



*Por Antonio Carlos Neiva, Ary Vaz Pinto Junior, Ricardo Marques Dutra, Sergio Roberto de Melo, Vanessa Guedes, Waldenio de Almeida, Rodrigo Braz e Angelo Cabrera**

CAPÍTULO IV

ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO





O Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, publicado em 2001 e concebido para a altura de 50 metros (altura suficiente para as tecnologias dos aerogeradores da época), foi, sem dúvida, um importante marco para o desenvolvimento do setor eólico no Brasil. Com o passar dos anos, o mercado eólico brasileiro experimentou crescimento significativo, tanto devido à implantação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), quanto aos resultados alcançados pelos leilões de energia. Ao longo do tempo, a tecnologia de aerogeradores se desenvolveu significativamente disponibilizando modelos de maiores potências e dimensões para operação em alturas mais elevadas, quando comparados aos modelos comercializados em 2001.

Com o objetivo de promover a atualização do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro de 2001, considerando alturas superiores a 50 metros e as novas tecnologias disponíveis comercialmente, foi aprovado, pelo Comitê Gestor do Fundo Setorial de Energia (CT-ENERG), um projeto de encomenda vertical ao Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), implementado pela Financiadora de Estudos e Projetos (Finep).

Para a realização deste projeto, o Cepel estabeleceu parceria com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe) para alocação de infraestrutura e de profissionais do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). A partir do trabalho conjunto entre o Cepel e o CPTEC, foi possível estimar o potencial eólico para todo o território nacional através do uso de modelos numéricos utilizados para previsões do tempo. Considerando a complexidade de tais modelos e a necessidade de abranger todo o território brasileiro, o processamento das informações contou amplamente com o uso do supercomputador do CPTEC.

Dentre os diversos modelos numéricos utilizados pelo CPTEC para previsão do tempo, o modelo de mesoescala Brams (*Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System*) foi escolhido para estimar a velocidade e a direção do vento em todo o país, para as alturas de 30, 50, 80, 100, 120, 150 e 200 metros. Tal escolha foi baseada tanto no fato deste modelo ser o resultado da consolidação de várias adaptações do modelo Rams (*Regional Atmospheric Modeling System*) para as condições climáticas brasileiras, quanto na existência de um grande número de meteorologistas que o utilizam para previsão do tempo em todo o Brasil. Como o modelo Brams apresenta melhores resultados para simulações realizadas com base numa grade de 5 km x 5 km, escolheu-se esta resolução para a elaboração do presente Atlas.

Para a obtenção de um ano típico, que representasse informações médias de um período e não de um ano específico, decidiu-se que seriam simulados os anos de 2012, 2013, 2014 e 2015. A partir dos dados simulados e, posteriormente, ajustados com dados medidos, seria, então, obtido o ano típico para o período dos quatro anos mencionados. Uma grande preocupação ao longo da elaboração do presente Atlas foi a questão da comparação dos resultados das simulações geradas pelo modelo Brams com dados efetivamente medidos. Apesar da vasta rede climatológica distribuída por todo o Brasil, disponibilizada pelo Inpe¹, os melhores dados para comparação e ajuste dos resultados das simulações obtidas com o modelo Brams são aqueles provenientes de estações anemométricas específicas para empreendimentos eólicos. Uma das grandes vantagens de se utilizar estes dados está nas alturas de medição, que coincidem com as alturas dos aerogeradores disponíveis comercialmente no Brasil. Através do apoio do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC) e da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 12 empreendedores autorizaram o uso de informações anemométricas oriundas de 39 parques eólicos e relativas ao período dos anos simulados. As autorizações concedidas para o uso de dados anemométricos provenientes de parques eólicos em operação no Brasil, considerados de alta qualidade, possibilitaram ajustes importantes com relação aos resultados simulados nas principais áreas de comprovado potencial.

1 A base de dados meteorológicos do Inpe é formada por dados de estações meteorológicas convencionais e automáticas do INMET e de outras instituições, dados de aeroportos (METAR) do DECEA, relatórios climatológicos do INMET e do DECEA, estudos acadêmicos e agrícolas para locais específicos e campos de dados interpolados obtidos a partir de todas as observações disponíveis na base de dados do CPTEC.

Unitron
ENERGIA DO SOL.

COMO VOCÊ ESTÁ APROVEITANDO
A ENERGIA SOLAR?

SEJA QUAL FOR A SUA
NECESSIDADE
A UNITRON TEM TODOS
OS ELEMENTOS PARA
O APROVEITAMENTO DE
ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA.

