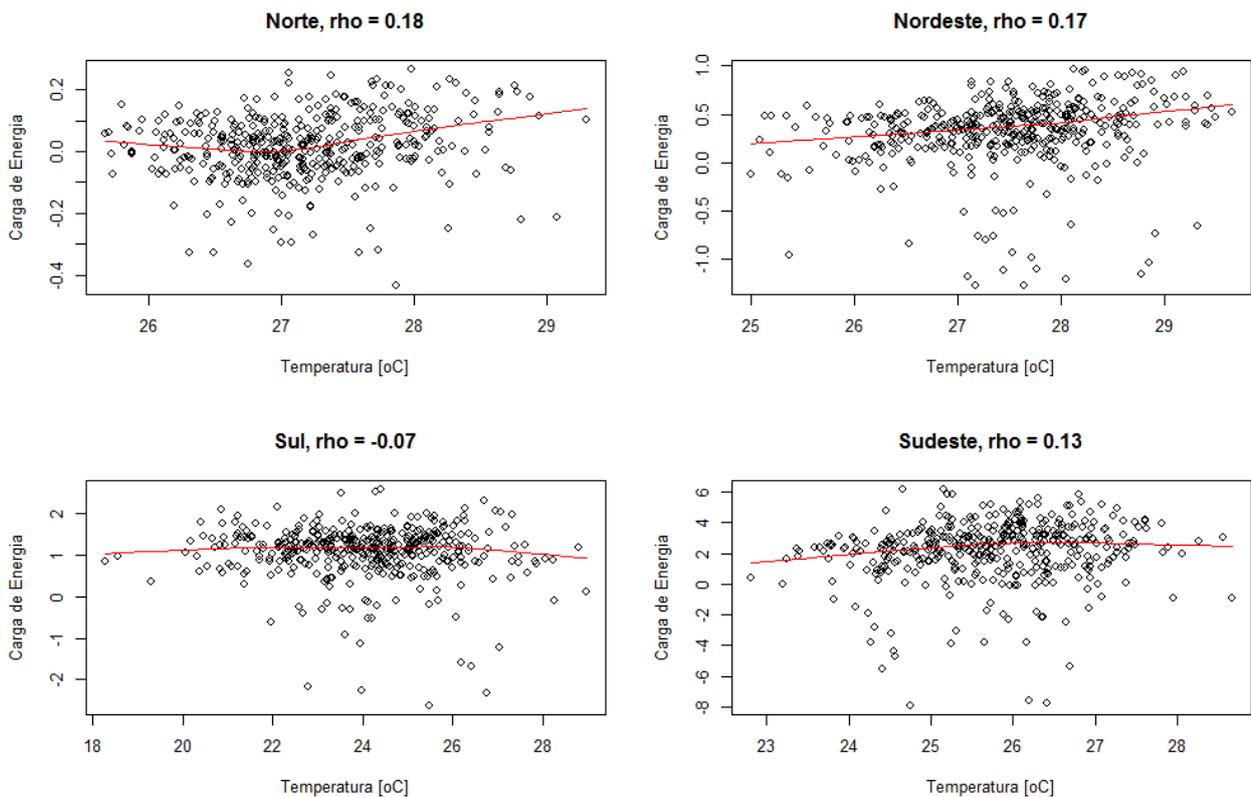


Figura 7 – Temperatura média diária versus carga de energia (após eliminação das tendências mostradas na Figura 6) para os dias da semana durante os meses de janeiro-março do período 2006-2012.

