



**XXI SNPTTE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
23 a 26 de Outubro de 2011  
Florianópolis - SC

**GRUPO -VI**

**GRUPO DE ESTUDO DE COMERCIALIZAÇÃO, ECONOMIA E REGULAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - GCR**

**PROJEÇÃO DE CENÁRIOS CLIMATOLÓGICOS HIDRO-EÓLICOS:  
DESAFIOS, PERIGOS, RISCOS E MITIGAÇÕES.**

**Leontina Pinto(\*)**

**Daniel Sica  
ENGENHO**

**Jacques Szczupak**

**Denis Silva**

**Tércio Ambrizzi  
IAG/USP**

**RESUMO**

Este trabalho discute a dinâmica das variáveis climatológicas associadas à geração hidroelétrica e eólica, discutindo as características principais de cada uma, possíveis complementariedades e a necessidade de modelos específicos (e inovadores) para o fenômeno em estudo. A seguir, apresenta um modelo integrado para a avaliação do impacto da inserção de novas fontes no sistema e mercado brasileiros. A Plataforma descrita inclui um modelo de geração de séries hidroelétricas realista e confiável, a otimização conjunta de todas as fontes e é capaz de identificar o impacto de reforços no sistema gerador em termos de custos e riscos.

**PALAVRAS-CHAVE**

Inserção de novas fontes, Gestão de riscos, Projeção de Cenários, Cenários Climatológicos

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A projeção de cenários climatológicos é ainda um desafio; a projeção conjunta de cenários climatológicos - hidrologias e ventos, por exemplo - é um desafio ainda maior. A dificuldade cresce ainda mais quando se pretende acomodar fatores importantes como as conhecidas mudanças climáticas, tão discutidas na mídia e tão pouco modeladas em nossos sistemas para apoio ao planejamento e à operação.

Eventos extremos, como os Niños e Niñas, produzem um impacto significativo em todo o planeta e podem afetar - e até modificar completamente - os regimes climatológicos e as disponibilidades hídrica e eólica. Este efeito amplifica-se em algumas regiões, como o Nordeste e o Sul brasileiros, onde alguns dos "sites" mais importantes para o aproveitamento eólico estão localizados. Mais ainda, a complementariedade sazonal entre água e vento - tão conhecida e comentada - deve ser vista com reservas. Um evento crítico pode amortecê-la ou mesmo eliminá-la completamente.

Neste contexto de constante evolução, é importante notar que nem sempre os modelos estatísticos convencionais produzem resultados robustos e confiáveis - principalmente se baseados em um histórico pobre em informações, composto por poucos anos, desconsiderando eventos importantes como os Niños/Niñas de 1982/3 e 1998/9. É necessário um modelo "sob medida" para cada fenômeno e região, identificando as "quebras" climatológicas, os efeitos dos eventos extremos e principalmente as periodicidades envolvidas.

Este trabalho apresenta um estudo profundo e abrangente sobre as dinâmicas hidrológica e eólica brasileiras sob o ponto de vista integrado, modelando e quantificando os riscos envolvidos de disponibilidades e complementariedade.

## 2.0 - INFORMAÇÕES UTILIZADAS

Ao contrário dos dados hidrológicos, ainda há dificuldades em encontrar dados de medições eólicas com a qualidade necessária para a construção de uma base de dados confiável. Assim, optamos por realizar todos os estudos aqui apresentados a partir dos dados climatológicos do NOAA [1], a base mais utilizada por climatologistas em todo o mundo. Pode-se dizer, grosseiramente, que esta base "divide" o globo em "quadrículas" (neste estudo com aproximadamente 200 x 200 Km) para as quais são disponibilizados dados climatológicos de chuvas e vazões.

Focalizamos, neste estudo, alguns pontos típicos na região Nordeste e Sul, assinalados na Figura 1. É importante notar que os resultados reportados referem-se unicamente a estes pontos, e não podem de nenhum modo ser estendidos para outros sites de interesse. A dinâmica climatológica varia bastante de acordo com as características da região e cada site deve ser analisado individualmente.



Figura 1 - Sites estudados neste trabalho

A complementariedade entre ventos e chuvas na região Nordeste é conhecida há muito tempo - basta a referência ao clássico de Graciliano Ramos (Vidas Secas), quando o protagonista observava "*o vento levar as nuvens para regiões mais afortunadas*". A Figura 2 apresenta as médias mensais entre ventos e chuvas na região Nordeste (como exemplo, tomamos o ponto 5S, 38E) normalizadas, para melhor comparação.

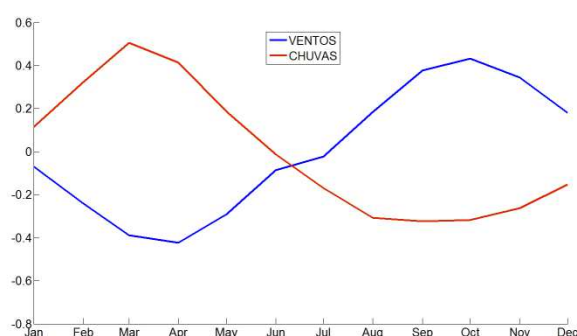


Figura 2 - Curvas sazonais normalizadas de ventos e chuvas na região Nordeste (ponto 5S, 38E)

A mesma comparação pode ser aplicada à região Sul - com resultados não tão bons, como mostra a Figura 3:

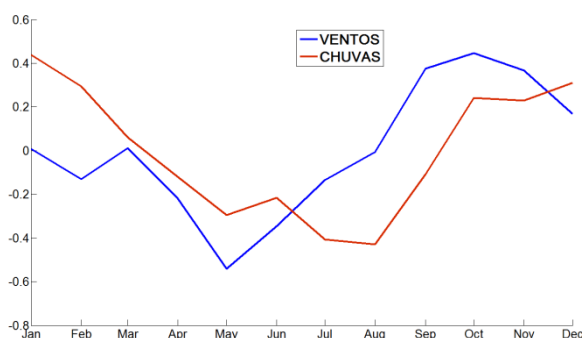


Figura 3 - Curvas sazonais normalizadas de ventos e chuvas na região Sul (ponto 30S, 55E)

Em outras palavras, a hipótese de complementariedade é discutível, deve ser aplicada com cuidado e sua validação dependerá das características da região em análise.

### 3.0 - AS MUDANÇAS CLIMATOLÓGICAS

As mudanças climatológicas são já bastante conhecidas por todos; frequentam todos os tipos de mídia, atingem a todos os tipos de atividades. Seria lógico, então, questionar os dados históricos - ficará sempre a dúvida se eles refletirão o futuro. Em outras palavras, seria interessante avaliar a segurança das informações históricas disponíveis, e examinar a sua *estacionariedade*. As Figuras 4 e 5 apresentam as séries de valores médios das correlações entre as chuvas e ventos para o Nordeste e para o Sudeste. É possível notar que as correlações não só variam ao longo do tempo, como parecem experimentar uma ruptura, saindo de um nível razoavelmente estável até à década de 70 para estabilizar-se em outro patamar na década de 2000. Mais ainda, os fenômenos parecem complementares: enquanto a correlação (negativa) do Nordeste parece intensificar-se, a do Sul parece enfraquecer-se.

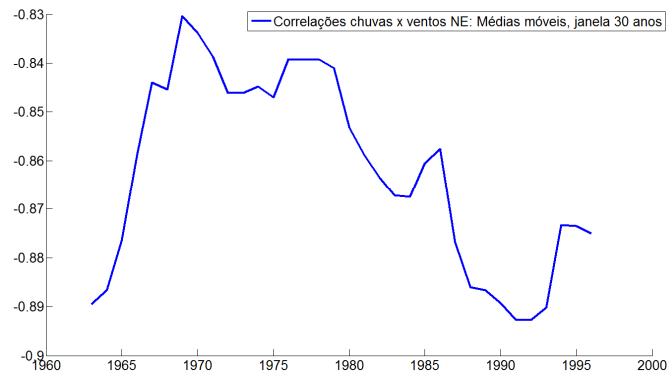


Figura 4 - Médias Móveis das correlações ventos x chuvas para o Nordeste - janela 30 anos

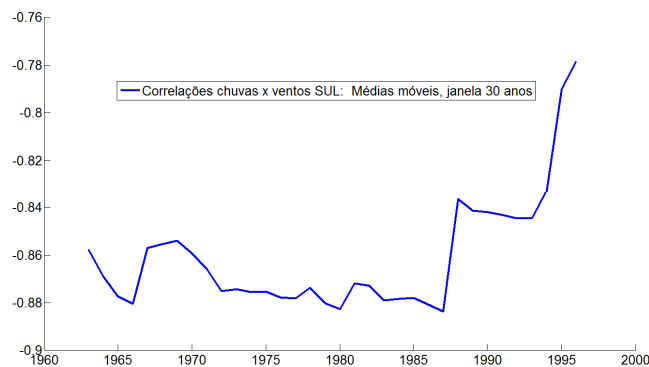


Figura 5 - Médias Móveis das correlações ventos x chuvas para o Sul - janela 30 anos

A Figura 6 oferece um exame mais profundo sobre a (cor)relação entre chuvas e ventos no Nordeste, apresentando as máximas anuais (ventos) e mínimas anuais (chuvas). É possível observar que, realmente a complementariedade chuvas/ventos fortalece-se a partir da década de 70.

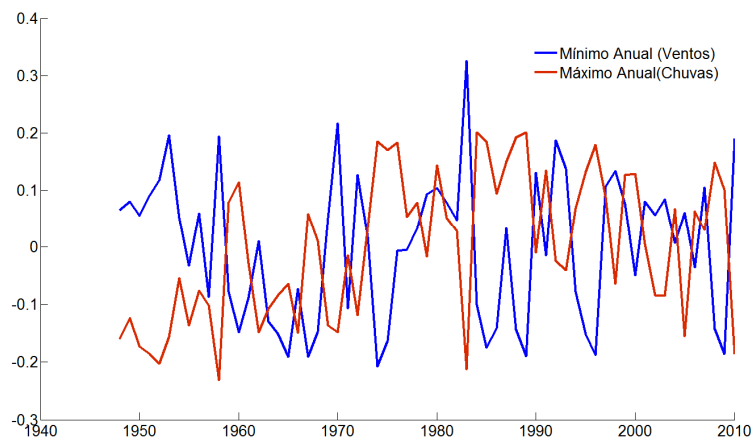


Figura 6 - Relações chuvas máximas/ventos mínimos, Nordeste

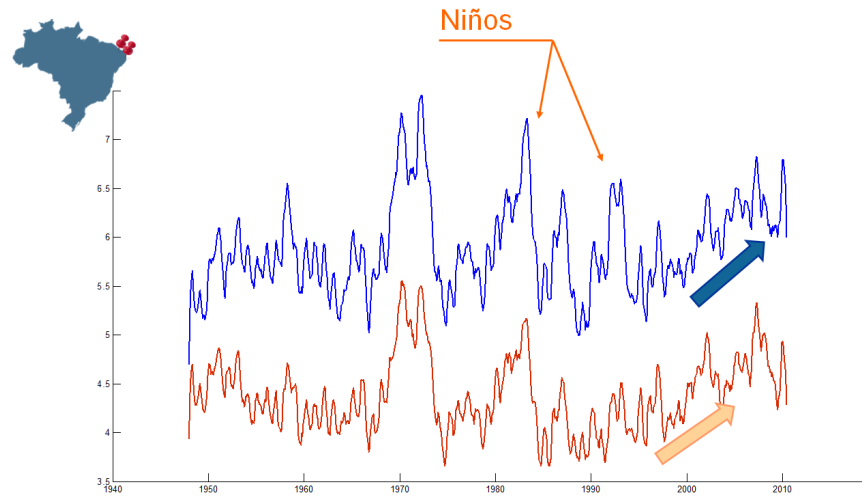


Figura 7: Impacto dos eventos climatológicos na velocidade dos ventos, Nordeste 2.5-5S, 40E

Resultados semelhantes podem ser observados nas dinâmicas hidrológicas. A referência [2] descreve detalhadamente o impacto da "quebra climatológica" do ano de 1970 em alguns dos mais importantes reservatórios brasileiros.

Em outras palavras, as mudanças climáticas não são uma preocupação apenas futura: elas ocorrem no presente e ocorreram no passado - e atingem de modo diferente cada local do planeta. Eventos significativos, como Niños/Niñas fortes, são capazes de produzir profundas modificações nas dinâmicas climáticas. Neste contexto, é necessário um enorme cuidado na modelagem do fenômeno em estudo e em sua representação futura. Séries longas, que encerrariam em princípio uma informação bastante rica, podem deixar de ser representativas face a uma mudança profunda. Por outro lado, séries curtas (como as utilizadas no recente leilão) podem ser insuficientes para modelar corretamente a realidade e levar a erros significativos nas estimativas de disponibilidades e riscos.

#### 4.0 - UMA CARACTERÍSTICA FUNDAMENTAL: A PERIODICIDADE

Em qualquer caso, é importante levar em conta uma característica fundamental: a periodicidade das séries. A Figura 8 ilustra a dinâmica do vento no site nordestino em estudo, que combina periodicidades (com amplitudes variáveis) e mudanças estruturais (a partir de 1992). Uma série como esta requer modelos específicos, capazes de reproduzi-la. Modelos baseados em correlações lineares tendem a oferecer uma visão míope do fenômeno real, enxergando um fenômeno distorcido, cuja projeção futura poderá incorrer em severos erros.

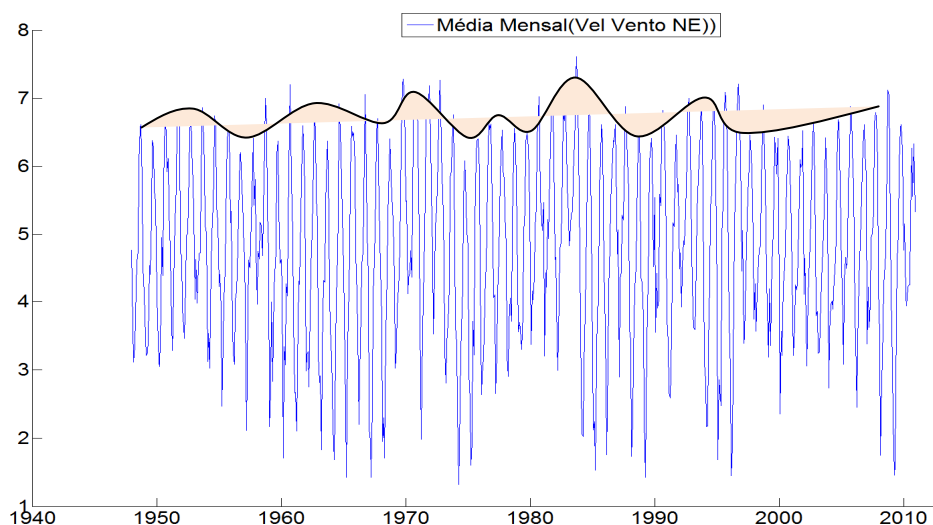


Figura 8 - Periodicidade na Velocidade dos ventos NE

## 5.0 - O MODELO DE GERAÇÃO DE SÉRIES

Este trabalho apresenta o modelo utilizado para a geração de séries hidro/eólicas para o sistema brasileiro através de uma abordagem conceitual e intuitiva, de modo a atingir leitores de diversas formações. Para maior clareza, a modelagem matemática será omitida (o leitor interessado poderá encontrar mais detalhes na referência [3]).

### 5.1 A Idéia básica: decomposição/recomposição

É possível representar, como ilustra a Figura 9, a série climatológica como a superposição de diversas componentes que exibem periodicidades características. É possível, assim, superpor os efeitos de distintas influências e periodicidades

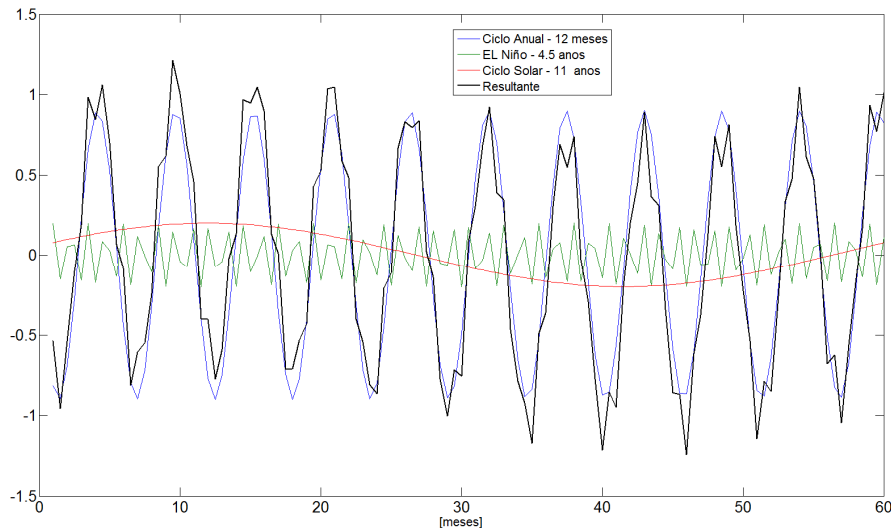


Figura 9 - Decomposição da série em componentes

### 5.2 O Modelo adotado

O Modelo adotado consiste em um processo de decomposição (análise) e recomposição (síntese) como descrito a seguir

#### ✓ ANÁLISE

- Decomposição da série original em diversas séries, cada qual representando uma subbanda de diferente faixa de frequências. Este procedimento permite olhar a série por uma lupa, que enfatiza as diversas partes do espectro da série original. Niños, Niñas, sazonalidades,...
- Modelagem do Espectro de cada uma destas séries por filtro digital operando no tempo.

#### ✓ SÍNTESE

- Alimentação de cada filtro digital por sinal aleatório, que aparece à saída do filtro com a distribuição em frequência da subbanda de origem.
- Combinação destas saídas por filtros de síntese, recompondo a distribuição em frequência da série original.

Cada processo de síntese gera uma série diferente no tempo, com exatamente as características da série original, constituindo-se em uma nova realização do processo estocástico ao qual pertence a série original. Dependendo dos filtros digitais selecionados, pode-se manter a fidelidade do processo, mesmo quando perdida nos procedimentos usuais. Por exemplo, fenômenos como Niños ou Niñas aparecem não periodicamente com intervalos variáveis, podendo alcançar oito ou mais anos. O período solar é de 22 anos. Cada um destes fenômenos, apesar de suas perturbações serem notadas à época de ocorrência, pode, matematicamente, quase que desaparecer frente aos outros fenômenos sazonais, sempre presentes e portanto mais influenciando a energia da série original. No processo proposto eles podem ser enfatizados e separados das demais sazonalidades.

O processo respeita as relações entre as diversas variáveis (espacial, temporal, etc.).

A Figura 10 ilustra um caso típico de geração de séries. É possível observar os "picos" esperados associados ao evento de Niños/Niñas.

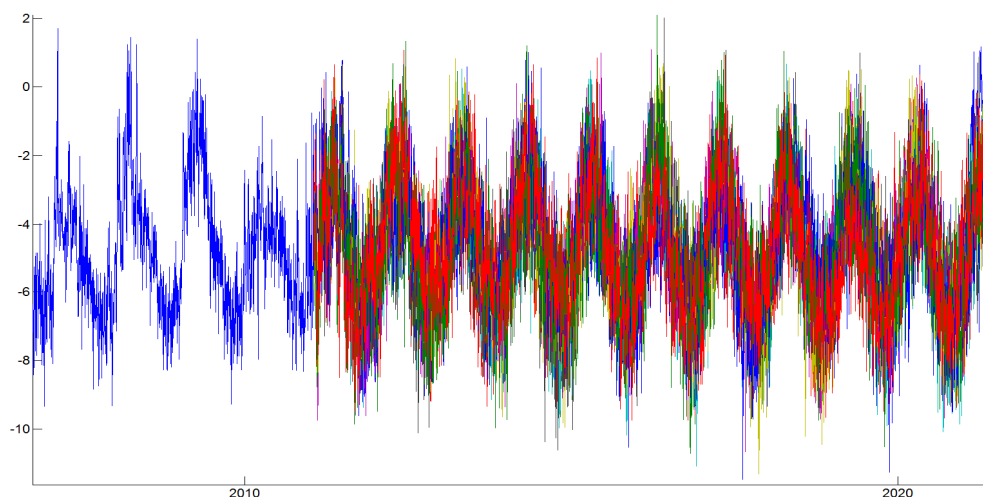


Figura 10 - Séries de velocidades de ventos geradas a partir do modelo proposto

## 6.0 - APLICAÇÃO AO SISTEMA BRASILEIRO: IMPACTO DA INSERÇÃO DAS EÓLICAS

### 6.1 O Estudo Realizado

A meta deste estudo é avaliar o impacto da inserção das usinas eólicas no parque gerador brasileiro. Para tanto, reproduzimos a operação ótima do país em um momento particularmente importante: o início do ano de 2008, quando a disponibilidade energética foi bastante limitada e um reforço - principalmente de energia renovável (limpa) seria mais que bem-vindo.

A inclusão da Energia eólica (capacidade máxima e fator de capacidade) é descrita através das tabelas a seguir

|       | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
|-------|------|------|------|------|------|------|
| NE    | 765  | 1200 | 1700 | 1700 | 1700 | 1700 |
| SE/CO | 160  | 160  | 160  | 160  | 160  | 160  |
| SUL   | 215  | 300  | 300  | 300  | 300  | 300  |
| TOTAL | 1140 | 1660 | 2160 | 2160 | 2160 | 2160 |

Tabela 1 – Montantes de Capacidade de Energia Eólica adicionados a cada Subistema

| FATOR DE CAPACIDADE |    |       |     |
|---------------------|----|-------|-----|
| Mês                 | NE | SE/CO | SUL |
| J                   | 35 | 31    | 29  |
| F                   | 30 | 28    | 27  |
| M                   | 28 | 28    | 26  |
| A                   | 29 | 30    | 27  |
| M                   | 30 | 33    | 29  |
| J                   | 31 | 36    | 33  |
| J                   | 38 | 39    | 37  |
| A                   | 48 | 42    | 38  |
| S                   | 59 | 42    | 38  |
| O                   | 67 | 40    | 37  |
| N                   | 58 | 37    | 33  |
| D                   | 46 | 33    | 31  |

Tabela 2 – Fator de Capacidade Mensal do Parque Eólico

A Tabela 2 sintetiza o impacto da entrada das usinas eólicas no sistema: a redução significativa do custo marginal (grosseiramente igual ao preço de energia) e risco de déficit em todos os submercados brasileiros. Para melhor avaliação, apresentamos os valores médios e máximo obtidos para cada variável.

|              | CMO         |       | RISCO DEFICIT |       |
|--------------|-------------|-------|---------------|-------|
|              | Red R\$/MWh | Red % | Red Risco     | Red % |
| <b>NO</b>    |             |       |               |       |
| Max          | 120.10      | 43.59 | 3.08          | 42    |
| Med          | 27.65       | 22.20 | 0.97          | 28.7  |
| <b>NE</b>    |             |       |               |       |
| Max          | 35.20       | 24.94 | 6.78          | 52.1  |
| Med          | 28.29       | 21.82 | 1.03          | 28.18 |
| <b>SE/CO</b> |             |       |               |       |
| Max          | 62.42       | 27.3  | 3.32          | 21.54 |
| Med          | 28.32       | 19.2  | 0.76          | 13.32 |
| <b>SUL</b>   |             |       |               |       |
| Max          | 46.32       | 22.5  | 2.71          | 31.12 |
| Med          | 22.00       | 17.2  | 0.48          | 14.38 |

Tabela 3 – Redução do CMO e Risco de Déficit

## 7.0 - CONCLUSÕES

Sabe-se que a variabilidade climatológica pode trazer riscos significativos ao sistema e ao mercado brasileiro. O tratamento destes riscos através de modelos estatísticos simplificados, desconsiderando a dinâmica própria do clima local, pode ser incompleto e levar a decisões inconsistentes. Diversos eventos climatológicos significativos, como a ocorrência de Niños/Niñas ou os ciclos solares podem impactar - e efetivamente impactam - a dinâmica climatológica das fontes de energia (eólica e hidroelétrica por exemplo) e podem levar a projeções irrealistas de cenários futuros. O impacto na tomada de decisão pode ser significativo, bem como suas consequências.

Este trabalho apresenta um framework completo, que modela a variabilidade hidro-eólica com todas as nuances climatológicas e avalia seu impacto através de modelos energéticos completos e consistentes. O modelo é eficiente, realista e pode ser utilizado para a geração de séries sintéticas futuras mais aderentes ao fenômeno em estudo. Esperamos assim oferecer um ferramental adequado ao desafio que enfrentamos, capaz de realmente auxiliar o agente a tomar decisões seguras e confiáveis.

Um caso exemplo com o sistema brasileiro - gerado a partir das séries sintéticas modeladas - mostra a oportunidade da inserção da energia eólica no país. Em caso de secas severas, como a que vivenciamos em 2008, seria possível a redução expressiva de preços e riscos em todos os submercados brasileiros sem a necessidade de utilização intensiva de térmicas poluentes e onerosas à sociedade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>

(2) L. Pinto, J. Szczupak, L. Macêdo, T. Ambrizzi, E. Molina, D. Ramos, D. Silva, "Previsão de Cenários Hidrológicos: quebrando o paradigma da incerteza", SEPOPE 2004, Rio de Janeiro

(3) J. Szczupak, D. Sica, L. Macêdo, D. Silva, "Aplicação de Técnicas digitais à previsão de cenários climatológicos, Relatório Engenho, 2010

## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Leontina Pinto é engenheira elétrica pela UFRJ (1979), mestre em ciências em Engenharia de Sistemas pela COPPE/UFRJ (1981) e doutora em Matemática Aplicada pelo IM/UFRJ (1986). Foi pesquisadora do CEPEL, professora da COPPE/UFRJ e PUC-RIO e é atualmente diretora-executiva da Engenho Pesquisa, Desenvolvimento e Consultoria Ltda. Seus interesses incluem o planejamento/operação de sistemas de energia, a comercialização e gestão de riscos em mercados de energia, a projeção de cenários futuros de mercados e preços.

Jacques Szczupak, engenheiro elétrico pela UFRJ (1964), mestre em ciências pela COPPE/UFRJ (1967) e Ph.D. pela Universidade da Califórnia, 1975. Professor na COPPE/UFRJ, (1967-1972, 1975-1977, 1987-1989) e na PUC-RJ (1989-2007), pesquisador no CEPEL (1977-1987) e é atualmente diretor técnico-administrativo da Engenho, Pesquisa, Desenvolvimento e Consultoria Ltda. Seus interesses incluem o processamento digital de sinais e a modelagem e implementação de sistemas.

Daniel Sica é formado em Engenharia Elétrica/Telecomunicações pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (2007) e Mestre em Processamento de Sinais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2009), onde cursa atualmente o Doutorado na mesma área. Ingressou na ENGENHO em 2005, onde exerce atualmente o cargo de Gerente de Pesquisas para a área de projeção de cenários. Seus interesses envolvem a climatologia, mercado, carga, demanda e preços.

Luiz Henrique Macêdo é engenheiro eletricitista pela UFG (1999), mestre em Telecomunicações pela PUC-Rio (2001) e doutor em Processamento de Sinais pela PUC-Rio (2006). Desde 2006 é Gestor de Pesquisa da Engenho Pesquisa, Desenvolvimento e Consultoria Ltda. Seus interesses incluem a projeção de cenários climatológicos e de consumo para estudos energéticos, a análise e a simulação regulatória, e o desenvolvimento de plataformas de apoio à decisão voltadas para o setor.

Denis Lage Ferreira da Silva é formado em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (2006) e Mestre em Processamento de Sinais pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (2009). Trabalha atualmente na Engenho e realiza seus estudos de Doutorado em Meteorologia na Universidade de São Paulo.

Tercio Ambrizzi concluiu o doutorado em Meteorologia pela Universidade de Reading em 1993. Atualmente é Diretor do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo e Professor Titular do Departamento de Ciências Atmosféricas em Dedicação Integral no IAG/USP. Coordenador do Grupo de Estudos do Clima - GrEC no IAG/USP. Atualmente eleito membro do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas pelo Governo Federal (Portaria interministerial dos Ministérios da Ciência e Tecnologia e do Meio Ambiente) sendo indicado para coordenar o Grupo de Trabalho 1 Base Científica das Mudanças Climáticas compondo o Comitê Científico. Também eleito membro titular do Comitê Municipal de Mudanças Climáticas e Ecoeconomia, promovido pela Prefeitura Municipal da Cidade de São Paulo.