Módulos/Painéis



Luminárias Solares



Inversores



Controladores



Conexão à rede



Postes Solares



Metodologia

O mapeamento do potencial eólico para todo o território brasileiro foi realizado a partir do modelo numérico de mesoescala Brams (*Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System*), com resolução horizontal de 5 km x 5 km e uma rede de medições anemométricas utilizada para ajuste dos resultados.

Nesta seção serão apresentadas as metodologias utilizadas para ajuste dos resultados de mesoescala. Também serão descritos os dados anemométricos utilizados no ajuste e validação dos resultados além dos cálculos necessários para elaboração dos diversos mapas temáticos, tais como os de velocidade e direção do vento em diversas alturas, fator de forma e escala da distribuição de Weibull, regime diurno etc.

O modelo Brams

O modelo utilizado neste trabalho foi o Brams, que é um modelo para previsão numérica de tempo e clima (PNTC) desenvolvido pelo Inpe a partir de um modelo desenvolvido na década de 1980 na Universidade Estadual do Colorado, o Rams (*Regional Atmospheric Modeling System*), que é uma ferramenta flexível e de código aberto para modelagem e previsão de fenômenos atmosféricos. O Rams tem como base um conjunto de equações não hidrostáticas e compressíveis e dois modelos de mesoescala hidrostáticos (PILKE, et al., 1992).

O modelo Brams, conforme apresentado na Figura 1, é constantemente aprimorado (FREITAS, et al., 2017), incluindo funcionalidades e modificações com o objetivo de melhorar a representação numérica de processos físicos fundamentais sobre regiões tropicais e subtropicais.

O Brams, ao longo das simulações realizadas para elaboração do Atlas, era o modelo numérico do CPTEC/Inpe que possuía os melhores resultados com performance igual ou superior a modelos de outros centros internacionais (FREITAS, et al., 2017).

Para o trabalho do novo Atlas foi desenvolvida uma versão especial do Brams a fim de estimar, com todos os detalhes possíveis para uma grade com 5 km de resolução, a intensidade e a direção do vento em diferentes alturas para todo o território nacional. O modelo Brams do CPTEC/Inpe pode ser executado com maior resolução espacial, mas optou-se pela mesma grade de 5 km já utilizada nas versões operacionais sendo utilizadas para gerar a previsão de tempo para o Brasil, pois a mudança da resolução poderia exigir a recalibração de alguns parâmetros internos do modelo.

A resolução temporal dos resultados é horária, o que permite uma avaliação do comportamento das variáveis meteorológicas ao longo do dia (ciclo diurno), e para não extrapolar excessivamente o volume de dados, apenas um subconjunto dos dados de saída do modelo foi armazenado. Foram selecionadas algumas variáveis de superfície, que também foram disponibilizadas para as alturas “nativas” do modelo de 32,2 m, 80,5 m, 120,1 m, 160,0 m, 200,0 m e 240,0 metros. Outra modificação importante nesta versão do Brams foi a geração da rosa dos ventos no pós-processamento do modelo, obtido a partir da direção do vento de cada timestep do modelo, gerando uma “rosa dos ventos” para cada horário de saída.

O domínio de execução do modelo numérico foi dividido em duas partes, a fim de economizar tempo de processamento no supercomputador. Uma parte foi executada com a resolução de 5 km, englobando toda a região do Brasil onde pode existir potencial de