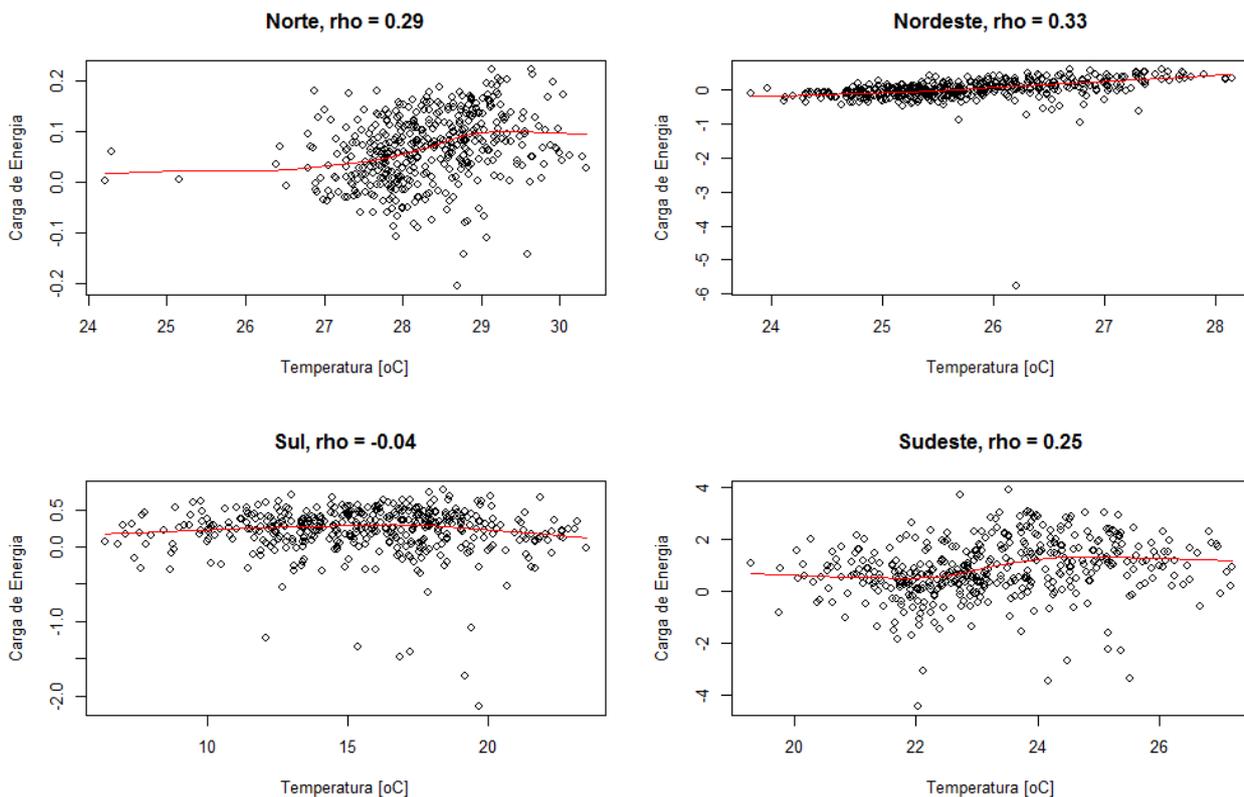


Figura 8 – Como na Figura 7, mas para os meses de julho-setembro do período 2006-2012.

A umidade relativa como fator importante no desconforto térmico e na demanda de energia pode ser observado nas Figura 9 e 10, que mostram a relação entre a umidade relativa média diária sobre a demanda de energia para o verão e inverno, respectivamente. Interessante observar que durante o verão apenas a região sul tem uma sensibilidade para variações na umidade relativa. Já para os meses de inverno, a demanda de energia na região sul torna-se pouco sensível a variações na umidade relativa enquanto as demais regiões apresentam uma sensibilidade inversa, sendo que um aumento da umidade relativa tende a diminuir a demanda de energia. Uma possível explicação para tal padrão é possível a partir do conhecimento da relação entre temperatura e umidade e da premissa que o maior desconforto térmico (e portanto maior demanda por energia relacionado ao uso de condicionadores de ar) ocorre em situações de elevada temperatura e alta umidade em conjunto. Uma análise entre a correlação de temperatura média e umidade relativa média diárias mostrou que a região sul é a que apresenta o menor valor de correlação (-0,29) para o verão (norte = -0,88; nordeste=-0,86; sudeste=-0,83), indicando que existe uma maior probabilidade de ocorrerem situações de altas temperaturas e altas umidades em conjunto e portanto um maior desconforto térmico, o que justifica um aumento da demanda de energia conforme mostrado na Fig. 9. Já para os meses de inverno, ocorre uma pequena queda na correlação entre temperatura e umidade para as demais regiões (sul=-0,26; norte = -0,76; nordeste=-0,72; sudeste=-0,67), e possivelmente as correlações mostrada na Fig. 10 estão mais relacionadas ao efeito da temperatura na demanda de

energia (Fig. 8) e a existência de uma correlação entre temperatura e umidade, do que propriamente o efeito da umidade na demanda de energia.

A definição de índices de conforto levando em conta temperatura e umidade (como em Alves, 2008) não mostrou ganhos em termos de correlação com a demanda de energia. Da mesma forma, uma análise com dados de precipitação diária não mostrou correlações significativas.

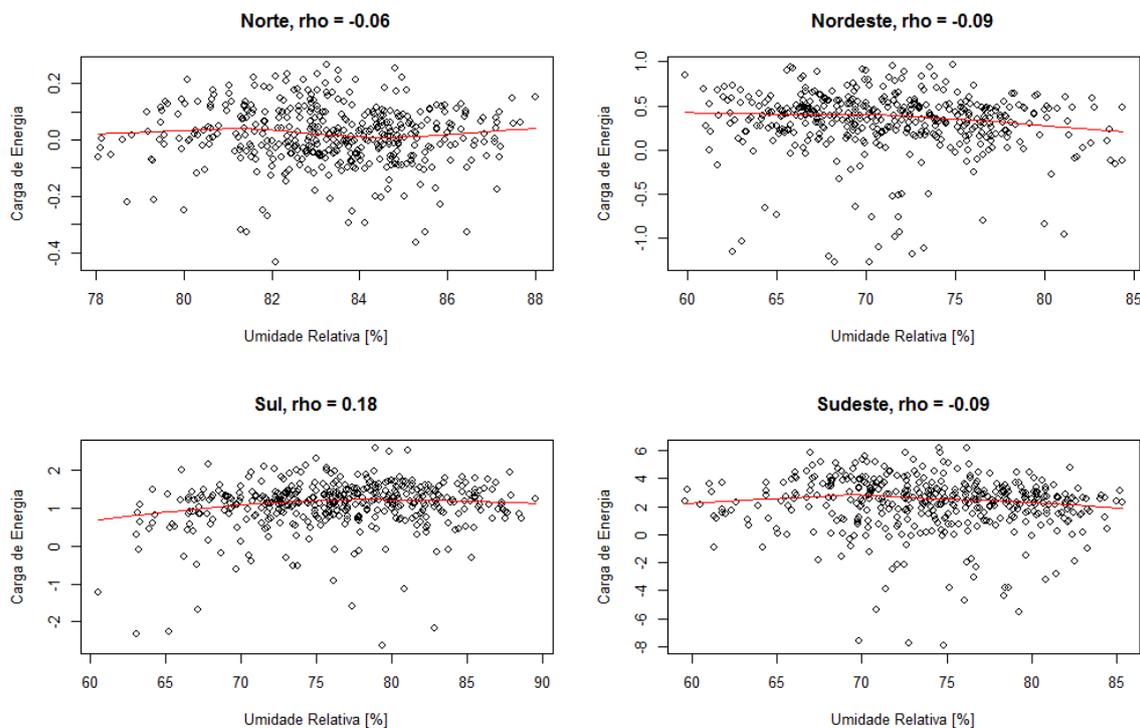


Figura 9- Como na Figura 7 (verão), mas para a umidade relativa média diária.

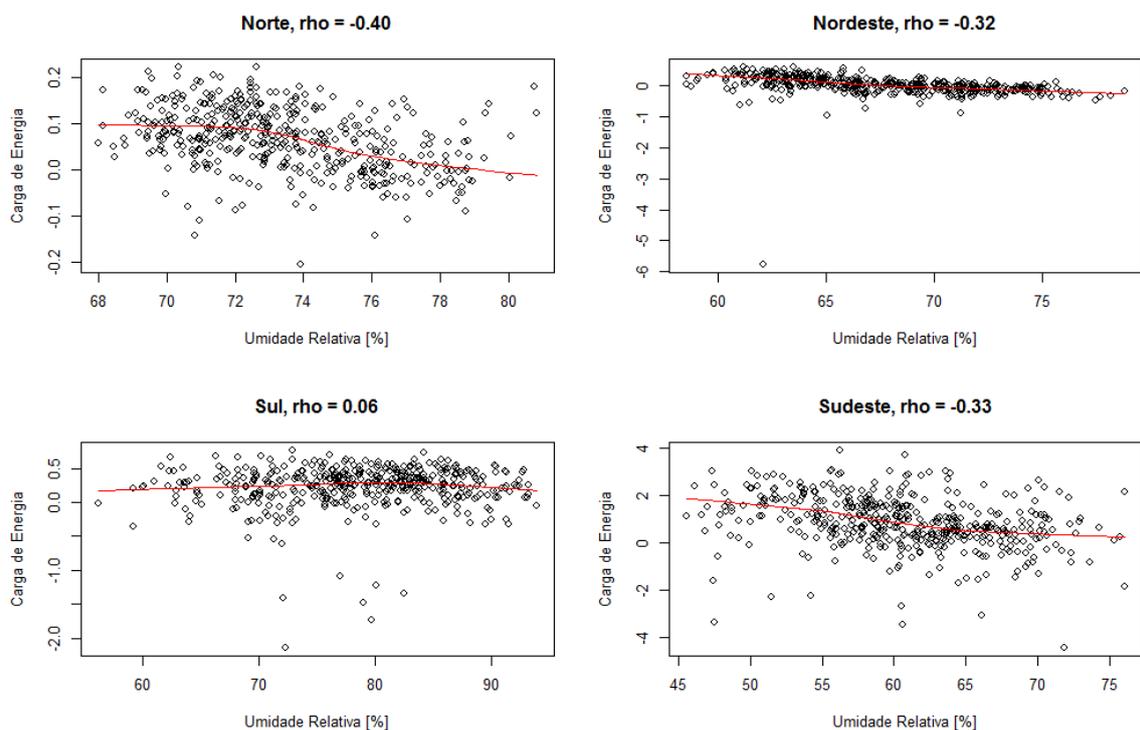


Figura 10- Como na Figura 8 (inverno), mas para a umidade relativa média diária.

3-2 Influência das variáveis hidroclimáticas na carga de energia mensal e anual

A influência da temperatura média diária mensal na demanda de energia média mensal para cada uma das regiões é mostrada na Figura 11. Com exceção da região norte, que apresenta pouca amplitude térmica, todas as outras regiões são sensíveis ao valor da temperatura média mensal, sendo que os meses mais quentes tendem a elevar a demanda de energia diferentemente em cada região. Resultados similares (não mostrados aqui) foram obtidos para a influência da média mensal das temperaturas máximas diárias sobre a demanda de energia mensal. A análise com os valores de umidade diária média mensal e total mensal precipitado não mostraram correlações significativas.

A relação entre a demanda de energia média anual e a temperatura diária média anual para o período 1992-2011 (após remoção de tendências monotônicas lineares em ambas as séries) não mostrou-se significativa, como pode ser observado na Figura 12. Isso se deve possivelmente ao fato que a variabilidade interanual da temperatura média diária é função de diversas mudanças intra- anuais e portanto de mudanças complexas nos padrões de demanda de energia média diária.

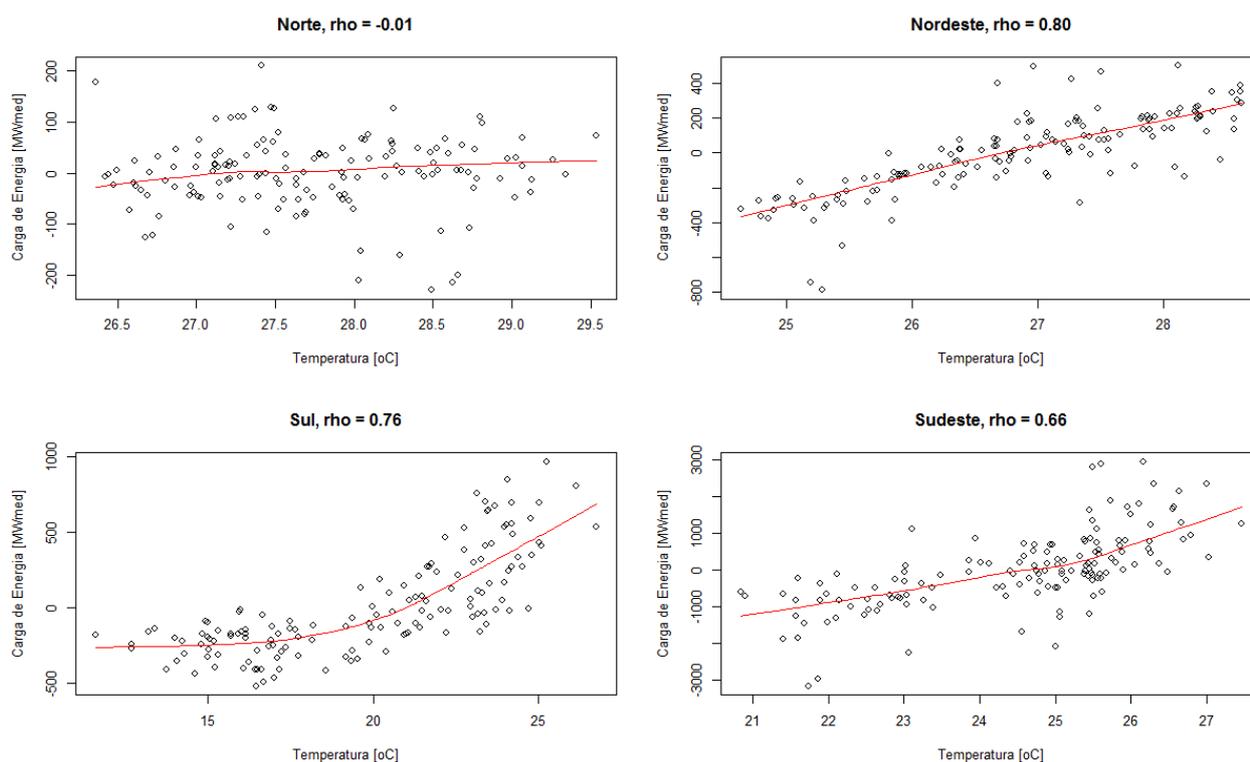


Figura 11 – Temperatura diária média mensal versus demanda de energia mensal após remoção da tendência monotônica como mostrado na Fig. 4.

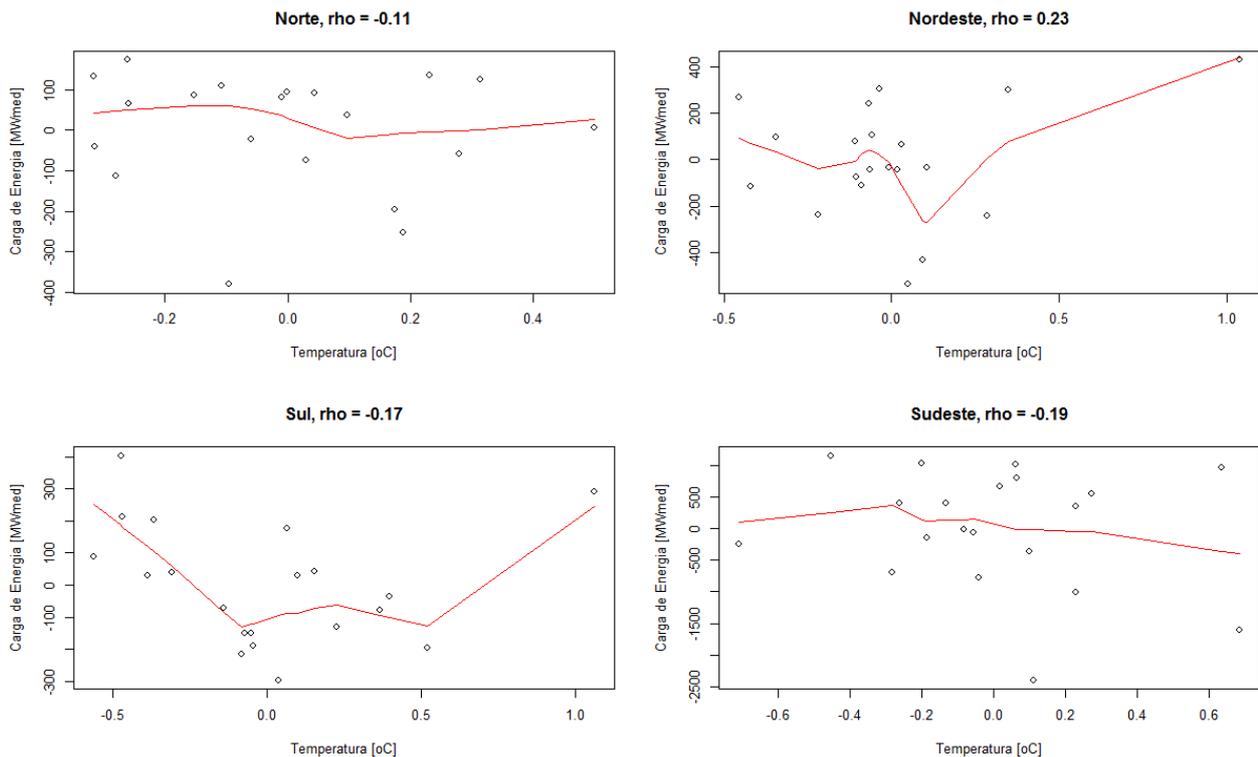


Figura 12 – Temperatura diária média anual versus demanda de energia anual após remoção das tendências monotônicas em ambas as séries.

3-3 Influência das variáveis hidroclimáticas nos padrões de afluência energética

A relação entre a temperatura diária média mensal e a afluência natural de energia média mensal para o período 1961-2006, após remoção do ciclo sazonal e tendências monotônicas para a temperatura e do ciclo sazonal para as afluências (tendências monotônicas não foram observadas), é pouco significativa, como pode ser observado na Figura 12. Por outro lado, o total precipitado no mês apresenta uma maior influência na energia natural afluente ao sistema, como pode ser observado na Figura 13. Particularmente nas regiões sul e sudeste, um aumento do total precipitado leva a um aumento na energia afluente, como esperado. Na região Nordeste isso fica pouco visível possivelmente pelo fato do total precipitado ter sido a média espacial de chuva diária ao longo de todo Nordeste, enquanto a energia natural afluente é basicamente uma função exclusiva do total precipitado sobre a Bacia do Rio São Francisco, que possui padrões de precipitação diferentes daqueles observados em outras regiões do Nordeste.

O total anual precipitado também mostra significativas correlações com a energia natural afluente média, como pode ser observado na Figura 14, particularmente para a região Sul. Já para a temperatura diária média anual, a energia natural afluente mostrou-se pouco sensível, como é mostrado na Figura 15.

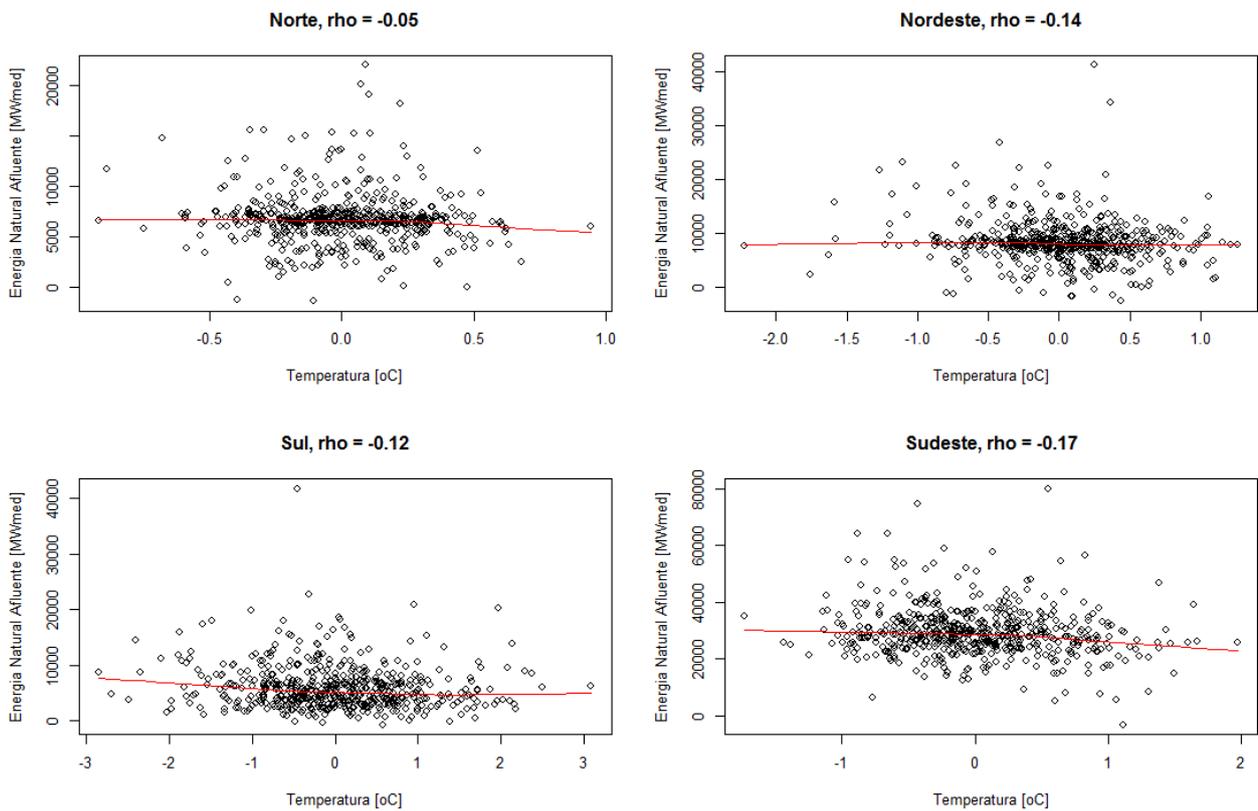


Figura 12 – Temperatura diária média mensal (após remoção do ciclo sazonal e tendências monotônicas via LOESS) versus energia natural afluente média mensal (após remoção do ciclo sazonal).

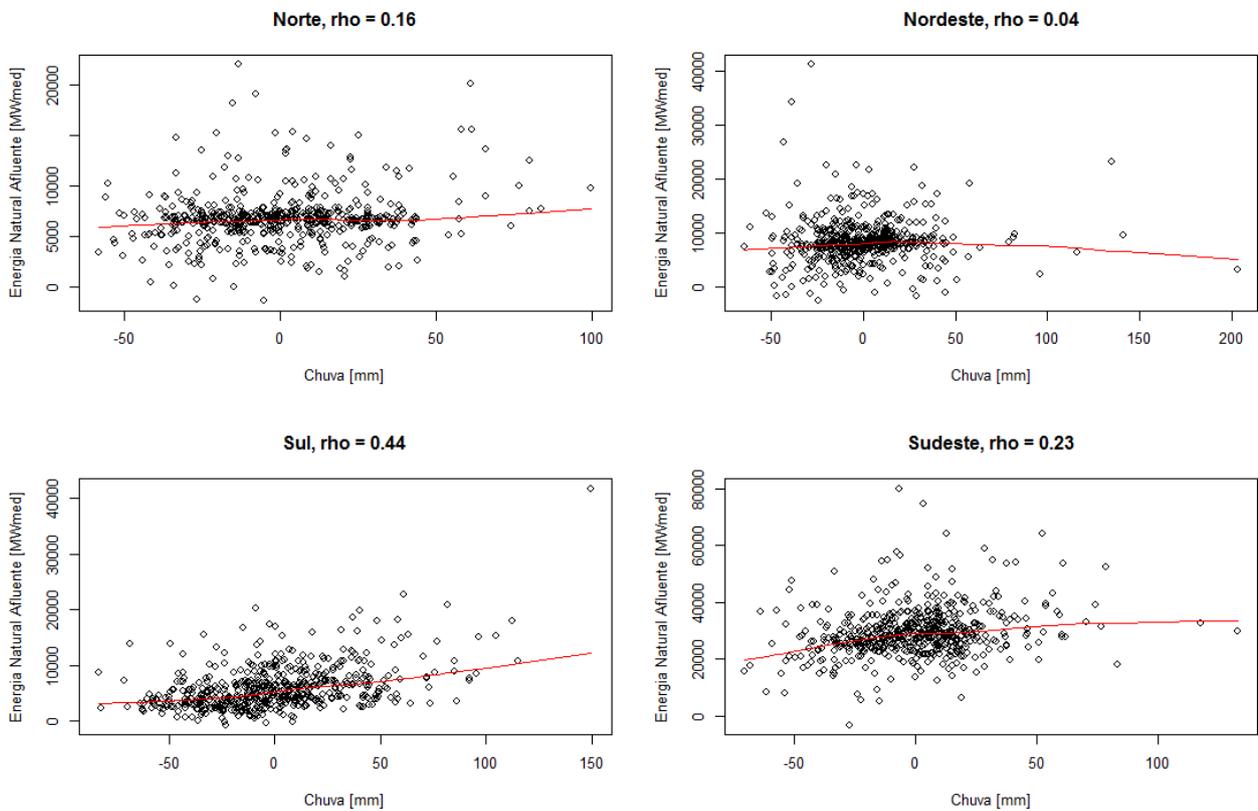


Figura 13 – Total precipitado mensal (após remoção do ciclo sazonal e tendências monotônicas via LOESS) versus energia natural afluente média mensal (após remoção do ciclo sazonal).

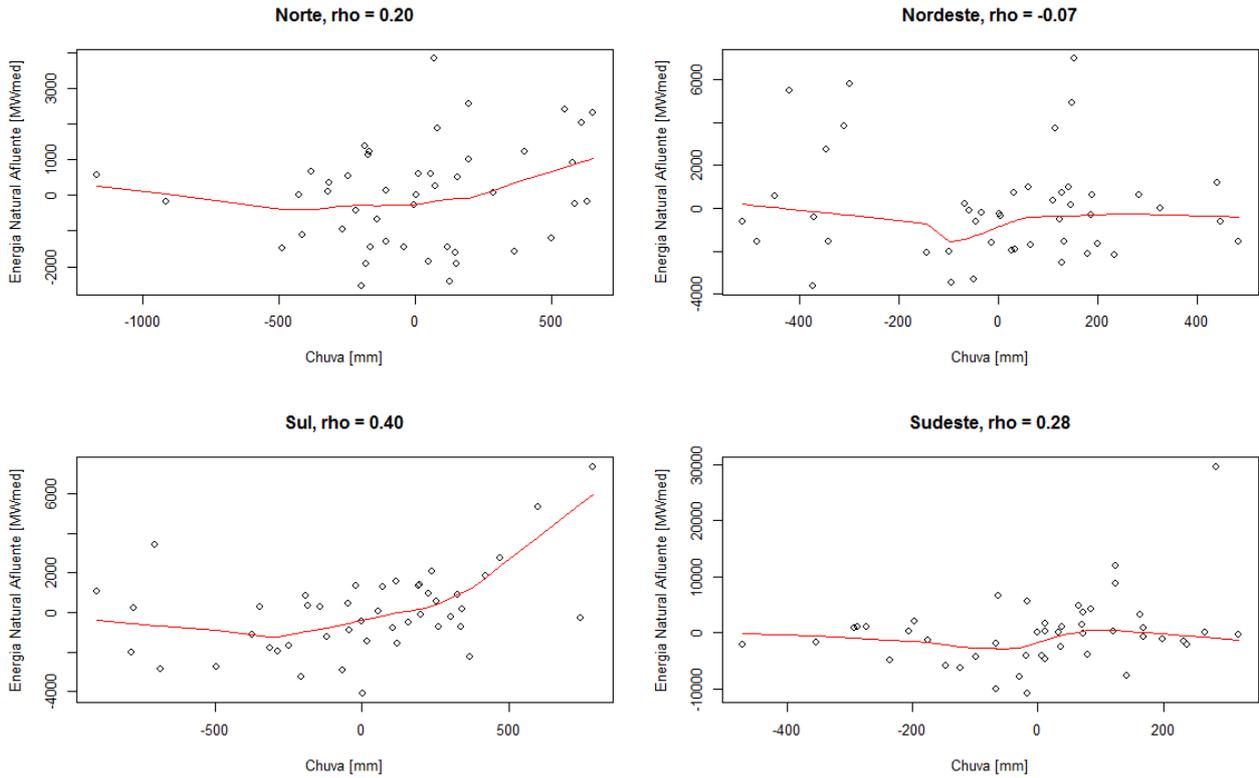


Figura 14 – Total precipitado anual (após remoção de tendências lineares) versus energia natural afluente média anual (após remoção de tendências lineares).

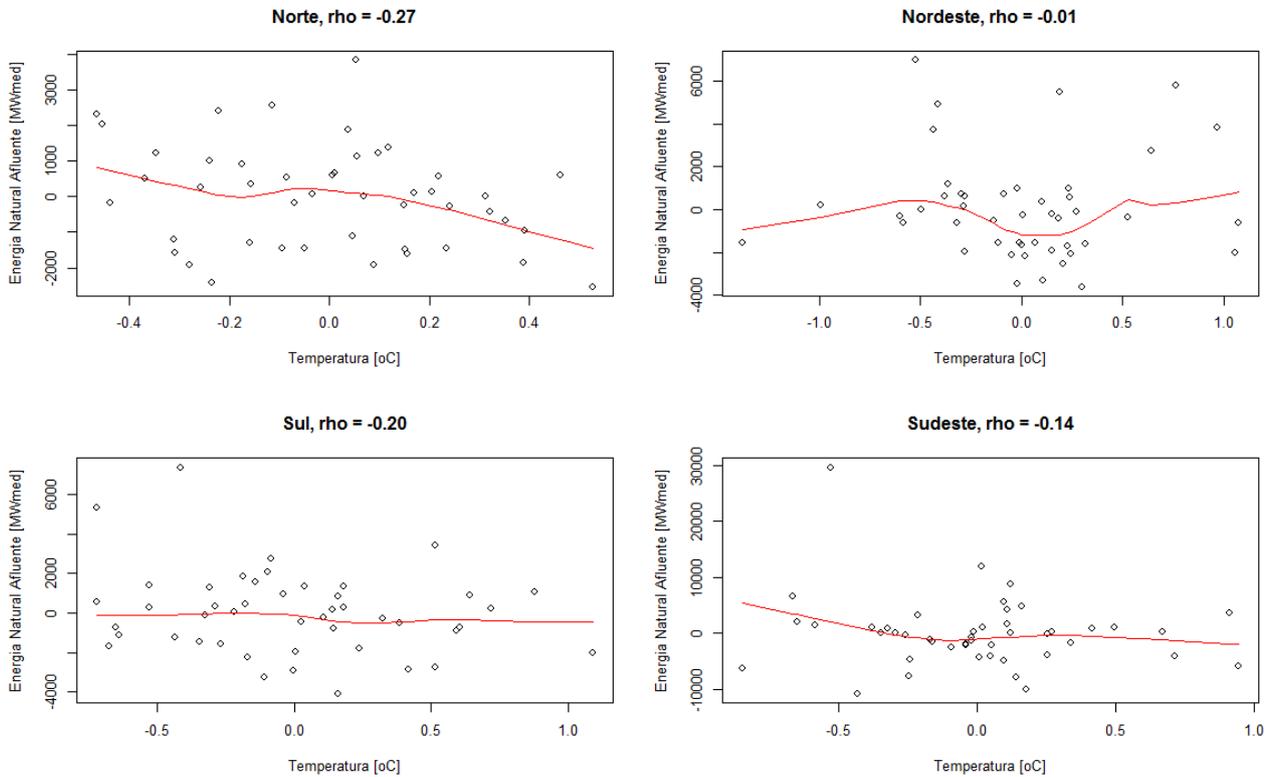


Figura 15 – Temperatura diária média anual (após remoção de tendências lineares) versus energia natural afluente média anual (após remoção de tendências lineares).

4 – CONCLUSÕES

Analisou-se aqui dados diários, mensais e anuais de temperatura, umidade e precipitação e a influência dos mesmos na carga de energia e nas afluências ao sistema hidroelétrico nacional. Observou-se que a variabilidade diária da temperatura é influente na demanda de energia nas regiões norte, nordeste e sudeste/centro-oeste particularmente no período julho-setembro. O aumento da carga de energia diária na região sul mostrou-se mais sensível ao aumento da umidade relativa, que tende a estar pouco correlacionada com a temperatura nessa região. Nos demais locais a influência da umidade pode estar mais ligada a relação entre essa variável e a temperatura. Não foram observadas influências devido à variabilidade da precipitação diária.

Na escala mensal, evidencia-se uma maior carga de energia nos meses com maior temperatura (verão ou período janeiro-abril). A relação entre temperatura e carga tende a ser linear e num maior grau de associação na região nordeste, enquanto nas regiões sul e sudeste a relação tende a ser exponencial. Esses padrões não refletem porém na relação entre a temperatura média anual e a carga média de energia anual, que tende a ser difusa e não existir. Assim, tendências monotônicas de aumento na temperatura (devido ao aquecimento global, por exemplo) média anual não são, sozinhas, suficientes para determinar o impacto na carga média de energia, sendo necessário avaliar como essa tendência de aumento se distribui ao longo das estações do ano e nas regiões do país.

A energia natural afluente aos reservatórios hidroelétricos do país mostrou-se também pouco sensível à variação da temperatura média mensal e anual, sendo observada uma maior influência em virtude da variação no total precipitado, particularmente na região sul. Assim, num cenário de mudanças climáticas globais, a influência da temperatura nos padrões de precipitação sobre o país passa a ser o fator mais importante na determinação da afluência energética, não estando claro se as potenciais mudanças nos padrões de evapotranspiração devido ao aumento da temperatura tem algum efeito significativo na disponibilidade futura de energia hidroelétrica.

Assim, espera-se que esses resultados possam dar subsídios a melhores projeções futuras de carga de energia elétrica e oferta hidroenergética no país considerando mudanças climáticas globais, particularmente um aumento da temperatura global média. Trabalhos futuros podem buscar esse objetivo a partir do desenvolvimento de modelos que façam a ligação entre variabilidade climática e carga e demanda hidroenergética conforme alguma das relações funcionais apresentadas ao longo desse trabalho.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a ONS e ao INMET pela disponibilização dos dados utilizados neste trabalho. O primeiro autor agradece à Universidade de Brasília e ao CNPq pela concessão de uma bolsa de iniciação científica (IC).

BIBLIOGRAFIA

- ALVES, M. J. (2008). *“Estudo da Influência das Variações de Temperatura e umidade no Comportamento da demanda de Energia Elétrica e Formação do Custo Marginal de Operação no Brasil”*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas. 129 p.
- FALCO, G. P. (2005). *“Técnicas Univariadas Aperfeiçoadas para a Previsão de Curtíssimo Prazo a Partir de Dados Horários”*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio.
- LIMA, C. H. R.; LALL, U.; SOUZA FILHO, F. A. (2007). *“Variabilidade e Telecomunicações Climáticas associadas às Afluências Naturais ao Sistema Hidroelétrico Brasileiro”* in Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo, 2007.
- LUCENA, A. F. P. (2010). *“Proposta Metodológica para Avaliação da Vulnerabilidade às Mudanças Climáticas Globais no Setor Hidroelétrico”*. Tese de Doutorado. UFRJ/COPPE/Programa de Planejamento Energético. 196p.
- SILVA, B. C.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E.; CLARKE, R. T.; CORBO, M. D. (2007). *“Previsão hidroclimática de vazão de curto prazo na bacia do rio São Francisco”* in Anais do I Workshop – Previsão de Vazões. ONS. Rio de Janeiro, 2007.