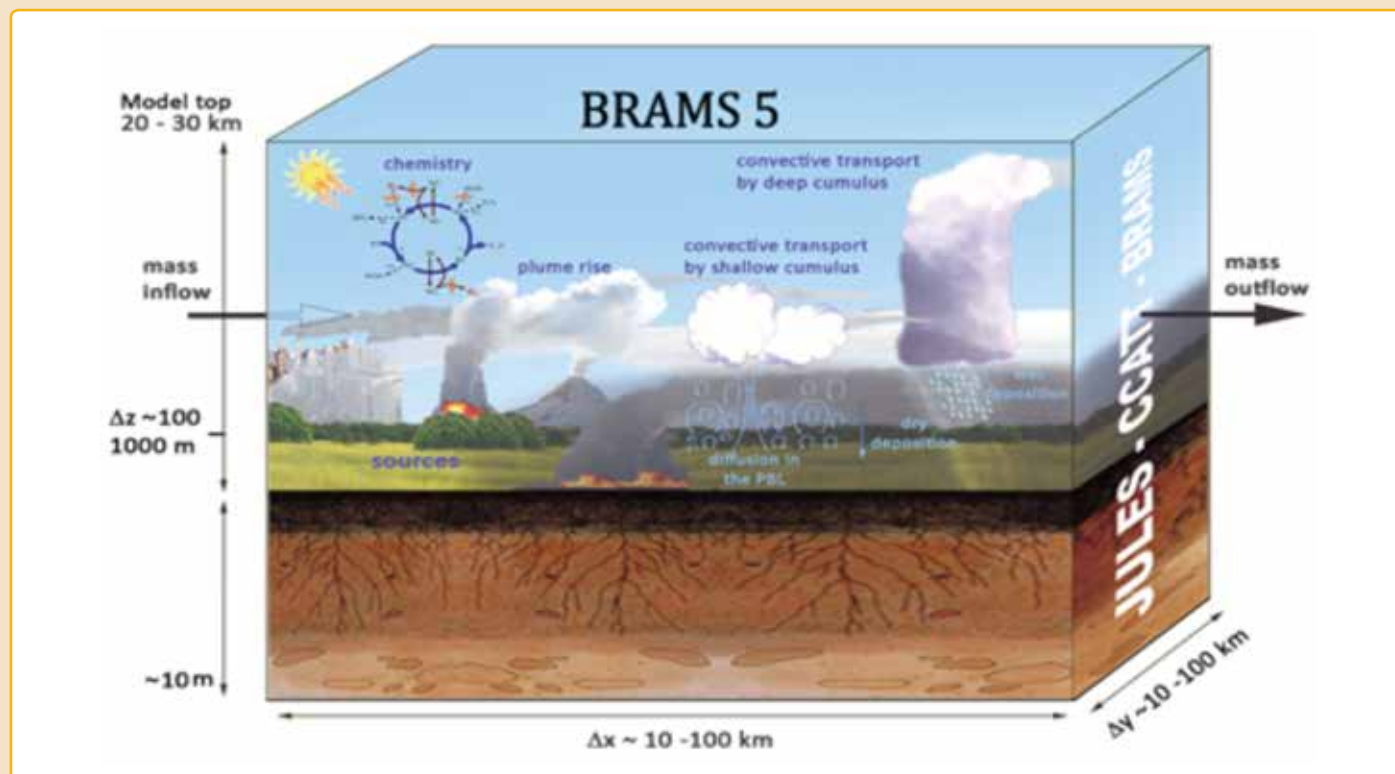


Figura 1 - Representação esquemática do modelo Brams (FREITAS, et al., 2017).

geração eólica de energia elétrica, e a outra, compreendendo a Amazônia ocidental, onde se sabe que não existe potencial de geração eólica, foi gerada com 15 km de resolução horizontal. Posteriormente, as duas partes foram reunidas para gerar um campo único, a fim de fazer o ajuste estatístico e gerar os produtos numéricos derivados.

Dados anemométricos

Apesar de todos os avanços e desenvolvimentos recentes dos modelos numéricos de previsão de tempo e clima, os resultados atuais ainda possuem um razoável grau de imprecisão e incertezas. Uma vez que os modelos numéricos (incluindo o modelo Brams) representam uma simplificação de um sistema real (Figura 2) e que as imperfeições da modelagem decorrem do conhecimento incompleto dos processos físicos, da formulação matemática simplificada dos processos modelados, assim como dos processos que ocorrem em escalas que não podem ser representados na solução numérica adotada, faz-se necessário ajustar (ou calibrar) os resultados dos modelos numéricos tornando-os, assim, uma base de dados mais coerente com as condições observadas em campo e, conseqüentemente, um produto de melhor resultado para os usuários finais.

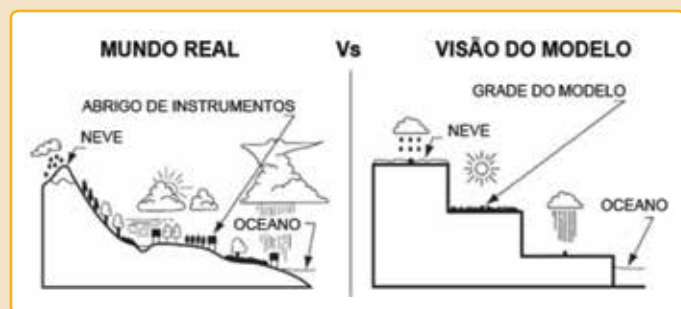


Figura 2 - Ilustração das diferenças entre o "mundo real" e a representação matemática dos modelos numéricos (KARL, et al., 1989).

Uma vez que é necessário obter um número significativo de dados anemométricos para validação dos resultados do modelo Brams, foram utilizadas informações provenientes de estações climatológicas espalhadas por todo o Brasil, pertencentes ao Inpe, ao Inmet (Instituto Nacional de Meteorologia), ao DECEA/ICEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo/ Instituto de Controle do Espaço Aéreo), entre outras instituições. Vale ressaltar que uma parte importante do acervo de ambas as instituições apresentou séries históricas de boa qualidade, que se mostraram adequadas para ajuste dos resultados simulados. Os dados utilizados para gerar o campo de ajustes foram obtidos através do banco de dados observados do CPTEC/ Inpe, que inclui informações de diversas fontes, tais como:

- Dados de estações sinóticas convencionais e estações automáticas do Inmet (Instituto Nacional de Meteorologia);
- Dados de aeroportos e aeródromos (a maior parte do Departamento de

Controle do Espaço Aéreo - DECEA/ICEA);

- Dados da rede de estações da Marinha do Brasil;
- Dados de outras redes regionais (PCDs do Inpe, Funceme, ANA, Cemig, etc.)

Adicionalmente, uma vez que a finalidade do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro é disponibilizar informações com o objetivo de identificar sítios promissores para implantação de parques eólicos de geração de energia elétrica em todo o território nacional, o ajuste dos resultados do modelo Brams deveria contar com séries históricas de alta qualidade destinadas para este fim. Neste sentido, o Cepel, através do apoio do então MCTIC e da EPE, obteve a autorização de 12 empreendedores para utilização de dados anemométricos provenientes de 39 parques eólicos em operação espalhados por todo o Brasil. Foi autorizada a utilização de médias mensais da velocidade do vento medidas na altura dos aerogeradores instalados. As autorizações foram concedidas para uso das médias mensais da velocidade e direção do vento exclusivamente para ajuste das simulações do modelo Brams referentes aos anos de 2013 a 2015².

Par aumentar a representatividade de pontos de referência (estações anemométricas) que abrangesse grande parte do território brasileiro, foram selecionados um conjunto de dados de aeroportos distribuídos por todos os estados brasileiros, com preferência para aeroportos internacionais, por possuírem dados de melhor qualidade e maior cobertura temporal. Estes dados foram extraídos do sistema de processamento do CPTEC/Inpe e consolidados em médias mensais. Vale citar que, diferentemente dos dados medidos em parques eólicos, cuja altura de medição é próxima a 100 m (altura dos modelos de aerogeradores comercializados atualmente), a altura padrão das medições nas estações sinóticas é de 10 m.

Após um controle de qualidade realizado pelo Cepel nos dados de mais de 300 estações que compõem o banco de dados observados do CPTEC/ Inpe (conforme apresentado acima), foram selecionadas 99 estações representativas em todo o território nacional para aferição e ajuste dos resultados da simulação do Brams para o ano de 2013.

Metodologia de ajuste

Uma vez que dados simulados através de um modelo numérico de previsão de clima apresentam, para cada ponto, desvios sistemáticos³, faz-se necessário identificá-los e corrigi-los através de informações providas de medições em campo de forma que haja maior aderência entre as previsões apresentadas pelo modelo e as condições observadas.

O método de ajuste aplicado no Atlas assume que a comparação dos dados observados em estações meteorológicas ou anemométricas com os respectivos dados simulados fornecerá uma indicação da intensidade e do sinal destes desvios sistemáticos, que dessa forma poderão ser mensurados e removidos.

O método da correção do viés médio, utilizado neste trabalho, é largamente utilizado em meteorologia numérica, com diversos exemplos de

2 Apesar de incluir simulações do modelo Brams para o ano de 2012 para elaboração do ano típico e de vários parques já estarem em operação no mesmo ano, somente em 2013 havia disponibilidade de séries históricas completas.

3 Desvios sistemáticos ou erros sistemáticos são devidos a causas identificáveis e podem, em princípio, ser eliminados. Erros desse tipo resultam em valores que são sistematicamente mais altos ou mais baixos em relação a um valor esperado. Um exemplo deste tipo de desvio pode ser observado nas medições realizadas em equipamentos descalibrados.

4 Estes desvios significativos também foram identificados através de inspeção visual do campo de interpolação. Este recurso, apesar de ser um critério subjetivo, permitiu identificar e eliminar rapidamente dados impróprios para o ajuste final dos dados simulados.



aplicação no Brasil nas áreas de agricultura (AVILA, et al. 2009), meteorologia (AVILA, et al. 2008) e recursos hídricos (ONS, 2013).

A priori, a aplicabilidade do método de remoção de viés é válida para os pontos onde existem dados locais para as comparações. Mas é preciso estender o método de ajuste para as localidades onde estas observações não existem, visto que a rede de estações de medida no Brasil é relativamente esparsa.

De forma mais detalhada, o trabalho de ajustar os resultados do modelo Brams foi dividido nas seguintes etapas:

- Avaliação dos dados observados;
- Elaboração do campo de ajuste;
- Validação dos resultados.

A qualidade e a disponibilidade dos dados obtidos de estações meteorológicas, anemométricas e climatológicas foram os principais limitantes para utilização de uma quantidade maior de estações para ajuste. Todas as estações previamente escolhidas passaram por uma avaliação de qualidade onde os principais critérios utilizados para o descarte de dados medidos foram:

- Comportamento temporal anômalo (como dados repetidos ou que variam muito rapidamente);

- Coerência com dados de estações próximas,
- Desvios significativos em relação aos dados climatológicos disponíveis para a região⁴;
- Falta de representatividade regional (como estações instaladas em praias, isto é, numa zona limítrofe entre duas regiões muito distintas);
- Insuficiência de dados.

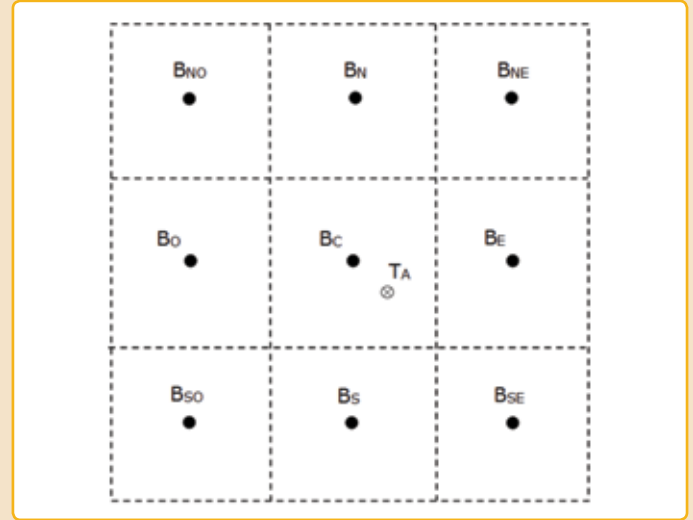


Figura 3 - Esquematização da grade do modelo Brams mostrando os pontos de referência para as simulações no entorno da localização do ponto de observação.

Monitoramento de Pressão do Óleo em linhas de transmissão subterrâneas

Visualização de dados

Transformador

Dutos de energia

NP600

FieldLogger

Atlas online

Todas as informações das simulações realizadas para o ano de 2013 estão disponibilizadas através do sítio na internet criado especialmente para sua divulgação (Figura 4). Através do link www.novoatlas.cepel.br, o internauta terá acesso a arquivos pdf de toda publicação gerada ao longo do projeto, incluindo todos os mapas temáticos e arquivos no formato kml que possibilitarão visualização das diversas informações em plataforma SIG. Também estão disponíveis todas as informações consolidadas no formato csv que possibilitarão visualização em formato tabular para cada ponto da grade de 5 km x 5 km dentro do território nacional.



Figura 4 - Visualização da apresentação, via web, do conteúdo das simulações 2013 do novo Atlas do Potencial Eólico Brasileiro.

A coletânea de mapas temáticos disponibilizada no Atlas apresenta informações da distribuição da velocidade média anual do vento para as alturas de 30, 50, 80, 100, 120, 150 e 200 metros. Também são disponibilizadas informações dos fatores de escala e de forma da distribuição de Weibull para a altura de 100 metros; da densidade de potência, massa específica e massa do ar, todas para a altura de 100 metros. Adicionalmente, também são apresentadas a distribuição da rosa dos ventos anual (frequências x direção), o regime diurno anual e a rugosidade. A Figura 5 apresenta a distribuição da velocidade média anual do vento para a altura de 100 m.



Figura 5 - Distribuição da velocidade média anual do vento a 100m de altura.

Conclusões

As simulações com o modelo Brams referentes ao ano de 2013, a comparação dos resultados obtidos com dados medidos e a subsequente realização de ajustes constituem marcos significativos do trabalho de elaboração do presente Atlas Eólico. Após a conclusão destas etapas, foram produzidos mapas temáticos relativos às médias anuais, obtidas a partir de simulações para o ano de 2013. Adicionalmente, tornou-se possível, para a sociedade, a consulta web das informações em ambiente georreferenciado. Para dar continuidade ao desenvolvimento do presente trabalho, visando à obtenção do ano típico, pretende-se realizar o ajuste e a validação estatística dos resultados para os anos de 2012, 2014 e 2015 (cujas simulações com o modelo Brams já estão concluídas) nos mesmos moldes do que foi efetuado para o ano de 2013. Adicionalmente, pretende-se realizar simulações em resolução de microescala em sítios com elevado potencial para abrigar parques eólicos.

Referências bibliográficas

- AVILA, A. M. H.; CARDOSO, A. O.; PINTO, H. S., 2009. Aplicação da correção estatística na previsão de tempo estendida, para três localidades da Região Sul. In: XVI CBA, 2009, Belo Horizonte. XVI CBA, 2009.
- FREITAS, S. R. et al. 2016. Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System BRAMS version 5.2 Description of the Model Input Namelist Parameters. Disponível na internet no link [ftp://ftp.cptec.inpe.br/brams/BRAMS5.2/documentation/namelist-BRAMS-5.2-feb2016.pdf](http://ftp.cptec.inpe.br/brams/BRAMS5.2/documentation/namelist-BRAMS-5.2-feb2016.pdf).
- FREITAS, S. R. et al., 2017. The Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS 5.2): an integrated environmental model tuned for tropical areas. *Geoscientific Model Development*, v. 10, p. 189-222, 2017.
- KARL T.R., TARPLEY J.D., QUAYLE R.G., DIAZ H.F., ROBLINSON D.A., BRADLEY R.S., 1989. The recent climate record. what it can and cannot tell us, *Rev Geophys* 27:405-430.
- NEIVA, A.C.B., RAMOS, D.A., GUEDES, V.G., WALTER, A., e MELO, S.R.F.C., 2016. Estudo Comparativo Teórico e Experimental da Variabilidade de Dados de Velocidade de Vento em Estações Anemométricas. *Brazil Windpower 2016 Conference and Exhibition – 30/08/2016*.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico – NOS, 2013. Aprimoramento da Metodologia de Remoção de Viés da Previsão de Precipitação – Aplicação nas Bacias do Alto Rio Paranaíba e do Baixo Rio Grande. *Nota técnica do Operador Nacional do Sistema Elétrico*, 2013.
- PIELKE, R. A.; COTTON, W. R.; WALKO, R. L., et al., 1992. A comprehensive meteorological modeling system – RAMS. *Meteorol. Atmos. Phys.*, v. 49, pp. 69-91, 1992.

*ANTÔNIO CARLOS DE BARROS NEIVA é engenheiro mecânico, com mestrado em Engenharia Térmica e de Fluidos. Atualmente, é pesquisador no Cepel.
 ARY VAZ PINTO JUNIOR é engenheiro eletricitista, com mestrado em Engenharia Elétrica. Atualmente, é chefe do Departamento de Materiais, Eficiência Energética e Geração Complementar no Cepel.
 RICARDO MARQUES DUTRA é engenheiro eletrônico, com mestrado e doutorado em Planejamento Energético. É pesquisador nível III do Cepel.
 SÉRGIO R.F.C. DE MELO é engenheiro eletrotécnico, com mestrado em Computação Científica. Atua como pesquisador nível I no Cepel.
 VANESSA GONÇALVES GUEDES é engenheira mecânica, com mestrado e doutorado. É pesquisadora nível III do Cepel.
 ANGELO ALBERTO MUSTTO CABRERA é engenheiro mecânico, com mestrado e doutorado em Engenharia Mecânica. Atualmente, é funcionário da Puc-Rio, com participação e desenvolvimento de tarefas em projetos parceiros de pesquisa com o Cepel.
 RODRIGO DE OLIVEIRA BRAZ é graduado em Computação Científica e em Engenharia Aeronáutica. Trabalhou, pela Fundação de Ciências, Aplicações e Tecnologia Espaciais (Funcate), para o Cptec/Inpe em conjunto com o Cepel, nona preparação do novo Atlas do Potencial Eólico Brasileiro.
 WALDENIO GAMBI DE ALMEIDA é graduado em Física Aplicado, com mestrado em Engenharia Mecânica. Trabalha no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE).