

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
METEOROLOGIA**



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Alane Saldanha dos Santos

**Aplicação da Teoria da máquina térmica às brisas
marítima/terrestre e de vale/montanha sobre terreno inclinado e
plano**

Campina Grande, Abril de 2013



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**APLICAÇÃO DA TEORIA DA MÁQUINA TÉRMICA ÀS BRISAS
MARÍTIMA/TERRESTRE E DE VALE/MONTANHA SOBRE TERRENO
INCLINADO E PLANO**

ALANE SALDANHA DOS SANTOS

**Campina Grande – PB
ABRIL, 2013**

ALANE SALDANHA DOS SANTOS

**APLICAÇÃO DA TEORIA DA MÁQUINA TÉRMICA ÀS BRISAS
MARÍTIMA/TERRESTRE E DE VALE/MONTANHA SOBRE TERRENO
INCLINADO E PLANO**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para a obtenção do grau de Mestre.

Área de Concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escalas
Linha de pesquisa: Modelagem numérica

Orientadores: Prof^a. Dr^a. Clênia Rodrigues Alcântara
Prof. Dr. Enio Pereira de Souza

Campina Grande – PB
Abril de 2013

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S237a

Santos, Alane Saldanha dos.

Aplicação da teoria da máquina térmica às brisas marítima/terrestre e de vale/montanha sobre terreno inclinado e plano / Alane Saldanha dos Santos. – Campina Grande, 2017.

69 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2013.

"Orientação: Profa. Dra. Clênia Rodrigues Alcântara, Prof. Dr. Enio Pereira de Souza".

Referências.

1. *Brams*. 2. Máquina Térmica. 3. Circulações do Tipo Brisa. 4. Topografia. I. Alcântara, Clênia Rodrigues. II. Souza, Enio Pereira de. III. Título.

CDU 551.5(043)

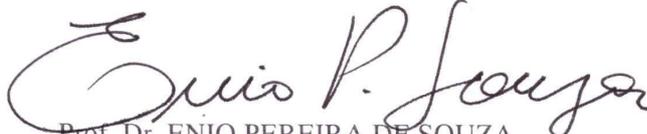
ALANE SALDANHA DOS SANTOS

APLICAÇÃO DA TEORIA DA MÁQUINA TÉRMICA ÀS BRISAS
MARÍTIMA/TERRESTRE E DE VALE/MONTANHA SOBRE A COSTA DO
CEARÁ

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 19/04/2013

BANCA EXAMINADORA


Profa. Dra. CLÊNIA RODRIGUES ALCÂNTARA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. ENIO PEREIRA DE SOUZA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Profa. Dra. MAGALY DE FATIMA CORREIA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Dr. WEBER ANDRADE GONÇALVES
Doutor em Meteorologia

Dedicatória

“O mais importante de tudo é nunca deixar de perguntar, a curiosidade tem sua própria razão de existir...”.

Albert Einstein.

Á minha avó Marinete Lins Saldanha, a minha filha Maria Luiza, e ao mestre e grande amigo Alessandro Rodrigues da Fonseca (*In memoriam*).

Ofereço e Dedico

Agradecimentos

Para recebermos as glórias dos aplausos na chegada, temos antes de tudo que iniciarmos a caminhada. Ao longo de toda jornada conhecemos pessoas incríveis, as quais nos acrescentam de tal forma, que jamais as esqueceremos.

Agradeço primeiramente a Deus por me por apta a realização deste trabalho e a me conduzir pelo melhor caminho possível.

Ao meu orientador de graduação, Ricardo Ferreira Carlos de Amorim, que me abriu as portas ao conhecimento da modelagem numérica.

Aos orientadores de mestrado Clênia Rodrigues de Alcântara pelos valiosos conselhos profissionais, os quais acrescentaram muito á minha formação profissional. E Enio Pereira de Souza pelo qual adquiri profunda admiração e carinho pelo excelente profissional, grande capacidade intelectual e de caráter e coração imensos. Foi maravilhosa a oportunidade de trabalhar com vocês.

Á minha família por todo apoio. Aos amigos de turma pelos momentos de estudo, bem como os de descontração, em especial á Camilla Kassar, Sérgio Rodrigo, Ana Paula Santos e Monik Albuquerque. Aos amigos de curso Alexandra Tavares, Antonio Marcos, Rayonil Carneiro e Edvânia Santos. Aos amigos pessoais Aurilene Barros e Júlia Lopes pela amizade.

Á todos os outros professores da UACA pelos ensinamentos, entre os quais o professor Ivaldo, pela disponibilidade em ajudar aos alunos sempre. A Divanete pela preocupação com os alunos, um exemplo de competência.

A CAPES, pela bolsa.

Á Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), pela oportunidade que me foi concedida a ingressar na pós-graduação.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 – INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2 – OBJETIVOS..... | 3 |
| 2.1. Objetivo Geral..... | 3 |
| 2.2. Objetivos Específicos..... | 3 |
| 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 4 |
| 3.1. Brisas..... | 4 |
| 3.2. Teoria da máquina térmica..... | 12 |
| 3.3. Aplicações da Teoria da Máquina térmica..... | 13 |
| 3.4. Descrição do Modelo..... | 14 |
| 4 – MATERIAIS E MÉTODOS..... | 16 |
| 4.1. Área de estudo..... | 16 |
| 4.2. Características das simulações..... | 17 |
| 4.3. Teoria da máquina térmica aplicadas às circulações..... | 18 |
| 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 21 |
| 5.1. Validação das simulações..... | 21 |
| 5.2. Resultados Simulados..... | 25 |
| 5.3. Estudo de Casos..... | 28 |
| 5.4. Validação Estatística..... | 60 |
| 6 – CONCLUSÃO..... | 63 |
| 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 65 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|------------|---|----|
| Figura 1. | Representação esquemática de uma brisa marítima (Alcântara, 2008). | 1 |
| Figura 2. | Representação esquemática de uma brisa de vale (Alcântara, 2007) | 2 |
| Figura 3. | Estrutura de uma máquina térmica. | 11 |
| Figura 4. | Princípio da máquina térmica sobre o planeta. | 12 |
| Figura 5. | Pontos a e b sobre áreas 1 e 2 respectivamente. | 16 |
| Figura 6. | Topografia das áreas 1 (a) e (b) em relação ao nível médio do mar. | 18 |
| Figura 7. | Comparação entre dados simulados e observados da componente zonal (U) do vento para os dias 7 (a), 9 (b) e 17 (c) de Junho de 1999 em terreno plano. | 22 |
| Figura 8. | Comparação entre dados simulados e observados da componente meridional (V) do vento para os dias 7 (a), 9 (b) e 17 (c) de Junho de 1999 sobre terreno plano. | 23 |
| Figura 9. | Comparação entre dados simulados e observados da Temperatura do ar para os dias 7 (a), 9 (b) e 17 (c) de Junho de 1999 sobre terreno plano. | 24 |
| Figura 10. | Diferença de temperatura entre continente e oceano sobre as áreas 1 e 2 respectivamente – Junho de 1999. | 26 |
| Figura 11. | Média do vento meridional ao longo dos pontos a e b sobre as áreas 1 (a) e 2 (b) durante o mês de Junho. | 27 |
| Figura 12. | Componente v e w*100 do vento para as 14Z (a), 16Z (b), 17Z (c) e 21Z (d) do dia 2 de Junho de 1999 sobre a área 1 – brisa marítima. | 29 |
| Figura 13. | Componente v e w*100 do vento para as 13Z (a), 14Z (b), 15Z (c) e 16Z (d) do dia 2 de Junho de 1999 sobre a área 2 – brisa marítima. | 31 |
| Figura 14. | Eficiência Termodinâmica sobre as áreas 1 (a) e 2 (b) entre os dias 1 e 5 de Junho de 1999, com ênfase no dia 2. | 32 |
| Figura 15. | Diferença de pressão simulada (linha azul) x calculada (linha vermelha) sobre as áreas 1 (a) e 2 (b) entre os dias 1 e 5 de Junho de 1999, com ênfase no dia 2. | 33 |
| Figura 16. | Diferença de pressão não hidrostática sobre a área 1 entre os Dias 1 e 5 de Junho de 1999, com ênfase no dia 2. | 34 |
| Figura 17. | Trabalho Total simulado (linha preta) x calculado (linha verde) sobre as áreas 1 (a) e 2 (b). | 35 |

| | | |
|------------|--|----|
| Figura 18. | Termo de trabalho W_a sobre as áreas 1 (a) e 2 (b) entre os dias 1 e 5 de Junho de 1999, com ênfase no dia 2. | 36 |
| Figura 19. | Componentes v e $w*100$ do vento para as 17Z (a), 18Z (b), 20Z (c) e 21 (d) do dia 9 de Junho de 1999 sobre a área 1 – brisa marítima. | 38 |
| Figura 20. | Componentes v e $w*100$ do vento para as 17Z (a), 18Z (b), 20Z (c) e 21 (d) do dia 9 de Junho de 1999 sobre a área 2 – brisa marítima. | 39 |
| Figura 21. | Eficiência Termodinâmica sobre as áreas 1 (a) e 2 (b) entre os dias 5 e 10 de Junho de 1999, com ênfase no dia 9. | 41 |
| Figura 22. | Diferença de pressão simulada (linha azul) x calculada (linha vermelha) sobre as área 1 (a) e 2 (b) entre os dias 5 e 10 de Junho de 1999, com ênfase no dia 9. | 42 |
| Figura 23. | Diferença de pressão não hidrostática sobre a área 1 entre os dias 5 e 10 de junho de 1999, com ênfase no dia 9. | 43 |
| Figura 24. | Trabalho Total simulado (linha preta) x calculado (linha verde) sobre as áreas 1 (a) e 2 (b). | 44 |
| Figura 25. | Termo de trabalho W_a sobre as áreas 1 (a) e 2 (b) entre os dias 5 e 10 de Junho de 1999, com ênfase no dia 9. | 45 |
| Figura 26. | Componente v e $w*100$ do vento para as 08Z (a), 09Z (b), 10Z (c) e 11Z (d) do dia 7 de Junho de 1999 sobre a área 1 – brisa terrestre. | 48 |
| Figura 27. | Componente v e $w*100$ do vento para as 04 (a), 05Z (b), 07Z (c) e 08Z (d) do dia 7 de Junho de 1999 sobre a área 2 – brisa terrestre. | 49 |
| Figura 28. | Componentes v e $w*100$ do vento para as 9Z (a), 10Z (b), 11Z (c) e 12Z (d) do dia 17 de Junho de 1999 sobre a área 1 - brisa terrestre. | 52 |
| Figura 29. | Componentes v e $w*100$ do vento para as 13Z (a), 14Z(b), 15Z (c) e 16Z (d) do dia 17 de Junho de 1999 sobre a área 2 – brisa terrestre. | 53 |
| Figura 30. | Eficiência Termodinâmica sobre as áreas 1 (a) e 2 (b) entre os dias 15 e 20 de Junho de 1999, com ênfase no dia 17. | 54 |
| Figura 31. | Diferença de pressão simulada (linha azul) x calculada (linha vermelha) sobre as áreas 1 (a) e 2 (b) entre os dias 15 e 20 de junho de 1999, com ênfase no dia 17. | 55 |
| Figura 32. | Diferença de pressão não hidrostática sobre a área entre os dias 15 e 20 de Junho de 1999, com ênfase no dia 17. | 56 |
| Figura 33. | Trabalho Total simulado (linha preta) x calculado (linha verde) sobre as áreas 1 (a) e 2 (b). | 57 |

- Figura 34. Termo de trabalho W_a sobre as áreas 1 (a) e 2 (b) entre os dias 15 e 20 de Junho de 1999, com ênfase no dia 17. 58
- Figura 35. Correlação dos parâmetros estatísticos de Pressão e Trabalho Total sobre as áreas 1(a e c) e 2 (b e d). 61,62 e 63

RESUMO: Circulações do tipo brisa ocorrem devido ao gradiente horizontal de temperatura entre duas superfícies com características distintas. O objetivo deste trabalho foi analisar o acoplamento entre brisas de vale-montanha com as brisas marítima-terrestre, aplicando-se a teoria de máquina térmica. Para tanto, foram utilizadas duas regiões com características topográficas diferentes, sendo uma plana e uma com mais de 800 metros de inclinação. O período de observação foi todo o mês de junho de 1999, com destaque aos dias 2 e 9 que apresentaram predomínio da brisa marítima e 7 e 17, devido a forte influência da brisa terrestre. Os resultados simulados foram confrontados aos dados obtidos pela teoria de diferença de pressão utilizando-se métodos estatísticos de correlação e aplicando-se um teste de significância. Para uma maior confiabilidade das simulações, os resultados numéricos foram comparados a dados coletados por radiossonda nos dias 7, 9 e 17, às 12Z, devido à acessibilidade dos dados observados durante os respectivos dias. Os resultados encontrados nesta pesquisa foram satisfatórios, validando as simulações bem como a teoria de máquina térmica.

Palavras-chave: *Brams, Máquina térmica, Circulações do tipo brisa, Topografia.*

ABSTRACT: breeze type circulations occur due to horizontal temperature gradient between two surfaces with different characteristics. The aim of this study was to analyze the coupling between mountain-valley breezes with sea-land breezes, applying the heat engine theory. Therefore, two regions were used with different topographical features, with a flat, one with over 800 meters of slope. The observation period was the month of June 1999, highlighting the day 2:09 that showed predominance of sea breeze and 7:17, due to the strong influence of the land breeze. The simulation results were compared with data obtained by the pressure difference theory using statistical correlation methods and applying a significance test. For increased reliability of simulations, numerical results were compared to data collected by radiosonde at 7, 9:17, at 12Z due to the accessibility of the data observed during their days. The results found in this study were satisfactory, validating the simulations as well as the heat engine theory .

Keywords: *Brams, Heat engine, type breeze circulations, Topography.*

1- INTRODUÇÃO

As células de circulação ocorrem devido à distribuição irregular de energia solar e da distribuição assimétrica de continentes e oceanos, sendo responsável pelo transporte de calor, massa e umidade (Molion e Bernardo 2000). No caso da circulação geral da atmosfera, esse transporte de umidade ocorre dos trópicos em direção aos pólos e retorna dos pólos aos trópicos trazendo ar frio. Esse tipo de circulação ameniza o clima no planeta, fazendo com que os trópicos (pólos) não se aqueçam (resfriem) continuamente.

Circulações em escalas menores como as brisas marítimas são documentadas como fenômenos de mesoescala, que além de exercerem mudanças atmosféricas sobre uma região, são conhecidas por produzirem impactos no clima local e também sobre a qualidade do ar (Abbs e Physick, 1992); Simpson, (1994); Gangoiti et al., (2002).

Durante o dia, devido suas capacidades térmicas diferentes, a radiação solar aquece mais o continente do que a superfície do oceano adjacente, criando um gradiente horizontal de temperatura do ar próximo à superfície e, conseqüentemente, um gradiente horizontal de pressão. Como resultado, o ar relativamente mais frio sopra do oceano em direção ao continente, enquanto o ar quente ascende sobre o continente até determinado nível e retorna em direção ao oceano acima da camada de ar frio, como pode ser no esquema apresentado na Figura 1.

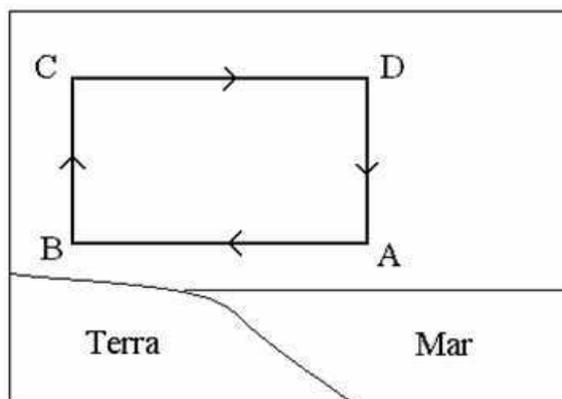


Figura 1 – Representação esquemática de uma brisa marítima (Alcântara, 2008).

Durante a noite o mecanismo se inverte, o continente tende a perder calor devido ao resfriamento radiativo, se tornando mais frio em relação ao oceano. O ar em contato com a superfície oceânica se aquece e se expande, forçando então o vento a fluir do continente em direção ao mar, dando origem a brisa terrestre.

As brisas de vale-montanha são formadas pelo contraste de entropia entre um terreno inclinado e um terreno plano adjacente, (Souza, 2000). Durante o dia, as encostas se aquecem devido a grande quantidade de energia recebida, tornando a temperatura do solo mais elevada do que a do ar adjacente. Com isso, o ar que está em contato com este solo se aquece mais do que ar sobre a superfície do vale. Esta massa de ar mais aquecida passa a ter densidade menor se expandindo, e por continuidade de massa o ar do vale se desloca em direção à montanha, dando origem a brisa de vale ou ventos anabáticos. A brisa de vale resulta de um processo oposto, durante a noite a superfície da montanha se torna mais fria, devido à perda radioativa, o ar em contato com o solo, se resfria, se tornando mais denso que o ar adjacente e por efeito da gravidade, o ar desce as encostas se deslocando em direção aos vales, dando origem a brisa de montanha ou ventos catabáticos, (Retallack, 1977). Este esquema de brisa vale-montanha pode ser observado a partir da Figura 2.

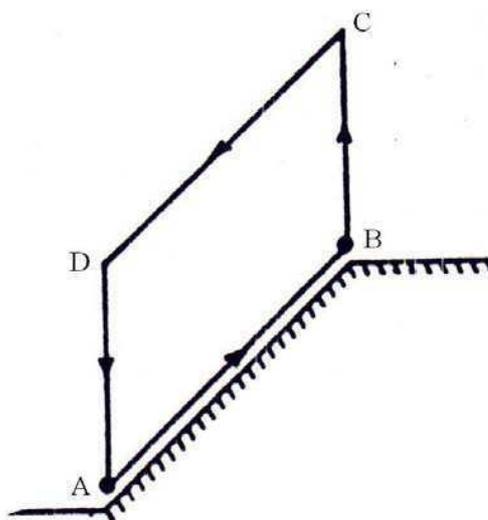


Figura 2 – Representação esquemática de uma brisa de vale (Alcântara, 2007).

Além destas circulações, pode-se encontrar na literatura outros tipos de brisa, como as lacustres, formadas a partir do gradiente térmico entre lagos e continentes, e circulações não convencionais, provocadas por heterogeneidade de superfície, como o contraste entre floresta e pastagem.

Um método que vem sendo aplicado para estimar formação e intensidade de brisas consiste na aplicação da teoria de máquina térmica, baseada no princípio da máquina térmica de Carnot. Este método constitui-se de um mecanismo formado por

uma fonte quente e uma fonte fria, onde parte do calor que entra na máquina é utilizada para realização de trabalho e outra parte é rejeitada para o reservatório frio.

Um dos trabalhos pioneiros quanto à aplicação da teoria da máquina térmica para circulações de brisa no Brasil é de Souza et al. (2000). Neste trabalho, foi calculada a diferença de pressão entre uma área de floresta e pastagem e discutidos os papéis do calor sensível, calor latente e da elevação do terreno no processo de intensificação das circulações. Em seguida, Alcântara e Souza (2007) estudaram as brisas que se formam na costa leste do nordeste brasileiro sob o mesmo ponto de vista. Porém, questões como o acoplamento entre brisa marítima-terrestre e de vale-montanha não foram bem solucionadas.

2.0 - OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral: Avaliar os mecanismos de formação, intensificação e manutenção das circulações de brisas em superfícies inclinada e plana, aplicando a teoria de máquina térmica, utilizando o modelo atmosférico BRAMS;

2.2. Objetivos Específicos: 1) Aplicar a teoria de máquina térmica em brisas de vale/montanha;

2) Entender por que as brisas terrestres podem ser tão intensas quanto as brisas marítimas já que espera-se que estas sejam de menor intensidade;

3) Entender a contribuição e intensificação no acoplamento entre brisas de vale/montanha e marítima/terrestre.

3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Brisas

As circulações locais são circulações de ar induzidas termicamente por processos de superfície em regiões heterogêneas. Essas circulações podem ser convencionais, como a circulação de brisa marítima/terrestre, vale/montanha e lacustres, ou não convencionais, como as induzidas por diferenças na umidade do solo ou na vegetação (Cabral, 2008).

A brisa marítima é um fenômeno de mesoescala, comum durante os meses de verão em muitas zonas costeiras. De acordo com Franchito e Yamazaki (1982) que realizaram um estudo sobre circulações de brisas marítima-terrestre na costa leste do norte e nordeste brasileiro, as brisas marítimas são mais intensas nos meses de fevereiro, outubro e dezembro, devido ao maior aquecimento da superfície. A brisa terrestre foi mais intensa nos meses chuvosos, como junho e julho, devido ao menor aquecimento continental nesta época, tornando o continente mais frio que a água.

O estudo de brisas vem sendo realizado e documentado desde os tempos antigos (Neumann, 1973). Desde então, várias ferramentas vem sendo utilizadas com o propósito de melhorar a qualidade dos resultados. Durante metade do século passado, um grande número de pesquisas tem se voltado à modelagem numérica de brisa marítima bem como estudos através de dados observados (Atkinson, 1981; Pielke, 1974; Abbs e Physick, 1992; Simpson, 1994; Tjim et al., 1999). Rotuno et al. (1996) e Miller et al. (2003) também sugerem que esta circulação pode influenciar significativamente o clima de regiões costeiras contribuindo para o transporte de energia e poluentes e desempenhando assim um importante papel na qualidade do ar.

A intensidade deste tipo de circulação pode mudar de acordo com as características sinóticas, que são altamente variáveis, pois circulações de brisas, geralmente estão acopladas a sistemas de escalas maiores e, mesmo se tratando de uma circulação de mesoescala, elas também podem ser influenciadas pela intensidade e direção dos ventos sinóticos. No NEB (Nordeste Brasileiro), por exemplo, as circulações de brisa marítima, nem sempre são evidentes, devido à presença em maior escala dos ventos alísios, persistentes e intensos durante grande parte do ano. As brisas tem uma contribuição discreta quanto à mudança da intensidade e direção desses ventos

de escala sinótica, que irá depender da forma da costa e da velocidade do vento resultante da superposição alísio-brisa, (Varejão-Silva, 2001).

De acordo com Rotunno et al. (1992), a brisa terrestre ainda é menos estudada que a brisa marítima. A fim de contribuir para o melhor entendimento da brisa terrestre, Fritz & Teixeira, (2008) realizaram experimentos numéricos sobre o Estado do Ceará para observação desta circulação. Os referidos autores verificaram que a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) associada à brisa terrestre desenvolveu bastante nebulosidade ocasionando chuvas sobre Fortaleza. Verificaram ainda que é possível o acoplamento das brisas terrestres com outros sistemas de grande escala como os Distúrbios ondulatórios de Leste, que podem atingir o Ceará mesmo após o período chuvoso da região durante a madrugada e início do dia.

As circulações de brisa além de favorecer a precipitação sobre uma região, também são responsáveis por transportar aerossóis naturais e antropogênicos, agindo no sentido de renovar o ar das áreas costeiras, contra a estagnação da atmosfera, sendo ao mesmo tempo um mecanismo de transporte (Cavalcanti, 1982). O estudo realizado por Baumbach e Vogt (1999) através de sondagens e medições de dirigíveis, investigou a influência da circulação de vale-montanha, na qualidade do ar em Freiburg, cidade situada entre montanhas e a Floresta Negra na Alemanha. Eles observaram que a floresta e a parte inferior da encosta, criaram uma circulação do tipo brisa de vale-montanha. Também foi observado o transporte de massa de ar poluído indo da Floresta Negra em direção à cidade durante a noite. Por outro lado, durante condições meteorológicas estáveis com baixa velocidade do vento, as massas de ar poluídas da floresta negra durante o dia eram transportadas de volta a Freiburg pelo vento da montanha, de modo a se ter ar poluído sobre a região, tendo assim, uma recirculação de poluentes.

Assim como a topografia, a heterogeneidade vegetal contribui significativamente para o surgimento de circulações de brisa, como mostrado por et al. (2000), onde os autores fizeram observações em uma área de floresta e uma clareira próxima e verificaram que quando uma floresta é devastada ocorrem mudanças no saldo de energia à superfície. Se o gradiente de temperatura for forte o bastante entre a área desmatada e a floresta podem ocorrer circulações convectivas entre as regiões.

Lelieveld et al. (2002) concluíram que superfícies cobertas por vegetações distintas também provocam impactos sobre a circulação de brisa, modificando-a. Quando o escoamento é termicamente induzido por um terreno inclinado, a circulação

dependerá das condições do ambiente e da vegetação. A inclinação do terreno é capaz de gerar circulações de brisa e se a vegetação for densa essa circulação pode inclusive ser intensificada (Segal et al., 1988).

Segal et al. (1992) também ressaltaram a importância do fluxo de calor sensível na intensidade de brisas diurnas. Eles demonstraram em seus experimentos que a presença da vegetação pode modificar os fluxos de calor sensível na superfície, em comparação com os de uma superfície de solo nu sob as mesmas condições ambientais. Em particular, os fluxos de calor sensível e latente na superfície (razão de Bowen) variam com as características da superfície vegetada. Portanto, a diferença na cobertura vegetal entre duas regiões próximas exerce uma grande influência no equilíbrio energético da superfície. Essa energia térmica induz várias circulações de mesoescala.

Regiões áridas e semiáridas são muito sensíveis a uma variedade de agentes físicos, químicos e processos de degradação biológica, conhecidos coletivamente como desertificação, que consiste na destruição da cobertura vegetal original. Diante desta problemática, Miao et al. (2003) desenvolveram um estudo na península ibérica, região sensível à desertificação, utilizando o modelo RAMS versão 3b, para a análise do impacto da topografia sobre a brisa marítima/terrestre e a influência da umidade, vegetação e da superfície do solo sobre circulações de brisas. O estudo mostrou que a topografia desempenha papel importante na circulação de brisa marítima e que quando a brisa do mar é acoplada com ventos de vale/montanha, a intensidade da brisa marítima aumenta. Na ausência de topografia inclinada foi observado que a circulação de brisa marítima tem uma penetração para o interior do continente significativa, porém, de fraca intensidade.

Ainda segundo Miao et al. (2003), o fluxo terrestre é mais intenso quando há degradação da superfície, intensificando a corrente de retorno e a velocidade do ar ascendente associado com a frente da brisa marítima, causando uma maior penetração desta no continente. Os resultados também mostraram que a degradação no solo modificou a evolução espaço-temporal das brisas, resultando em um início mais precoce e um final mais tardio. Para os casos de deserto e floresta, a circulação de brisa mostrou-se bem desenvolvida. Sobre o deserto, os autores observaram que a brisa marítima adentrou ao continente em até 75 km, já para o caso de floresta, a brisa alcançou 20 km continente adentro. Portanto, a degradação da terra produz um aumento na magnitude da brisa. Resultados semelhantes são apresentados por Mahrer e Pielke (1977), Kikuchi et al. (1981), Lu e Turco (1995) e Milla'n et al. (2000).

Alguns autores vem desenvolvendo pesquisas que tem por finalidade detectar brisa, utilizando além da modelagem numérica e dos dados observados de estações, o sensoriamento remoto, através de imagens de satélites, como foi realizado por Demato et al. (2003). Os autores utilizaram dados e imagens dos Satélites Ambientais de Órbita Polar (POES) para estimar a ocorrência das frentes de brisa marítima na Europa Ocidental e sua penetração no interior do continente. Eles observaram que quando havia a existência de anticiclones, que tem como característica o predomínio de céu claro, se tornava impossível detectar brisas, devido a ausência das nuvens. Portanto, os dias de céu claro foram excluídos, embora fosse observado que um gradiente térmico entre terra e mar e vento de grande escala relativamente fraco pudessem permitir o desenvolvimento da brisa marítima e sua penetração para o interior do continente.

Lensky e Dayan (2011), com o objetivo de detectar brisa marítima durante o verão, em Israel utilizaram sequências contínuas de dados do satélite geoestacionário METEOSAT no canal infravermelho térmico. Este canal não depende da presença de nuvens, permitindo a análise de brisas em condições de céu claro. A detecção temporal da brisa marítima a partir de dados de satélite é baseada no contraste térmico entre o ar mais frio vindo do mar com o ar quente do continente. Os autores utilizaram dados de velocidade e direção do vento em estações de superfície, simultaneamente com os dados de satélite para a observação da influência da escala sinótica sobre a circulação de brisa, bem como seu comportamento espaço-temporal. A variação diurna da velocidade e direção do vento se mostraram fracas e variaram até o início da brisa marítima, que ocorreu por volta das 12Z. A grande escala exerceu uma influência que resultou em ventos fortes de oeste que persistiram ao longo do dia, suprimindo os processos da mesoescala. Estes ventos também foram visíveis nos dados de satélite. Nos casos em que o fluxo sinótico adentrou o continente, a brisa marítima foi mascarada sendo difícil sua detecção.

Planchon et al. (2006) com o objetivo de estipular a frequência de brisa marítima e sua penetração no interior do continente, durante a estação seca (setembro-dezembro) sobre o NEB em 2000, obtiveram resultados satisfatórios ao utilizar o sensoriamento remoto em seus experimentos. Os autores utilizaram dados de satélites geoestacionários GOES-8, no canal visível, para localizar a penetração máxima da brisa adotando uma metodologia de identificação de nuvens baixas. Eles perceberam que a umidade vinda do oceano favoreceu o desenvolvimento de nuvens convectivas associadas a brisa marítima, mesmo durante os meses de estiagem. As linhas de nuvens se apresentaram

claramente permitindo a verificação da frequência da brisa marítima para a estação de seca no nordeste brasileiro. As frentes de brisa marítima penetraram mais sobre o interior do continente entre setembro e novembro, com uma distância máxima da costa no Ceará de 100 km.

Azorin-Molina et al. (2009), também utilizaram imagens do POES durante o período diurno para obter uma distribuição espacial das áreas convectivas associadas à brisa marítima sobre o Mediterrâneo. Os autores identificaram a localização de zonas preferenciais da convergência da brisa e observaram que a mesma estava relacionada à forma da costa e efeitos orográficos. Foram utilizados nesta metodologia, dados de velocidade e direção do vento na Camada Limite Atmosférica, para fornecer dados estatísticos sobre o efeito predominante da grande escala sobre os fluxos convectivos de brisa do mar.

Circulações de brisa apresentam dependência com fatores como a forma do litoral, características topográficas, fluxos de calor sensível, entre outros. DeCaria, (2005) observou que estas circulações ocorrem com mais frequência e intensidade sobre regiões de latitudes médias, devido à aceleração de Coriolis, que se apresenta mais fraca sobre os trópicos. Nas altas latitudes a aceleração de Coriolis desvia o vento, diminuindo o alcance das brisas.

Crosman e Horel (2010) realizaram estudos numéricos de brisa marítima e lacustre e sua dependência com dez variáveis geofísicas (fluxo de calor sensível, vento geostrófico, parâmetro de Coriolis, estabilidade atmosférica, coeficiente de rugosidade, inclinação e altura do terreno, formato da costa, umidade e dimensões de corpos d'água). Os autores concluíram que todas as variáveis influenciam a circulação da brisa e que a diferença do fluxo de calor sensível entre o mar e o continente é o principal responsável pela geração das circulações. O vento geostrófico e a estabilidade atmosférica tem um efeito sobre a brisa que dependerá da localização da área de estudo e da dimensão do corpo d'água. Ainda segundo os autores, as diferenças nas características das brisas podem ser explicadas devido à força de Coriolis, altura e declividade do terreno. Os impactos da curvatura do litoral, comprimento de rugosidade e umidade atmosférica na brisa marítima são, geralmente, menos intensos.

Qian et al. (2011), desenvolveram um experimento com o objetivo de observar a influência do terreno nas circulações de brisa através de modelos numéricos, incluindo cálculos lineares e não lineares, com ênfase nos ventos oriundos do continente (frente de brisa terrestre). Os autores realizaram simulações idealizadas com diferentes valores

para amplitude térmica (ϵ), altura (H) e velocidade do vento (U). A topografia utilizada foi a de um planalto, que teve sua altura idealizada através de um modelo 2-D. Todos os casos incluíram simulações com e sem o vento de grande escala. Eles observaram em suas simulações que a topografia exerceu grande influência nas brisas, de forma que quanto maior a topografia, mais forte era o gradiente térmico. Geralmente as frentes de brisa marítima são significativamente mais fortes do que as frentes de brisa terrestre, porém, neste trabalho observou-se que inibindo o vento de grande escala na simulação e havendo acréscimos na altura da topografia, os efeitos se inverteram, a brisa marítima acabava por ficar estagnada na base do planalto, devido à inclinação da topografia, formando uma piscina de ar frio que intensificou a brisa terrestre e enfraqueceu a brisa marítima do dia seguinte.

Melo et al. (2001) realizaram simulações numéricas utilizando o modelo RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*) para a observação de brisas sobre o estado da Paraíba. Os autores observaram que a brisa marítima atingiu sua máxima intensidade entre 17HL e 18HL, tendo sido os resultados simulados considerados satisfatórios, quando comparados aos dados observados. Também verificaram que a relação entre convecção e topografia são não lineares para a região.

Alguns trabalhos relatam a problemática do estudo de brisas marítima devido à escassez de dados observados sobre a superfície oceânica. Como destacado por Atkinson (1981), que realizou experimentos sobre brisa marítima, observando sua penetração sobre o interior do continente. O autor observou que a maior penetração da brisa marítima sobre o continente dependia intrinsecamente da estrutura do litoral, dos gradientes horizontais de temperatura e da situação de grande escala, que constituem os elementos fundamentais para forçar os ventos oriundos do oceano a se deslocarem continente adentro. No entanto, pouco se sabe sobre características como horário preciso de sua formação, bem como tempo de duração da brisa marítima, devido à existência de poucos dados sobre a água.

Kottmeier et al. (2000), Pérez Landa et al. (2006), Ries e Schlunzen (2009) e Fay e Neunh Userer (2006) realizaram simulações utilizando modelos numéricos de alta resolução, tendo como finalidade a previsão climática. Todos estes estudos encontraram como resultados a presença de uma circulação de mesoescala, porém não mostraram resultados conclusivos sobre as áreas oceânicas, devido à falta de dados experimentais.

Fock e Schlünzen (2012), analisaram dados de alta resolução, durante o período de 1 ano, coletados pelo “Sistema de Dados Meteorológicos” (MDS) em 27 estações,

com o objetivo de verificar a influência da brisa marítima na climatologia do Golfo de Valência, na Espanha, bem como analisar o impacto do terreno sobre os sistemas ocorrentes na região costeira. O sistema de dados MDS foi constituído por 21 bóias distribuídas sobre o Golfo de Valência, divididos em dois conjuntos dispostos sobre a parte Norte e Sul da área de estudo. Seis estações terrestres também fizeram parte das medições, tendo sido coletados dados de Temperatura, Umidade reativa, Pressão e Vento horizontal. Esta foi, a primeira pesquisa focada na análise da estrutura horizontal da circulação de brisa marítima utilizando um grande número de medições ao longo do mar. Os autores observaram que houve um maior desenvolvimento de brisa marítima entre Julho e Setembro, com 50% de ocorrência, tendo sido também, o período de maior temperatura do ar e que as circulações se mostraram presentes em 2 de cada 3 dos dias observados. Novembro e Abril foram períodos de ocorrência de fracas circulações de brisa marítima, com os menores valores de umidade relativa encontrados no período da pesquisa.

Ainda de acordo com Fock e Schlünzen, a brisa terrestre teve início em torno da meia noite até as primeiras horas da manhã, já a brisa marítima passou a dominar durante o resto do dia. O vento começou a mudar de direção a partir das 10Z, dando início a circulação de brisa marítima. Os resultados encontrados nesta pesquisa sugerem que o impacto da topografia e uso do solo influenciam nas médias anuais tanto sobre o terreno complexo como sobre a água.

3.2 - Teoria da máquina térmica

De acordo com Woolard (1926), no sistema físico da atmosfera, é possível encontrar inúmeras formas de energia mudando constantemente de uma forma para outra. Não se sabe ainda detalhes dessas conversões de energia, porém, sabe-se que esta é a maior causa das atividades atmosféricas.

O autor ainda sugere que a energia cinética, por exemplo, está constantemente sendo dissipada, transformando fricção e turbulência em calor. Portanto, um fornecimento contínuo de energia deve estar disponível para manter a atividade constante da atmosfera. Cerca de 67% da energia solar é utilizada na formação de fenômenos atmosféricos antes de ser novamente devolvida para o espaço. Pouco mais de 2,0% da energia cinética é utilizada para vencer os processos de dissipação para a

manutenção da circulação planetária. Os processos que envolvem circulações atmosféricas são complicados por serem bastante irregulares, tornando mais fácil, sua observação e distribuição energética através das teorias de máquinas térmicas.

Uma máquina térmica pode ser definida como qualquer dispositivo capaz de transformar calor em trabalho mecânico, portanto, a convecção atmosférica é uma máquina térmica natural, segundo Rennó e Ingersoll (1996).

A segunda lei da termodinâmica, porém, afirma que é impossível atingir 100% de eficiência na conversão de calor em trabalho (Adkins, 1968). Portanto, uma máquina térmica não pode operar com o calor que flui a partir de um único reservatório. Qualquer máquina térmica deve absorver o calor de um reservatório quente e rejeitar uma fração para um reservatório mais frio ao realizar trabalho, como pode ser observado de acordo com a Figura 3.

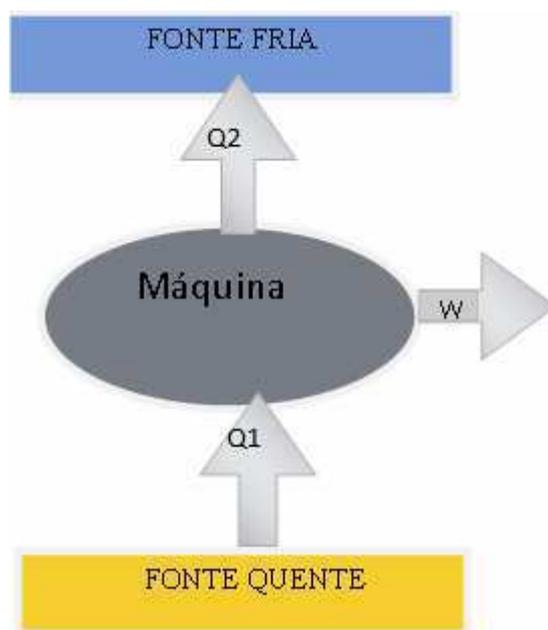


Figura 3 – Estrutura de uma máquina térmica.

De acordo com Rennó e Adams (2005), a atmosfera da Terra absorve energia em temperatura mais alta do que a que emite de volta para o espaço e como resultado, o sistema atmosférico é capaz de realizar trabalho. O trabalho disponível a partir da atmosfera como máquina térmica é usado para gerar movimentos convectivos que transportam energia a partir de fontes de calor (de baixa latitude e próximo da superfície) para reservatórios frios (de alta latitude e regiões da troposfera superior). Em estado estacionário, a energia cinética gerada pelos movimentos resultantes do trabalho

realizado pela máquina térmica atmosférica é equilibrada pela dissipação de atrito. Parte do calor da superfície da terra é convertido em trabalho (expansão ou compressão do ar) e outra parte é lançada para uma fonte fria externa, conforme pode ser visto de acordo com a Figura 4.

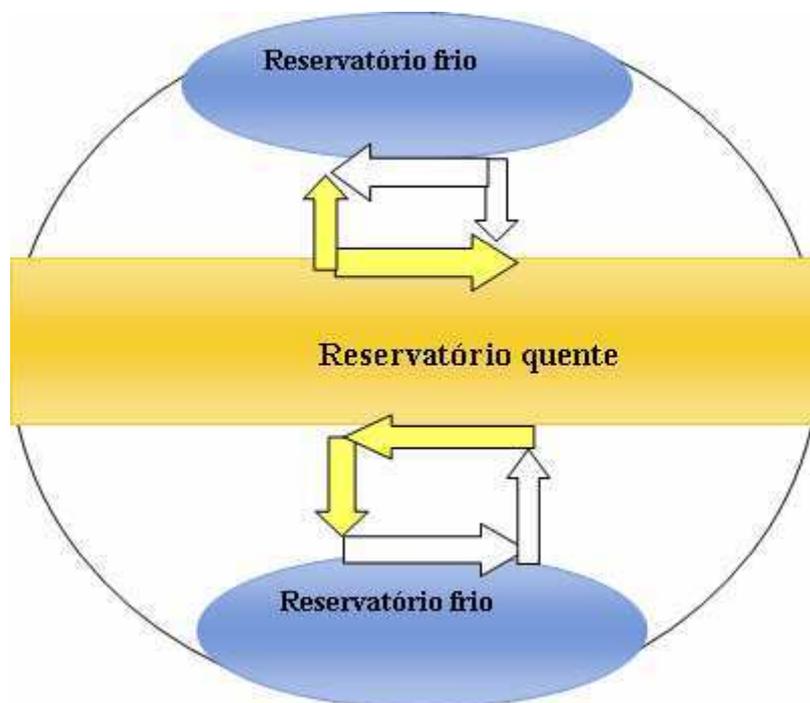


Figura 4 – Princípio de máquina térmica sobre o planeta.

3.3 – Aplicações da teoria de máquina térmica

A teoria de máquina térmica para observação de fenômenos atmosféricos foi aplicada em algumas pesquisas, apresentando bons resultados. Rennó e Adams (2005) mostraram que o método de máquina térmica utilizado em modelos climáticos globais, com simulações idealizadas foi satisfatório, indicando que a eficiência termodinâmica e o trabalho de atrito fornecem uma medida de irreversibilidade física e numérica em qualquer circulação aberta (hadley) ou fechada (circulação geral). Fica evidenciado, mais uma vez, o papel da dissipação próximo à superfície como fonte extra de entropia para a intensificação dos sistemas convectivos. A presente teoria sugere que quanto maior for à dissipação menor o trabalho de expansão no ramo inferior de uma circulação convectiva.

Souza et al. (2000) usaram a teoria da convecção como uma máquina térmica para explicar a queda de pressão ao longo do ramo inferior de circulações convectivas. Os dados utilizados foram observacionais, em duas áreas distintas do Estado de Rondônia, uma vegetada e a outra de pastagem. Ainda segundo os autores, as circulações do tipo brisa são uma resposta da atmosfera a um gradiente de entropia que se estabelece à superfície. Essas circulações surgem devido à diferença entre os fluxos de calor sensível e latente existentes entre duas superfícies com características distintas (Mahfouf et al., 1987; Avissar e Pielke, 1989; Mahrer e Pielke, 1978).

Rennó e Bluestein (2001) utilizaram a teoria termodinâmica simples para vórtices, proposta por Rennó et al. (1998). A teoria baseia-se na máquina térmica e prevê a pressão central e a velocidade dos ventos em vórtices convectivos, proporcionando uma interpretação física das características gerais do sistema estudado. A teoria mostrou que os vórtices convectivos são mais propensos a se formarem em regiões com fortes correntes ascendentes quentes e úmidas e correntes descendentes mais frias e secas. Ainda de acordo com os autores, esse tipo de sistema tem um grande interesse meteorológico, pois se assemelham termodinamicamente a furacões ou tornados que possuem um grande poder destrutivo, causando diversos danos à população local.

Souza (2004) apresentou uma teoria baseada no princípio de máquina térmica, para a compreensão do trabalho de expansão e de compressão nos ramos inferior e superior de circulações convectivas. O trabalho de expansão associado à circulação é usado, em parte, para vencer dissipação ao longo da circulação. O trabalho de compressão é usado para bombear calor de volta à superfície.

Alcântara e Souza (2008) testaram a teoria proposta por Souza (2000) para a avaliação da intensidade e profundidade das brisas marítima-terrestre acopladas com brisas de vale montanha utilizando simulações numéricas do modelo BRAMS, sobre a costa leste do NEB. No experimento foram realizadas duas simulações com topografia e uma idealizada sem topografia, nas latitudes de 07°S e 08°S, para se avaliar o efeito da inclinação do terreno na intensidade da brisa marítima-terrestre. Os autores concluíram que o efeito da topografia intensifica a brisa marítima e enfraquece a brisa terrestre, além do que, os resultados obtidos mostraram que os máximos valores de eficiência termodinâmica ocorreram no período diurno.

Ainda de acordo com Alcântara e Souza (2008), isso acontece porque o ar se comprime (e se aquece) adiabaticamente, à medida que desce a montanha e isso

aumenta o fluxo de calor para o solo tirando energia da circulação. Embora, o contraste térmico das três simulações se mostrasse mais forte no caso sem a topografia (pois, a temperatura do ar tende a diminuir com a altura), a intensidade da circulação neste caso foi mais fraca. Este resultado mostrou que o contraste térmico não é o único parâmetro que influencia estas circulações. Para as simulações com presença de topografia, os resultados mostraram que a intensidade das circulações foi forte, devido à expansão do ar que ocorre quando uma parcela tem sua trajetória montanha acima, fazendo com que haja uma absorção extra de entropia, fornecendo mais combustível para a circulação, que, por sua vez, se torna mais intensa. Portanto, quanto maior a elevação do terreno maior a diferença de pressão e a intensidade da brisa, tirando-se a contribuição da inclinação do terreno, a brisa será formada somente pelo contraste térmico.

3.4 – Descrição do modelo

O modelo RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*) desenvolvido na *Colorado State University*, consiste em um modelo numérico não hidrostático, desenvolvido para simular circulações atmosféricas em diferentes escalas. Utiliza um sistema de grades aninhadas, permitindo que as equações possam ser resolvidas simultaneamente para cada grade simulada. Este modelo possui ainda um leque de parametrizações físicas, apropriadas para simulações como trocas à superfície, turbulência, convecção, radiação, microfísica entre outros.

O modelo atmosférico BRAMS, consiste numa versão derivada do RAMS, inclui um esquema de cumulus profundos e rasos com base na abordagem de fluxos de massa (Grell e Devenyi, 2002) e dados diários de umidade do solo, para inicialização da simulação (Gevaerd e Freitas, 2006). A parametrização da convecção no BRAMS usa a energia cinética turbulenta para estimar a distância máxima que as parcelas de ar podem se expandir, determinando assim a sustentação da convecção.

O BRAMS possui uma série de opções de parametrizações físicas em seu código. As principais são: radiação de onda longa curta (Chen e Cotton, 1983), turbulência na camada limite atmosférica que é calculada segundo Mellor e Yamada (1982), microfísica de nuvens que segue o esquema descrito por Walko et al. (1995) e convecção rasa que foi desenvolvida por Souza (1999). A parametrização de convecção profunda apresenta duas opções: 1) do tipo Kuo (1974), modificada por Molinari (1985)

e 2) parametrização do tipo Grell (Grell e Dévényi, 2002) e com várias opções de fechamento.

Existe uma colaboração contínua de projetos para o desenvolvimento do BRAMS. Este modelo é apoiado e mantido por uma equipe do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) através de pesquisas como as realizadas por Freitas, 1999, Freitas et al., 2000, 2005a; Souza, 1999; Freitas et al., 2005b). O BRAMS é um software de código aberto disponível gratuitamente pelo site: <http://www.cptec.inpe.br/brams>.

4- MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 – Área de estudo

Foram escolhidas duas áreas distintas para a observação da teoria da máquina térmica aplicada às brisas, a área 1, situada em $04^{\circ}\text{S}041^{\circ}\text{W}$ que apresenta terreno com inclinação de aproximadamente 800 metros e a área 2, com terreno sem inclinação, situada entre as coordenadas de $03^{\circ}\text{S}039^{\circ}\text{W}$, ambas localizadas costa do Nordeste Brasileiro.

Os pontos a e b são referentes ao continente e oceano respectivamente e foram determinados em $2,5^{\circ}$ para dentro do oceano e $2,5^{\circ}$ adentrando o continente, a partir da linha da costa, localizada em $03^{\circ}02^{\prime}\text{S}$ na área 1 e $02^{\circ}05^{\prime}\text{S}$ na área 2. Estes pontos serão importantes no cálculo da teoria e podem ser vistos na Figura 5.

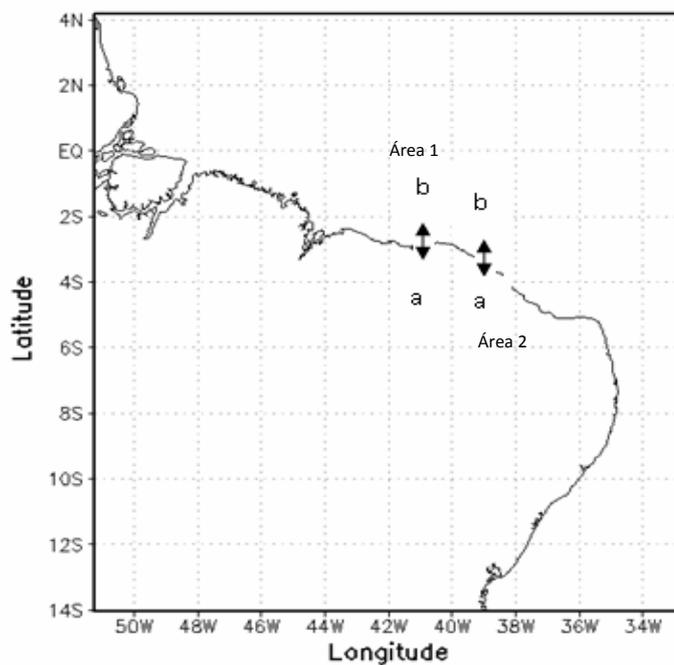


Figura 5 – Pontos a e b sobre as áreas 1 e 2 respectivamente.

4.2 – Características das simulações

As simulações foram configuradas com uma grade de 10 km de resolução e 200 pontos de grade nos eixos X e Y sobre terrenos com inclinações distintas na costa norte do NEB. A coordenada vertical utilizada foi sigma-z, com 11 níveis verticais iniciando em 57m atingindo os 3571m de altura. O ponto central foi fixado em 05°S de latitude e 042°W de longitude. O *nudging* para a escala temporal foi de 1800s. Foram consideradas 9 camadas de solo e as parametrizações utilizadas foram: Radiação – Chen; microfísica - nível 2; solo/vegetação – LEAF e a opção Cumulus foi desligado, para que não fossem reproduzidos processos convectivos e precipitações nas simulações, proporcionando uma melhor visualização do escoamento dos ventos. Os dados de entrada foram de reanálise, do NCEP, com 2,5° de resolução.

As simulações foram geradas para todo o mês de Junho de 1999, devido a disponibilidade dos dados observados para validar as simulações, porém, foram estudados 4 casos isolados, que consistem em dois dias de intensa brisa marítima (dias 2 e 9) e dois dias com presença de brisas terrestres bem definidas (dias 7 e 17). A partir do dia 21, foi observada a presença de perturbações nos campos de vento, possivelmente geradas pela presença de um sistema de escala maior, tendo sido, portanto, descartado do período estudado.

Para a validação das simulações, as componentes zonal (U) e meridional (V) do vento e a temperatura média do ar (°C) em diferentes níveis verticais da atmosfera (10 níveis), foram confrontadas aos dados observados, coletados a partir de radiossondagens próximas as áreas de estudo. Houve, entretanto, algumas diferenças entre as alturas simuladas e observadas que chegaram a ser superiores a 80m. Os dados de radiossondagem utilizados foram obtidos do banco de dados da *University of Wyoming* (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>) para as 12Z. Para uma maior confiabilidade das simulações, foi aplicada a metodologia de Pielke (2002), aos resultados.

As simulações foram realizadas em duas áreas com características topográficas distintas, sendo uma plana em relação ao nível médio do mar e outra com uma inclinação superior a 800m. O objetivo de desenvolver o estudo em áreas com diferentes inclinações foi o de observar a influência do terreno, responsável pela formação de brisa de vale-montanha, no acoplamento com as brisas marítima-terrestre. Observa-se, de

acordo com as Figuras 6 a e b respectivamente, as alturas das áreas 1 e 2 , utilizadas neste experimento.

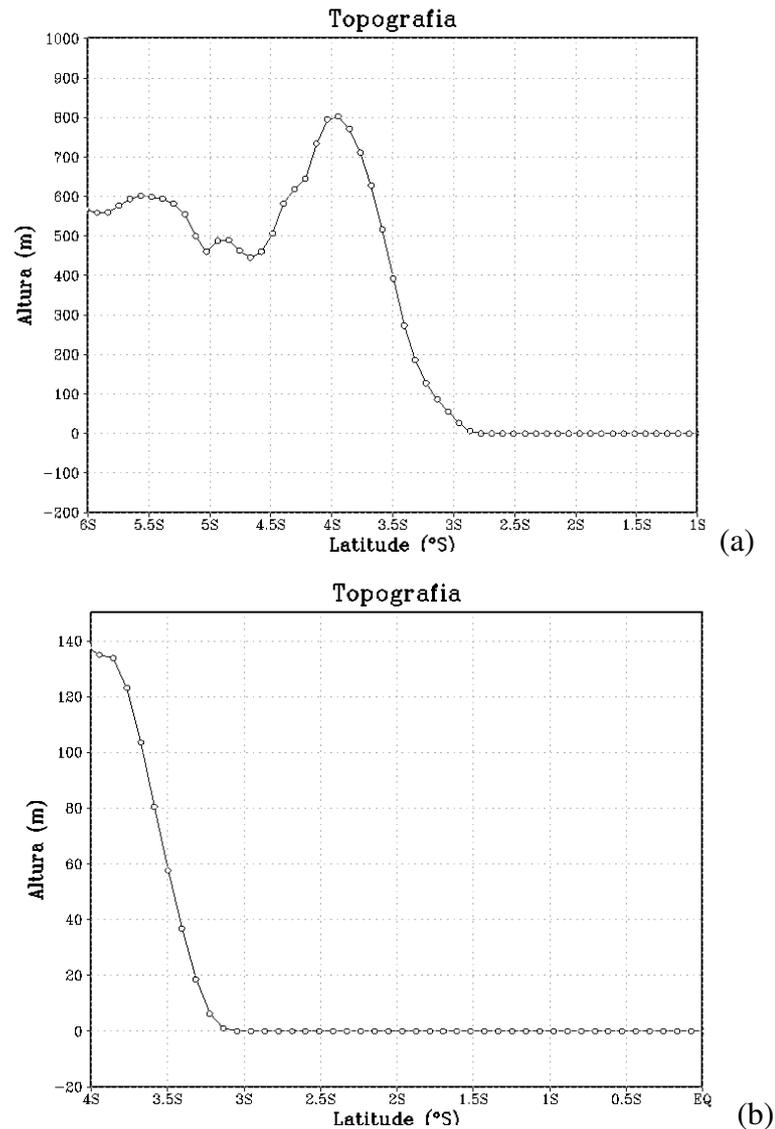


Figura 6 – Topografia das áreas 1 (a) e 2 (b) em relação ao nível médio do mar.

4.3 – Teoria da máquina térmica aplicada às circulações

O presente trabalho consiste na aplicação de metodologia similar à aplicada por Alcântara (2007), sendo, portanto, uma continuação do trabalho de dissertação da referida autora. Assim, esta pesquisa tem como base, aplicar a teoria desenvolvida por Souza (1999) e Souza et al. (2000) onde a convecção é tratada como uma máquina térmica com propósito de se obter uma expressão simples para a diferença de pressão não-hidrostática entre dois pontos, a e b (ver figura 5), obtendo desta forma, a intensidade de uma circulação convectiva em um terreno inclinado.

O primeiro e o segundo princípios da termodinâmica, aplicados ao ar úmido, podem ser escritos como:

$$Tds = (C_p T + L_v r) - \alpha dp \quad (1)$$

Em que, T e a temperatura absoluta do ar, s e a entropia específica do ar, c_p o calor específico do ar seco sob pressão constante, L_v e o calor latente específico de vaporização e r a razão de mistura do vapor d'água. A partir das equações ao longo de uma circulação fechada e de uma linha de corrente obtêm-se a equação 2 :

$$(1 - \gamma) \int_A^B \alpha dp \approx -\gamma \int_A^B d(C_p T + L_v r) - \int_A^B g dz \quad (2)$$

A partir da equação 2, é possível obter expressões para diferença de pressão entre os pontos a e b, bem como o trabalho de expansão da célula convectiva.

Desprezando as variações de c_p e L_v e usando a lei dos gases tem-se a equação que prevê a diferença de pressão entre dois pontos a e b.

$$p_b \approx p_a \exp \left\{ \frac{\gamma}{(\gamma - 1)R} \left[\frac{C_p \Delta T}{T_s} + \frac{L_v \Delta r}{T_s} \right] + \frac{1}{(\gamma - 1)R} \left[\frac{g \Delta z}{T_s} \right] \right\} \quad (3)$$

Para simplificar o entendimento da contribuição da inclinação do terreno nos processos estudados, Souza et al. (2000) e Souza (2004) dividiram a diferença de temperatura entre a e b em duas partes, uma adiabática ΔT_a e outra não adiabática ΔT_{na} , chegando a:

$$\Delta p \approx p_a \left\{ 1 - \exp \left[\frac{\gamma}{(\gamma - 1)R} \left(\frac{c_p \Delta T_{na}}{T_s} + \frac{L_v \Delta r}{T_s} \right) - \frac{\Delta z}{H_s} \right] \right\} \quad (4)$$

O primeiro termo da Equação está diretamente ligado à circulação. Ocorre devido à absorção de calor sensível entre os pontos e é chamado aqui de diferença de pressão não-hidrostática. O segundo termo é referente à absorção de calor latente quando há condensação ao longo da circulação. O último termo é a combinação da queda de pressão hidrostática devido à diferença de altura entre os pontos e uma expansão não-adiabática ao longo do aclave.

Os termos referentes à umidade, na equação 4, serão desprezados, para não haver representação de precipitação, pois o foco são apenas as circulações de brisa.

De acordo com Alcântara (2007), O trabalho total é composto por 4 termos. O primeiro (Wa), consiste na quantidade de calor absorvido no ramo inferior da circulação. O segundo termo (Wb) não foi utilizado neste experimento, para que não houvesse contribuição do calor latente nas circulações. (Wc) é o terceiro termo e representa o trabalho isobárico de expansão e compressão das circulações. (Wd) é o quarto e último termo e está relacionado à expansão que a parcela sofre quando a altitude aumenta.

$$W_a = \frac{\gamma\eta}{1-(\gamma\eta)}(c_p\Delta Tna + Lv\Delta r) + R\Delta Tna + \frac{1}{k}g\Delta Z \quad (5)$$

A eficiência termodinâmica η é obtida a partir da seguinte equação (Souza et al. 2000):

$$\eta = \frac{gZ}{c_p T_h} \quad (6)$$

Em que T_h é a temperatura da região onde calor é absorvido (próximo à superfície) e Z é a profundidade da camada limite turbulenta.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 – Validação das simulações

Para validar os resultados gerados pelo modelo, foram feitas comparações entre os resultados simulados e os dados observados obtidos através de sondagens para as componentes U e V do vento (zonal e meridional, respectivamente) e temperatura do ar (°C), para área 2 às 12Z. De acordo com Figuras 7a, b e c, referentes aos dias 7, 9 e 17 respectivamente, é possível observar que o dia 7 apresentou as maiores diferenças entre os resultados simulados (em azul) e observados (linha vermelha) da componente U do vento. A diferença entre ambos chegou a ser de aproximadamente $6,0 \text{ m.s}^{-1}$. O dia 9 obteve os melhores resultados, com menos de $1,0 \text{ m.s}^{-1}$ de discrepância entre simulado e observado. O dia 17 também apresentou resultados satisfatórios principalmente nos primeiros níveis. Destaca-se que os resultados simulados acompanharam a mesma tendência do observado até os primeiros 1500 metros, tendo escoamento direcionado para leste. Nestes níveis também encontram-se as máximas intensidades do vento que foram em torno de $10,0 \text{ m.s}^{-1}$.

A componente meridional (V) do vento (Figuras 8 a, b e c), apresentou maiores discrepâncias entre o simulado e observado em relação a componente zonal. Assim como para a componente U do vento, as simulações obtiveram resultados mais próximos ao observado nos primeiros níveis a partir da superfície, porém, nos dias 7 (Figura 8a) e 9 (Figura 8b), houve diferenças numéricas significativas entre simulado e observado, sendo de $5,2 \text{ m.s}^{-1}$ no dia 7 e de $8,3 \text{ m.s}^{-1}$ no dia 9. O dia 17 foi o que apresentou maior concordância entre simulado e observado, com diferença de apenas $0,17 \text{ m.s}^{-1}$. Uma das possíveis causas pode ter sido a diferença de altura entre os níveis simulados e observados, tendo em alguns pontos chegado a 80 metros nos níveis mais elevados.

De acordo com as Figuras 9 a, b e c, verifica-se que o modelo representou de maneira satisfatória a temperatura com relação ao observado. O dia 9 apresentou a maior diferença entre os 3 dias analisados.

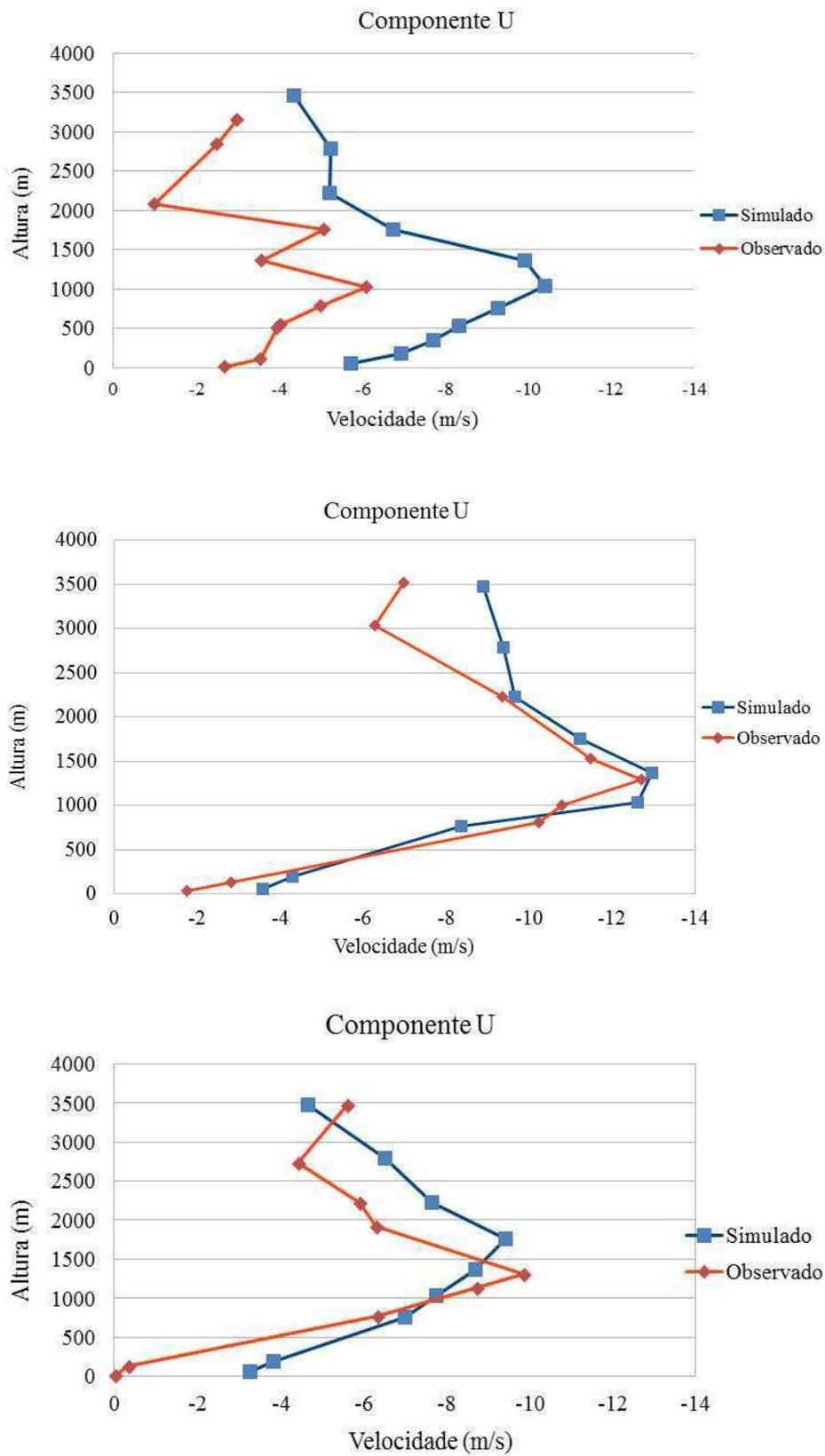


Figura 7 – Comparação entre dados simulados e observados da componente zonal (U) do vento para os dias 7 (a), 9 (b) e 17 (c) de Junho de 1999 em terreno plano.

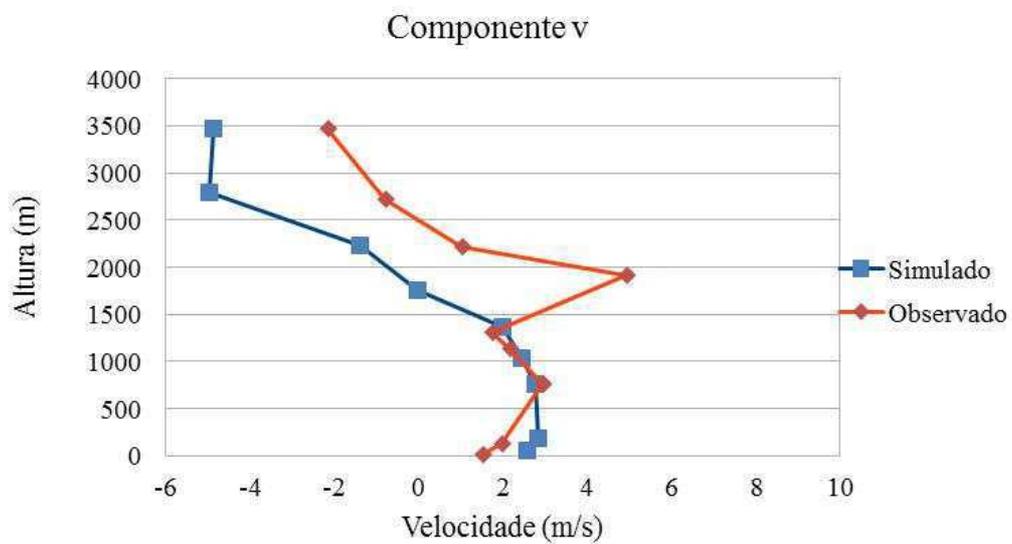
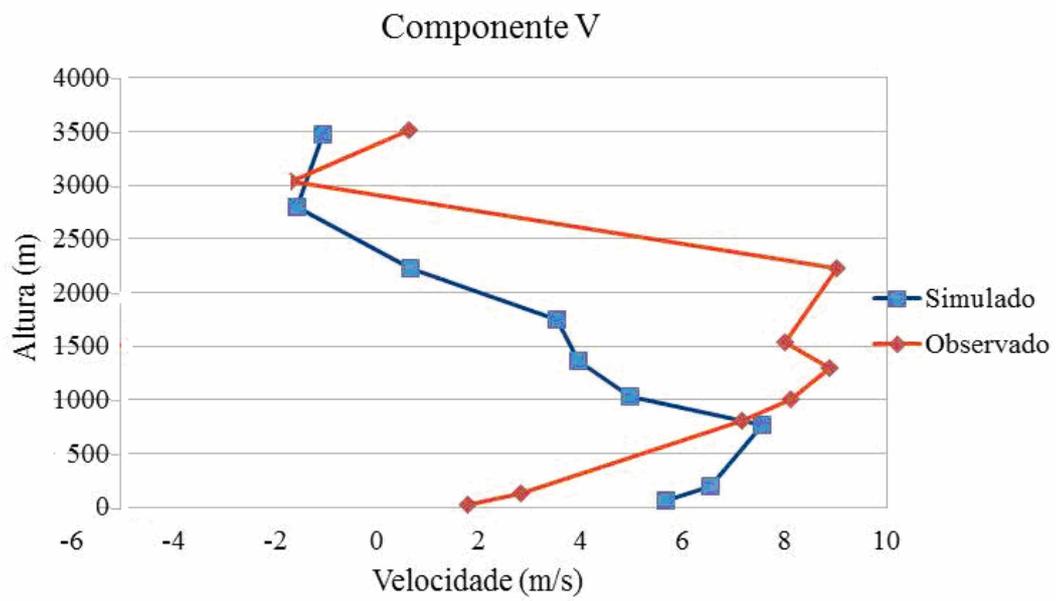
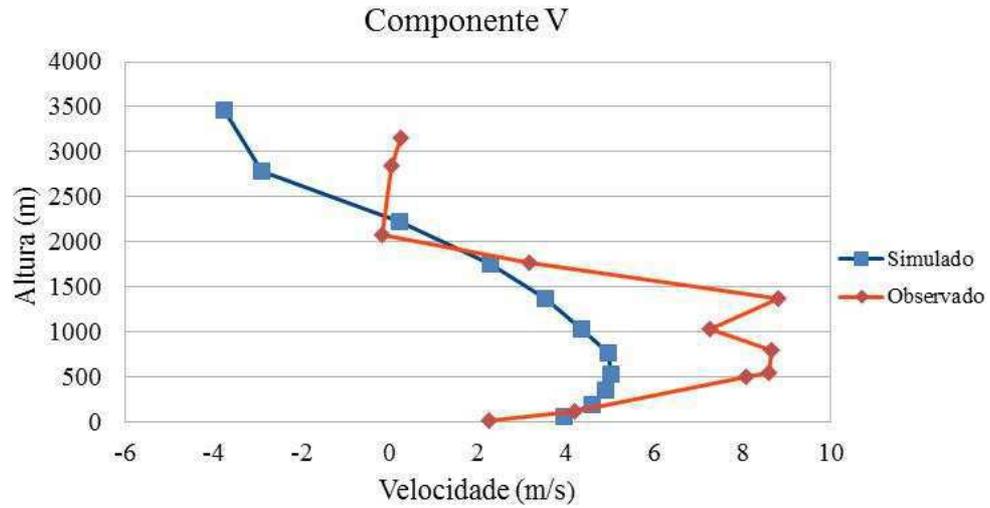
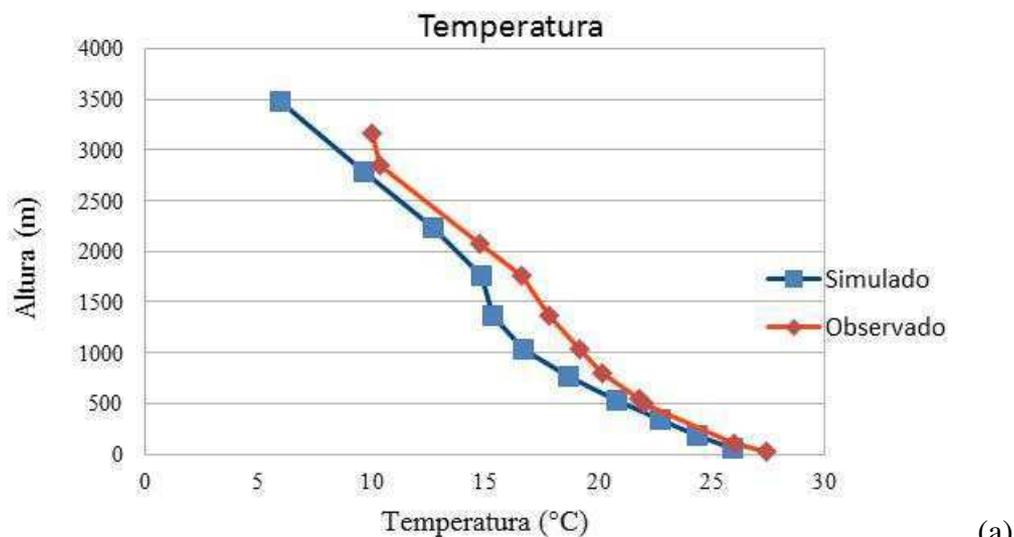
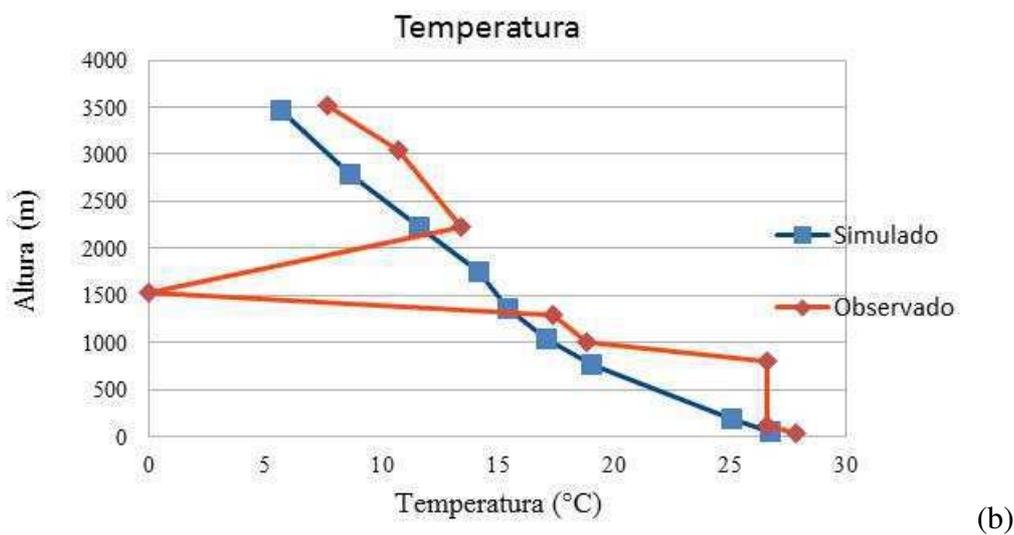


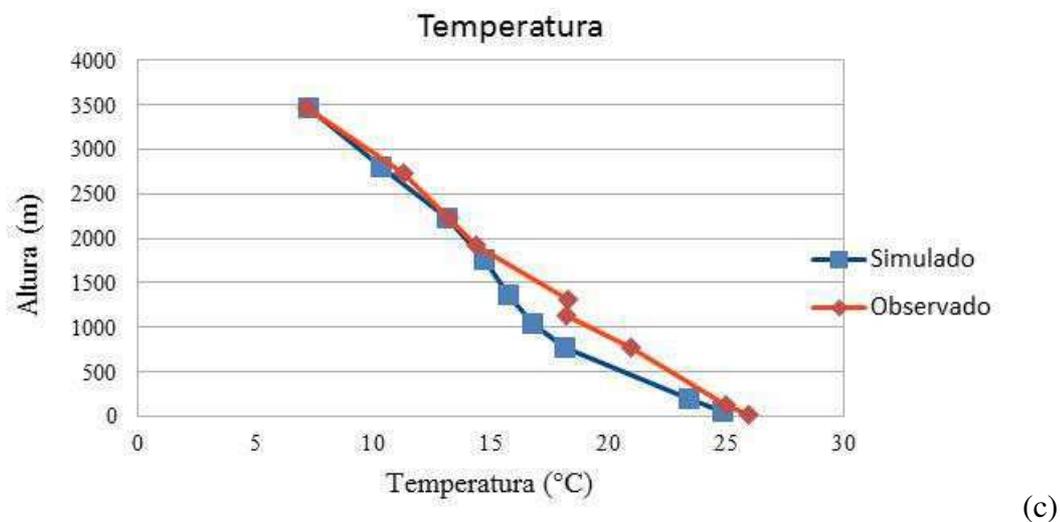
Figura 8 – Comparação entre dados simulado e observado da componente meridional (V) do vento para os dias 7 (a), 9 (b) e 17 (c) de Junho de 1999 em terreno plano.



(a)



(b)



(c)

Figura 9 – Comparação entre dados simulados e observados da Temperatura do ar para os dias 7 (a), 9 (b) e 17 (c) de Junho de 1999 em terreno plano.

5.2 – Resultados Simulados

O aquecimento diferencial entre superfícies é a principal forçante dos movimentos atmosféricos. No caso das brisas, quando o continente se torna mais quente que o mar, o ar em contato com a superfície se aquece e se expande, devido a sua baixa densidade. Por continuidade de massa o ar proveniente do mar se desloca para o continente, originando a brisa marítima. Durante a noite, quando o mar se encontra mais aquecido que o continente, o ar sopra então em direção ao mar, formando a brisa terrestre. Considerando as localizações do mar e do continente neste trabalho, diferenças de temperatura negativas indicam brisas marítimas e positivas às brisas terrestres.

As Figuras 10 a e b permitem a observação da diferença de temperatura durante o mês de Junho de 1999, entre o continente (ponto a) e oceano (ponto b) para área 1 (10a) área 2 (10b). De acordo com as figuras, verifica-se que a maior diferença de temperatura ocorreu sobre a área 1, sendo a mesma superior a 02°C e de 06°C . Ressalta-se que as análises tiveram início a partir do dia 1 até o dia 20 de Junho, descartando-se o restante dos dias deste mês, devido a forte perturbação dos ventos. Embora os dias analisados tenham apresentado valores significativos de diferença de temperatura, estes não foram os mais elevados do mês de Junho, porém, foi o período que apresentou pouca ou nenhuma influência de perturbações de outras escalas no campo de vento.

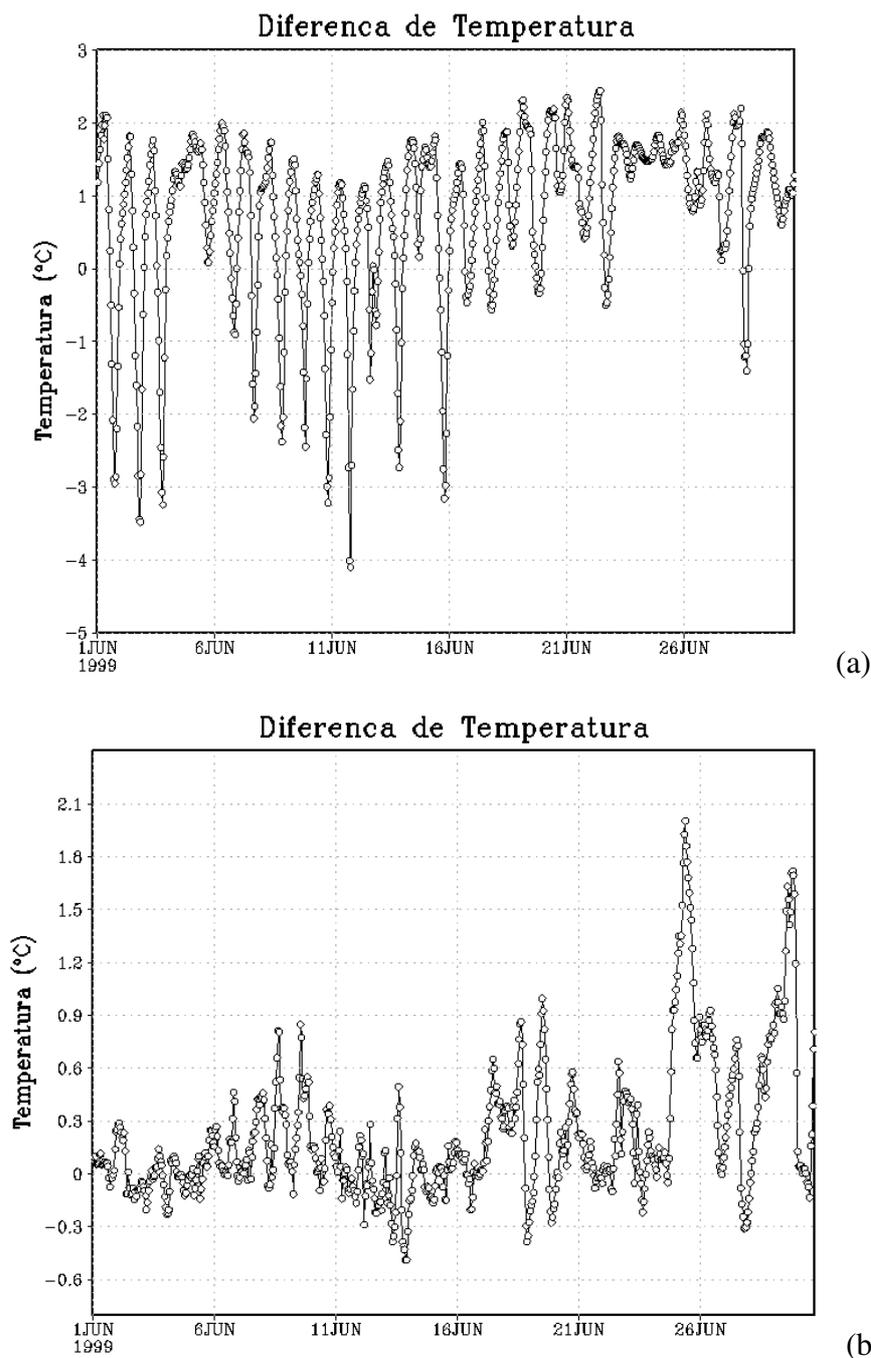


Figura 10 – Diferença de temperatura entre continente e oceano sobre as áreas 1 e 2 respectivamente – Junho de 1999.

De acordo com as Figuras 11 a e b, referentes às simulações geradas pelo modelo BRAMS da componente V do vento entre os pontos a e b (Fig 5) para o mês de Junho sobre as áreas 1 e 2 respectivamente, se observa os ciclos diurno dos ventos associados às brisas marítimas bem definidos desde o início do mês até por volta do dia 17 sobre a área 1, e até o dia 19 para área 2. A partir de então, verifica-se a possível atuação de um sistema de escala maior que perturbou os ventos e descaracterizou as circulações de brisa. Este resultado é coerente com as Figuras 10 a e b para temperatura.

No dia 2 a diferença do vento médio entre os pontos a e b chegou a $5,5 \text{ m.s}^{-1}$ sobre a área 1 e $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ na área 2. No dia 9 não houve diferenças significativas entre as regiões, a área 1 obteve $3,3 \text{ m.s}^{-1}$ e a área 2 $3,0 \text{ m.s}^{-1}$. Já nos casos de brisas terrestre é possível verificar que o vento foi mais intenso em situações de topografia plana. No dia 7 os ventos sobre a área 2 chegaram a $9,0 \text{ m.s}^{-1}$ enquanto que na área 1 não passaram de $3,5 \text{ m.s}^{-1}$, bem como para o dia 17, onde a superfície plana atingiu ventos de $4,8 \text{ m.s}^{-1}$, tendo sido estes em torno de $2,0 \text{ m.s}^{-1}$ em topografia inclinada.

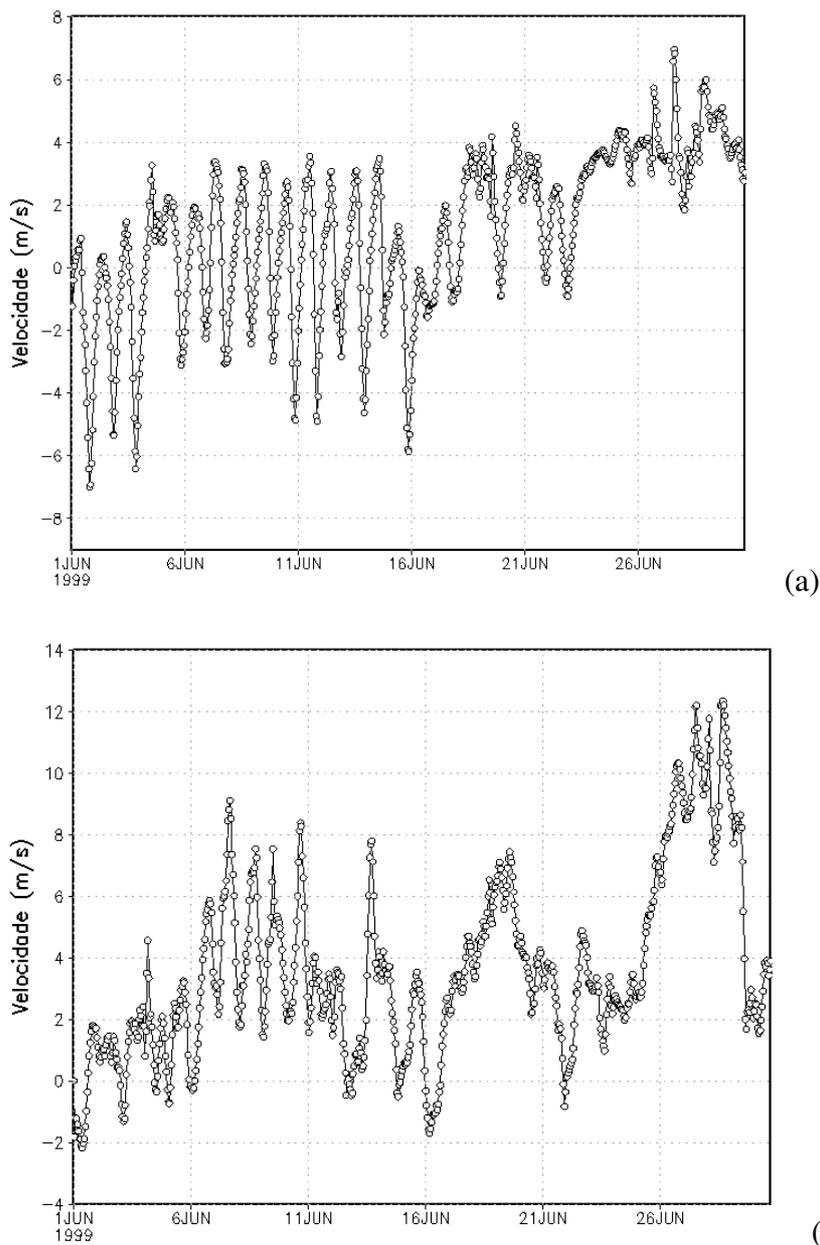


Figura 11 – Média do vento meridional ao longo dos pontos a e b sobre as áreas 1 (a) e 2 (b) durante o mês de Junho.

5.3 - Estudo de casos:

1° Caso - Brisa marítima do dia 2 de junho de 1999

Análise sobre terreno inclinado (área 1)

De acordo com as Figuras 12a, b, c e d, observa-se o comportamento e desenvolvimento das componentes V e W (meridional e vertical) do vento simuladas pelo modelo BRAMS, sobre a área 1. Segundo a Figura 12a as 14Z houve a penetração de ventos do oceano para o continente, sobre a latitude de 02°05'S e saindo do continente para o oceano em 03°05'S, tornando possível a identificação de uma circulação de brisa marítima na região. Observando os vetores, verifica-se que a brisa marítima teve pouca intensidade, uma vez que ainda se encontrava no início de sua formação, com uma diferença de temperatura entre os pontos a e b de 04°C. Estes ventos alcançaram cerca de 1200m de profundidade. Também se observam ventos ascendentes entre 03°05'S e 04°S, que consistem na brisa de vale, são fluxos de ar gerados pela topografia local, que neste caso, ultrapassou os 800m de altura.

As 16Z é verificada a intensificação das brisas de vale e marítima, conforme mostrado na Figura 12b. De acordo com os vetores, a intensidade das brisas neste horário foi maior em comparação a das 14Z (Fig. 12a), bem como a profundidade da mesma, que foi próxima dos 1800m.

De acordo com a Figura 12c, houve um acoplamento entre as brisas marítima e de vale as 17Z. Diante dos resultados apresentados, observa-se que a junção entre as brisas resultou numa circulação mais intensa e profunda, com altura de aproximadamente 2400m de altura.

A maior intensidade e profundidade das circulações de brisa marítima acoplada à brisa de vale durante todo o dia 2 de Junho, ocorreu as 21Z, conforme pode ser visto na Figura 12d. Verifica-se, portanto que houve um atraso de uma hora entre os máximos valores de vento e de diferença de temperatura, onde esta última ocorreu às 20Z (Fig 10a).

De acordo com os resultados obtidos de V e W para área 1, foi possível verificar a forte influência da topografia sobre o acoplamento das brisas. O máximo acoplamento entre ambas resultou em uma circulação mais intensa e profunda e o escoamento de retorno ocorreu então em níveis mais elevados, forçando uma maior permanência desta

circulação sobre a região. A circulação se manteve presente até as 23Z, resultando em 9 horas de permanência de brisa marítima sobre a área 1.

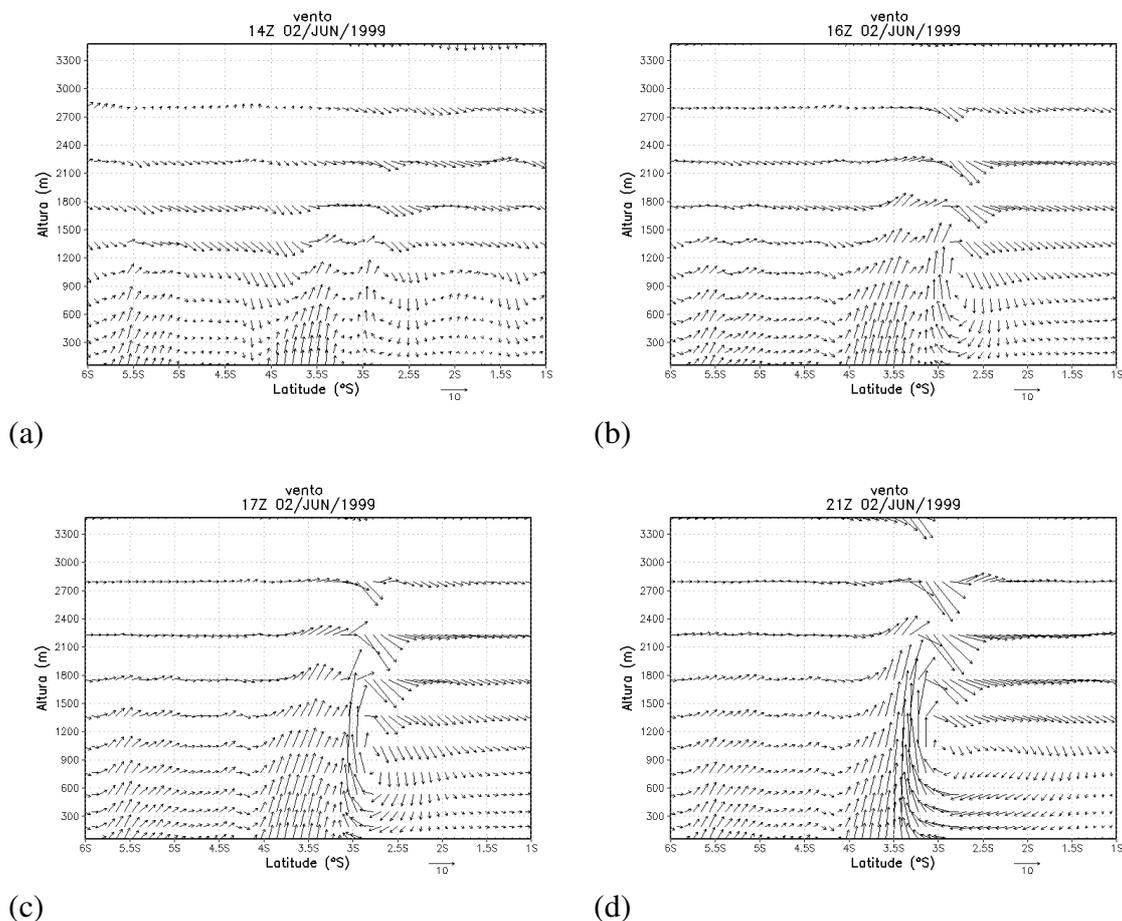


Figura 12 – Componentes v e $w \cdot 100$ do vento para as 14Z (a), 16Z (b), 17Z (c) e 21Z(d) do dia 2 de Junho de 1999 sobre a área 1 – brisa marítima.

Análise sobre terreno plano (área 2)

No horário das 13Z (Figura 13a) é possível observar a entrada da brisa marítima entre 03°S e $03^{\circ}05'\text{S}$, onde o escoamento do vento se manteve paralelo à costa nos níveis próximos à superfície. No horário seguinte, 14Z, é verificada a presença de uma perturbação dos ventos ascendentes entre $02^{\circ}02'\text{S}$ e $03^{\circ}05'\text{S}$ de latitude, com escoamento de retorno em 1800m aproximadamente, conforme pode ser observado na Figura 13b.

Às 15Z, pode ser evidenciada a evolução da perturbação nas proximidades da costa na área 2, tendo sido esta perturbação, mais bem caracterizada em relação ao

horário anterior e de acordo com os vetores, a intensidade para este horário também foi maior, configurando o sistema de brisa marítima sobre a região.

De acordo com a Figura 13d, as 16Z a circulação não se mostrou organizada como no horário das 15Z, porém, verifica-se que entre 01°S e 01°05'S, havia a presença de fortes ventos ascendentes, que chegaram a 2400m de profundidade, indicando a possível presença de um outro sistema atuando sobre a região, que poderia ter descaracterizado a circulação de brisa.

Sobre a área 2, a brisa marítima teve início mais cedo comparada a área 1, em cerca de 4 horas. As circulações de brisa marítima não se mostraram bem organizadas como no caso anterior e a profundidade dos ventos foi menor, evidenciando, portanto, a influência da brisa de vale, formada pela topografia do terreno na brisa marítima.

As circulações de brisa marítima para o dia 2 de Junho, se apresentaram mais bem caracterizadas sobre a área 1, porém ressalta-se que na área 2, foi verificada a presença de uma perturbação no campo dos ventos sobre o oceano, entre 01°S e 01°05'S, que pode ter mascarado ou enfraquecido a brisa marítima, de modo a não formarem circulações tão bem definidas como primeiro caso.

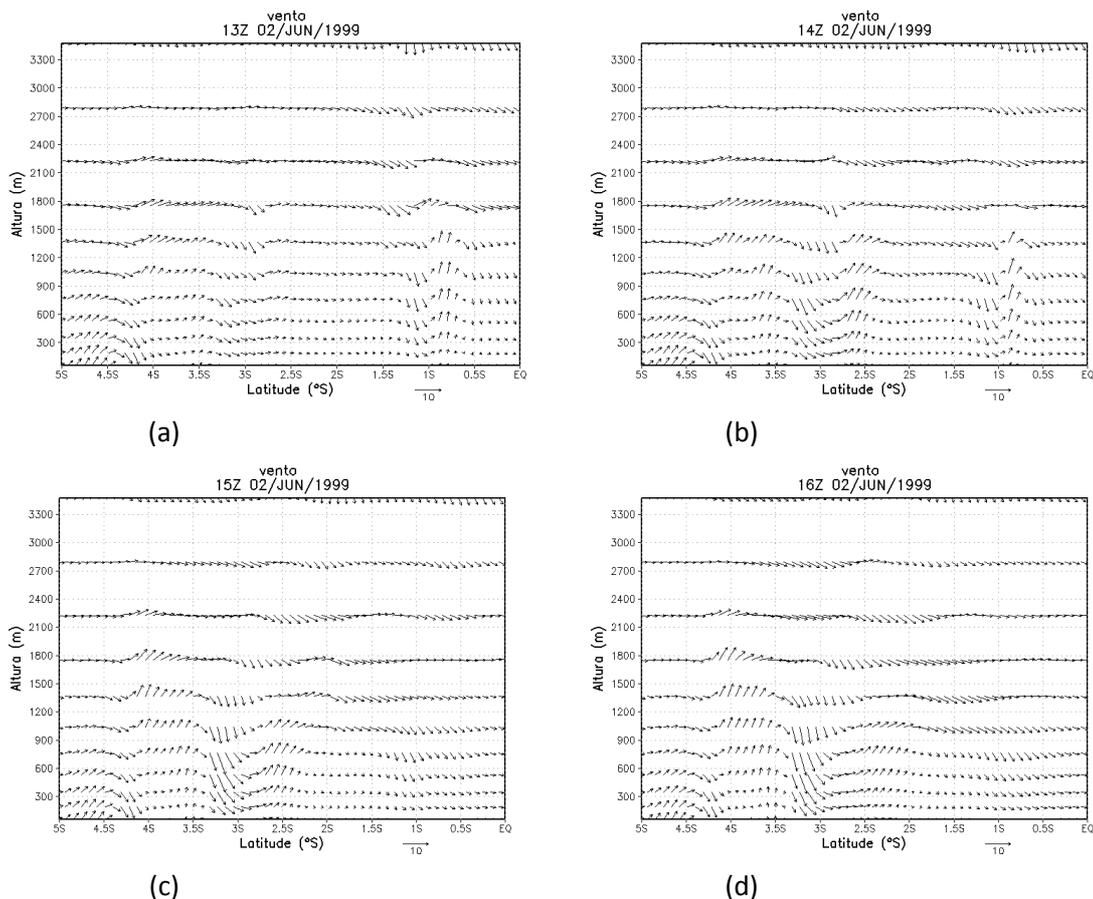


Figura 13 – Componente v e $w*100$ do vento para as 13Z (a), 14Z (b), 15Z (c) e 16(d) do dia 2 de Junho de 1999 sobre a área 2 – brisa marítima.

Aplicação da teoria de máquina térmica para o dia 2 de Junho.

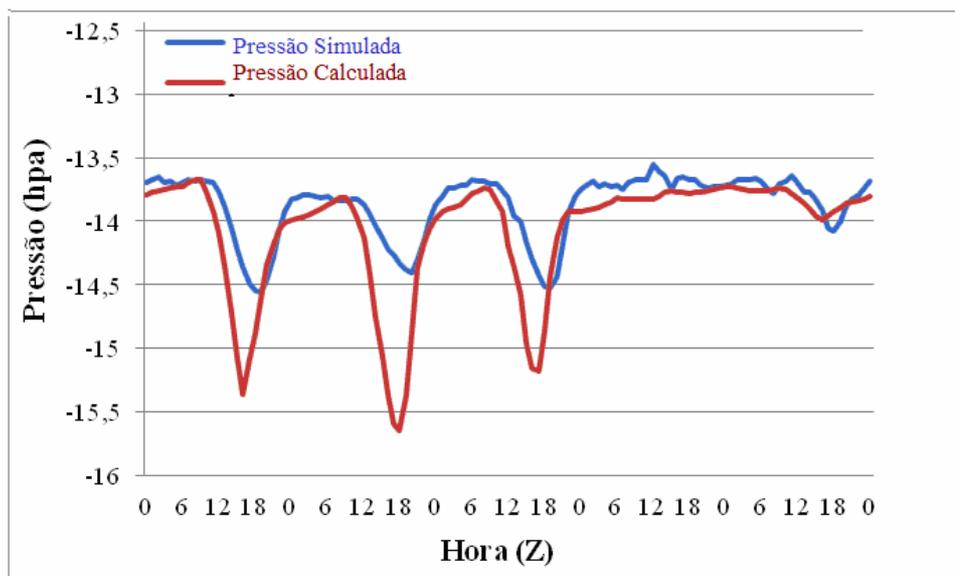
A eficiência termodinâmica (η) é um parâmetro que consiste na razão entre a quantidade de calor que entra no sistema e a parte do calor que é rejeitada para o reservatório frio ao longo da circulação.

Através da equação 6 foi possível observar que este termo está diretamente ligado a altura da Camada Limite Atmosférica (CLA), ou seja, quanto mais profunda a CLA, maior será a energia disponível para a circulação. A CLA por sua vez, é uma variável que depende diretamente da temperatura da superfície, quanto maior a temperatura, maior a profundidade da CLA. Diante de tais relações entre as variáveis, espera-se que a eficiência termodinâmica seja máxima durante o período diurno, quando estão presentes os eventos de brisa marítima.

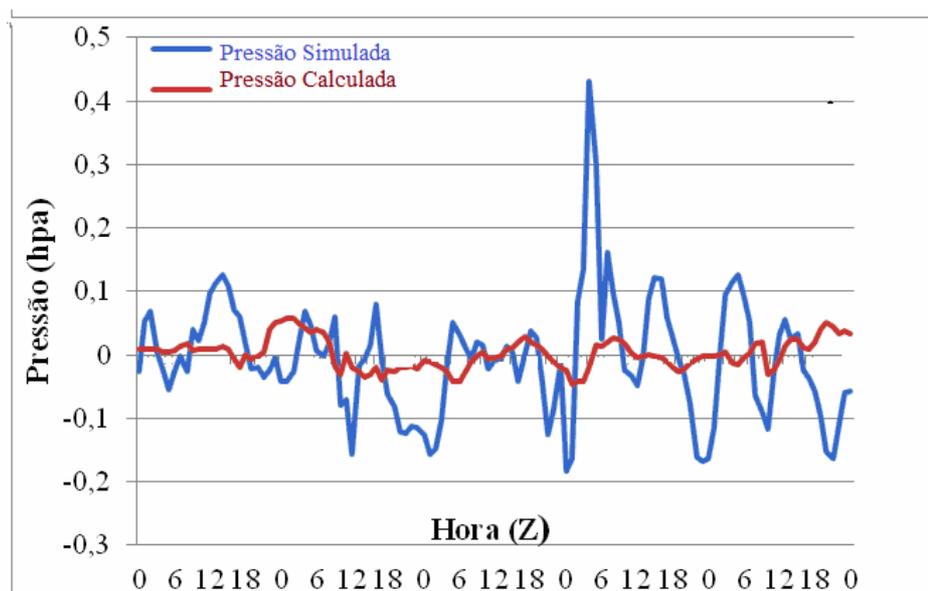
Durante o dia 2 de Junho, sobre a área 1, o termo η obteve seu máximo às 18Z, chegando a aproximadamente 6,3% como pode ser visto na Figura 14a. Para a área 2,

azul). Conforme pode ser observado, a teoria se mostrou bastante similar ao simulado, principalmente sobre a área 1, onde, as maiores diferenças de pressão ocorreram às 20Z para o simulado, 14,5 hPa e as 18Z, 15,3 hPa para o calculado.

Sobre a área 2, os maiores valores de pressão calculada ocorreram durante as primeiras horas da manhã, sendo próximos aos 0,06 hPa e a pressão simulada teve seu máximo às 12Z, com valores em torno de 0,18 hPa, uma diferença de 0,12 hPa.



(a)



(b)

Figura 15 – Diferença de pressão simulada (linha azul) x calculada (linha vermelha) sobre a área 1 (a) e área 2 (b) entre os dias 1 e 5 de Junho de 1999, com ênfase no dia 2.

O termo de pressão não hidrostática, Figura 16, simula os casos onde a topografia é plana, cuja mesma não exerce influência sobre sistemas de circulação, portanto, não se faz necessária a avaliação desta variável para os casos ocorridos na área 2. O termo de diferença de pressão não hidrostática obteve seu máximo às 19Z na área 1, tendo sido este igual a 1,8 hPa. Comparando este resultado com a Figura 15a, é possível verificar que a diferença de pressão não hidrostática ocorreu uma hora após a pressão simulada e uma hora antes da pressão calculada na área 1, porém, os valores encontrados na diferença de pressão não hidrostática foram mais próximos aos encontrados na área 2, o que evidencia a influência da topografia na formação e manutenção das circulações de brisa marítima-terrestre.

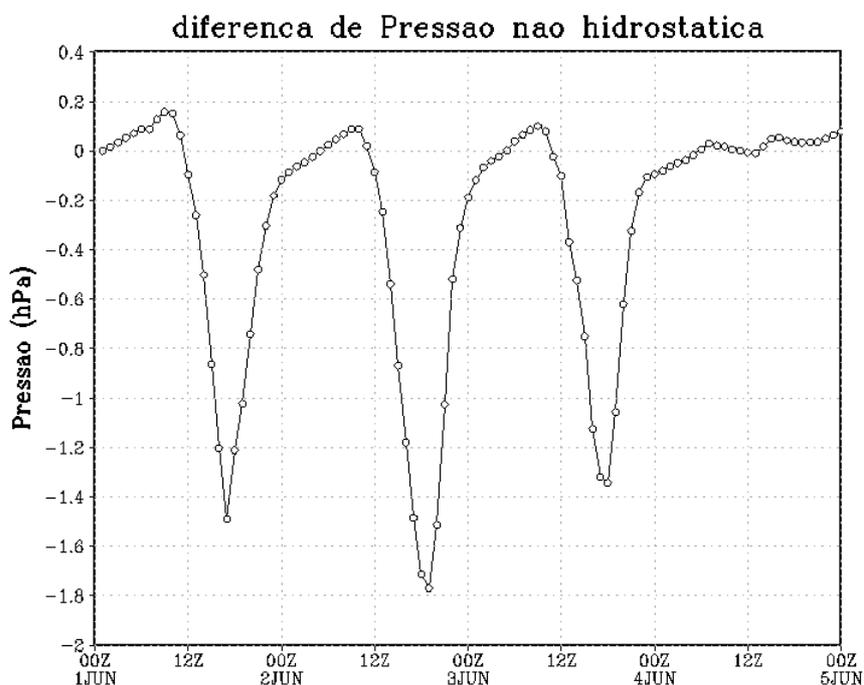


Figura 16 – Diferença de pressão não hidrostática sobre a área 1 entre os dias 1 e 5 de Junho de 1999, com ênfase no dia 2.

Segundo a Figura 17a, a maior variação do Trabalho Total disponível para a circulação, ocorreu no período diurno. Este termo, calculado pela teoria (linha verde), correspondeu de maneira significativa ao Trabalho Total simulado (linha preta), que sobre a área 1, apresentou valores de até 2200 Jkg^{-1} durante o dia 2 de Junho. O simulado e o calculado obtiveram seus máximos entre 19Z e 20Z.

Comparando a Figura 17a com a Figura 10a, se observa um comportamento semelhante entre Trabalho Total e diferença de temperatura entre os pontos a e b, devido à relação intrínseca dos termos, (Ver Equação 5). Também se observa de acordo

com a Figura 17b, que a teoria apresentou coerência com o trabalho simulado na área 2, tendo apresentado um pouco mais de 40 Jkg^{-1} de máxima energia disponível para a brisa marítima entre 16Z e 18Z.

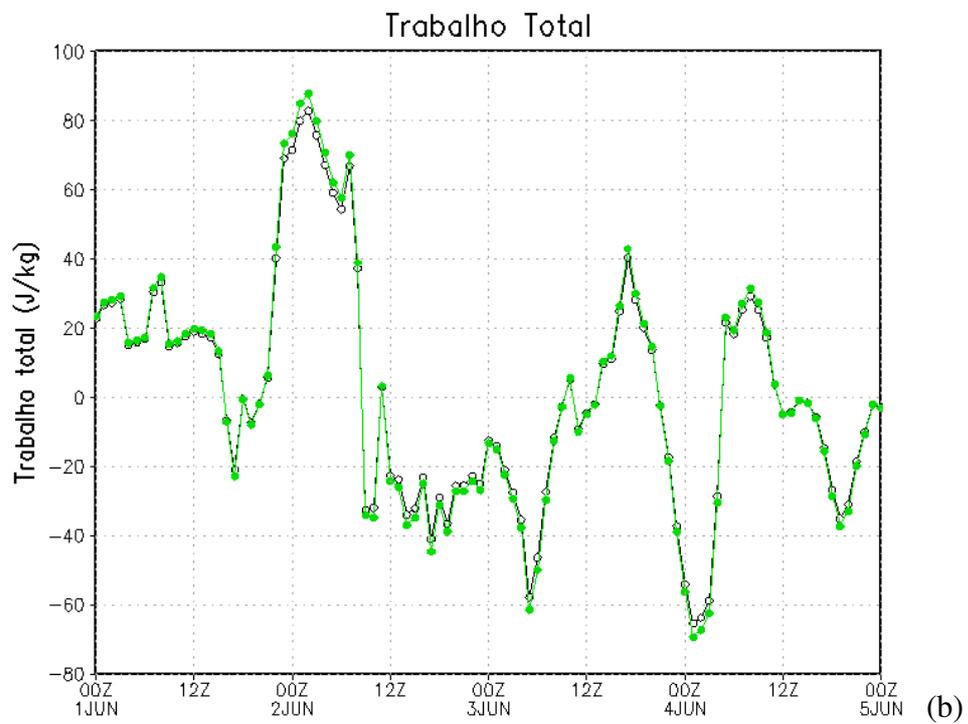
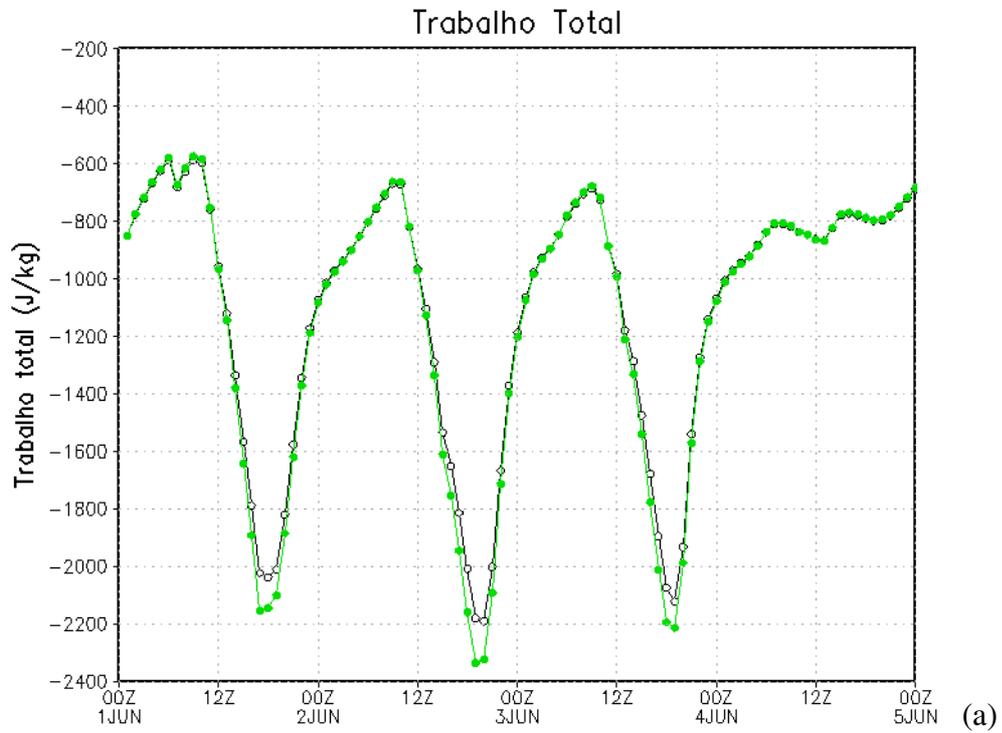


Figura 17 – Trabalho Total simulado (linha preta) x calculado (linha verde) sobre as áreas 1 (a) e 2 (b).

O termo W_a destaca-se na Equação 5, devido ao mesmo representar a quantidade de trabalho a ser utilizado pela circulação. Observa-se de acordo com a Figura 18a, que durante o dia 2 o máximo de W_a foi de aproximadamente 160 Jkg^{-1} , ocorrido às 19Z sobre a área 1. Já na área 2, o máximo de W_a ocorreu por volta das 17Z, tendo sido em torno de 4 Jkg^{-1} . Havendo, uma diferença de 156 Jkg^{-1} deste termo entre as duas áreas estudadas. Observando este resultado e comparando com a Figura 10 (a e b), é possível verificar que os maiores valores para diferenças de temperatura ocorreram na área 1, explicando, portanto, o valor mais elevado de W_a sobre a área.

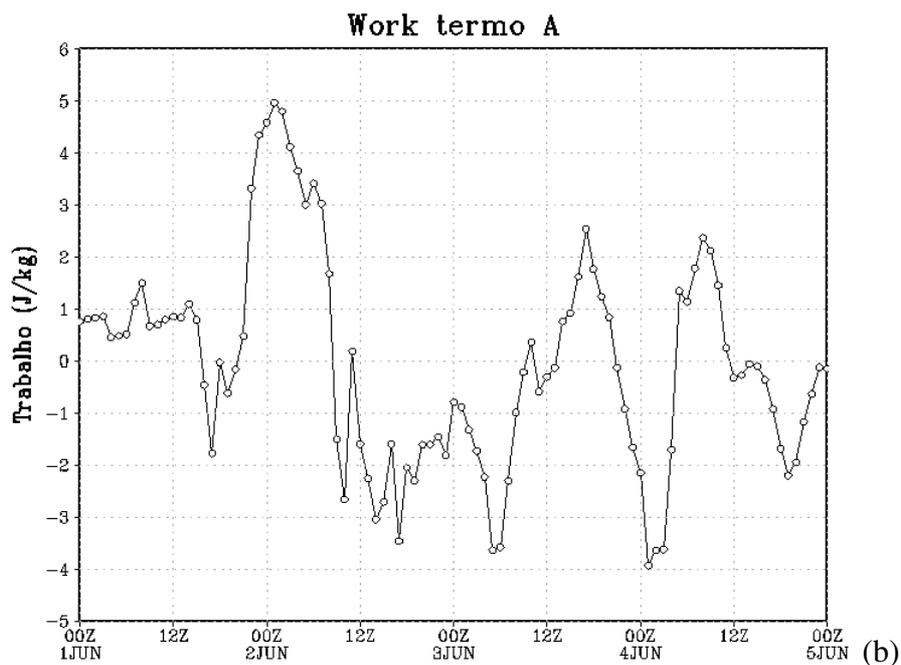
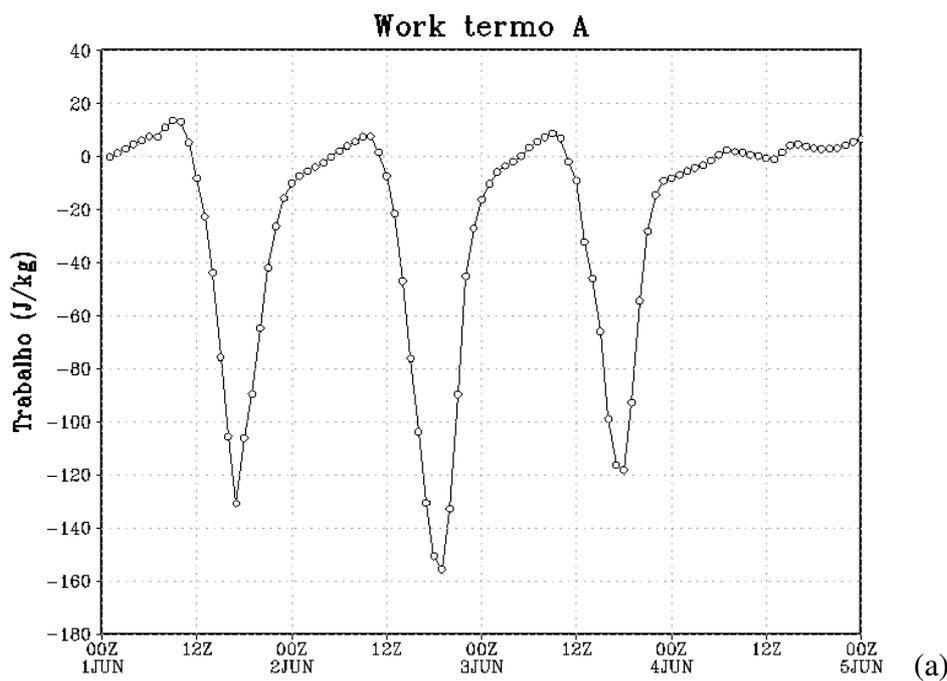


Figura 18 – Termo de trabalho W_a sobre as áreas 1 (a) e 2 (b) entre os 1 e 5 Junho de 1999, com ênfase no dia 2.

O gradiente de temperatura é o principal responsável pelos movimentos atmosféricos, entre eles, os de circulação de brisa. As propriedades da água e do continente possuem diferentes capacidades caloríficas, bem como suas respectivas formas de armazenamento de calor, formando um contraste de temperatura entre duas regiões vizinhas. Este contraste de temperatura, por sua vez, origina um gradiente de pressão, responsável pelo deslocamento de uma massa de ar, o deslocamento dessa massa de ar entre mar e continente consiste nas circulações de brisas. Ao analisar as Figuras 10a e b, referentes à média de temperatura sobre as áreas 1 e 2, observou-se que houve uma cronologia coerente dos termos. Os máximos de diferença de temperatura sobre a área 1 durante o dia 2 ocorreram às 18Z tendo sido de 02°C , mesmo horário em que se observou máximo de η . Após o máximo de diferença de temperatura, foram gerados sobre oceano e continente centros de alta e baixa pressão mais acentuados aproximadamente às 20Z, ou seja, 2 horas de defasagem em relação à diferença máxima de temperatura. O Trabalho Total se mostrou mais intenso entre 19Z e 20Z e o termo W_a , responsável pela quantidade de trabalho utilizado na circulação foi coerente com os maiores valores para diferença de pressão. Em seguida essa máxima diferença de pressão gerou os movimentos de ar, que teve maior intensidade às 22Z, como observado na Figura 12d. As circulações funcionam então como um mecanismo que tende a equilibrar os excessos e as defasagens entre superfícies distintas. Sobre a área 2, ocorreu uma cronologia bastante similar, onde primeiro ocorreu o máximo de diferença de temperatura, às 13Z, logo após, foi apresentada a máxima eficiência termodinâmica, em seguida ocorreram a maior intensidade da circulação e os máximos de W_a , ambos às 14Z e 17Z respectivamente.

2° Caso - Brisa marítima do dia 9 de junho de 1999.

Análise sobre terreno inclinado (área 1)

De acordo com a Figura 19a, observa-se que às 17Z, havia a presença de uma circulação de brisa sobre a área 1, com ventos penetrando o continente nos baixos níveis em 03°S de latitude, atingindo cerca de 1800m de altura. Também se observa a ascendência dos ventos próximos à superfície, entre $03^{\circ}05'\text{S}$ e 04°S , devido à inclinação

do terreno. Os ventos orográficos quando comparados à brisa marítima, mostraram-se menos profundos e de acordo com as propriedades dos vetores, menos intensos também.

As 18Z se observa através da Figura 19b, a intensificação da circulação de brisa marítima devido ao acoplamento com a brisa de vale. Entre 01°S e 01°05'S é verificada a presença de uma perturbação no campo dos ventos sobre o mar, que no horário seguinte se intensificou, se dissipando a medida que se seguia em direção ao continente.

De acordo com a Figura 19c, as 20Z a circulação de brisa marítima esteve mais bem caracterizada quanto sua organização em relação ao horário anterior (Fig.19b) onde pode ser observado que a mesma adentrou o continente em cerca de 02°S e o escoamento de retorno pode ser visto em 03°S a uma altura superior a 1800m. A brisa de vale também se mostrou mais intensa neste horário.

As 21Z se verificou o maior acoplamento entre as brisas, apresentando ventos mais intensos durante todo o dia 9. O escoamento de retorno ocorreu em 2700m de altura, conforme pode ser visto na Figura 19d.

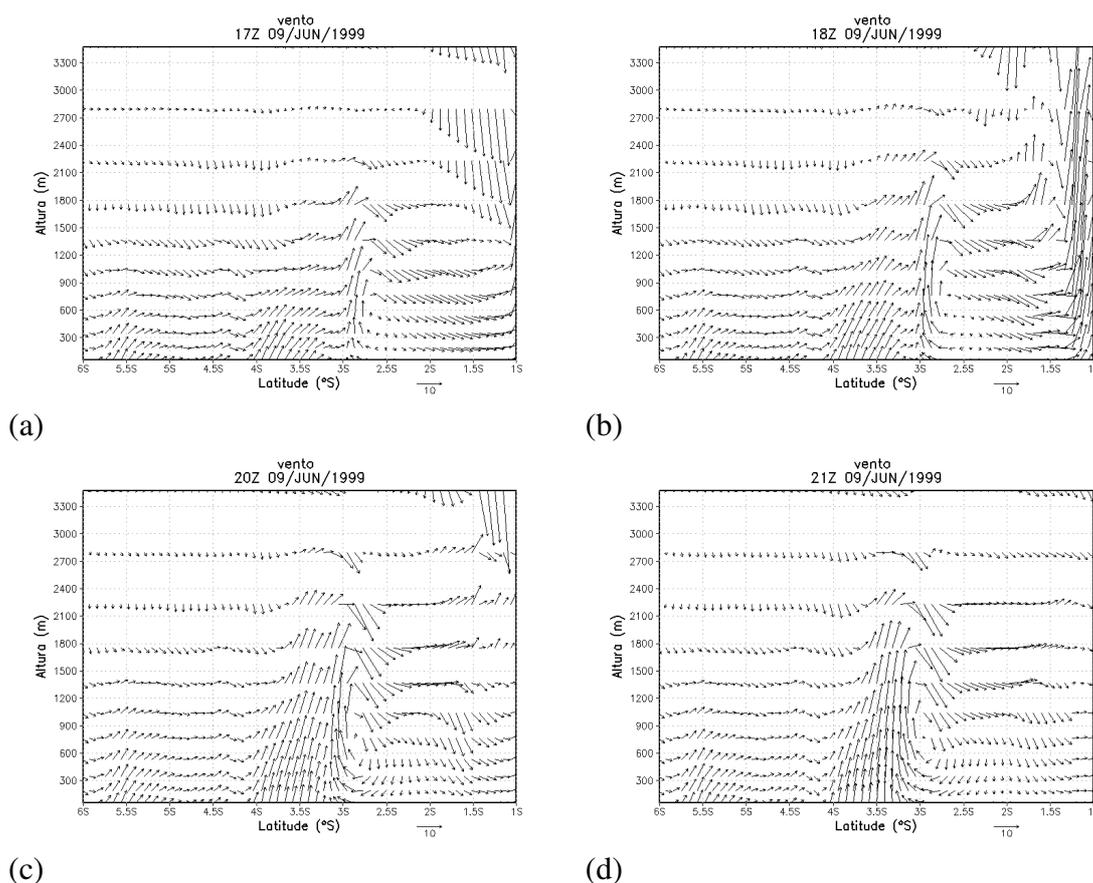


Figura 19 – Componente v e w*100 do vento para as 17Z (a), 18Z (b), 20Z (c) e 21 (d) do dia 9 de Junho de 1999 sobre a área 1 – brisa marítima.

Análise sobre terreno plano (área 2)

Pode ser observado na Figura 20a, no horário das 17Z sobre a área 2, a presença de uma circulação de brisa marítima adentrando o continente em 03°S e um escoamento de retorno em 03°05'S de latitude, com uma profundidade de 1500m de altura.

As 18Z a circulação de brisa marítima, se mostrou bem caracterizada com uma circulação fechada, facilitando sua identificação. Os ventos neste horário foram mais intensos, tendo adentrado mais ao continente, em relação ao horário das 17Z, conforme apresentado na Figura 20b.

De acordo com a figura 20c, referente às 20Z a circulação de brisa permaneceu sobre a área estudada, apresentando uma estrutura mais organizada, com ventos mais intensos em relação aos horários anteriores.

Segundo a Figura 20d, as 21Z a circulação de brisa marítima atingiu sua maior intensidade e com maior penetração sobre o continente, com movimentos ascendentes em 04°S. A profundidade da brisa também foi maior, ficando próxima de 2400m de altura.

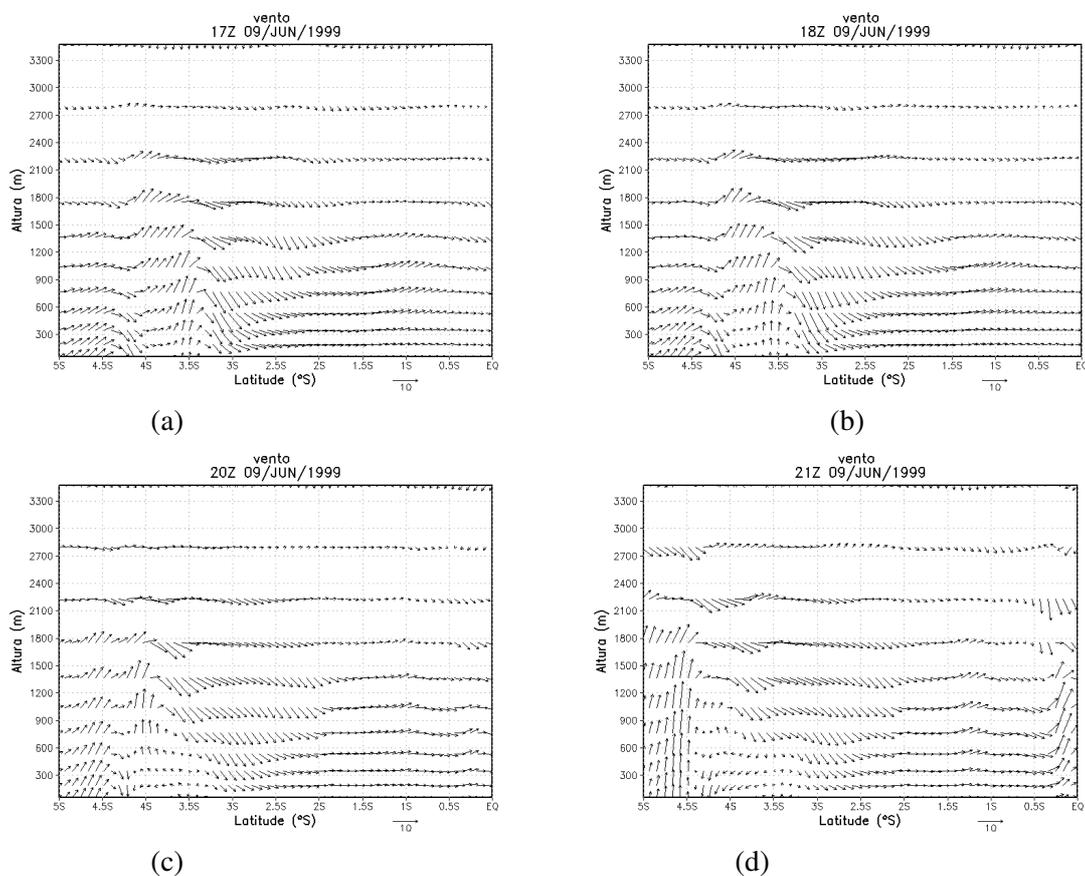


Figura 20 – Componente v e $w \cdot 100$ do vento para as 17Z (a), 18Z (b), 20Z (c) e 21 (d) do dia 9 de Junho de 1999 sobre a área 2 – brisa marítima.

Aplicação da teoria de máquina térmica ao dia 9 de Junho.

Conforme a Figura 21a, os maiores valores para η ocorreram às 19Z sobre a área 1, sendo próximos de 8,0%. Souza et al. (2000) encontraram em seus estudos uma eficiência termodinâmica igual a 4,0%, onde os autores ressaltaram o bom desempenho da convecção como máquina térmica, tendo considerado este como um resultado satisfatório. É válido ressaltar, contudo, que o estudo elaborado por Souza et al.(2000), baseou-se em uma circulação forçada, ocorrida pela heterogeneidade vegetal entre floresta e pastagem. Portanto, era esperado que uma circulação de vale acoplada com a brisa marítima fosse indicativo de uma maior eficiência termodinâmica, uma vez que os gradientes térmicos e principalmente os de pressão são mais elevados entre mar e um terreno com grande inclinação. Esse resultado indica que as circulações de brisa marítima-terrestre e de vale-montanha possuem maior intensidade em relação a brisas por contraste de vegetação.

Segundo a Figura 21b, o maior valor de eficiência termodinâmica foi de 3,9%, nos horários de 7Z e 8Z sobre a área 2.

Alcântara (2007) encontrou valores de eficiência mais baixos do que os apresentados neste trabalho, tendo sido iguais a 3,24% com topografia inclinada e de 2,71% para o caso sem topografia. Deve-se levar em consideração que a inclinação da topografia utilizada pela referida autora é de aproximadamente 140 metros, cerca de 700 metros a menos em relação à inclinação do terreno utilizado neste trabalho.

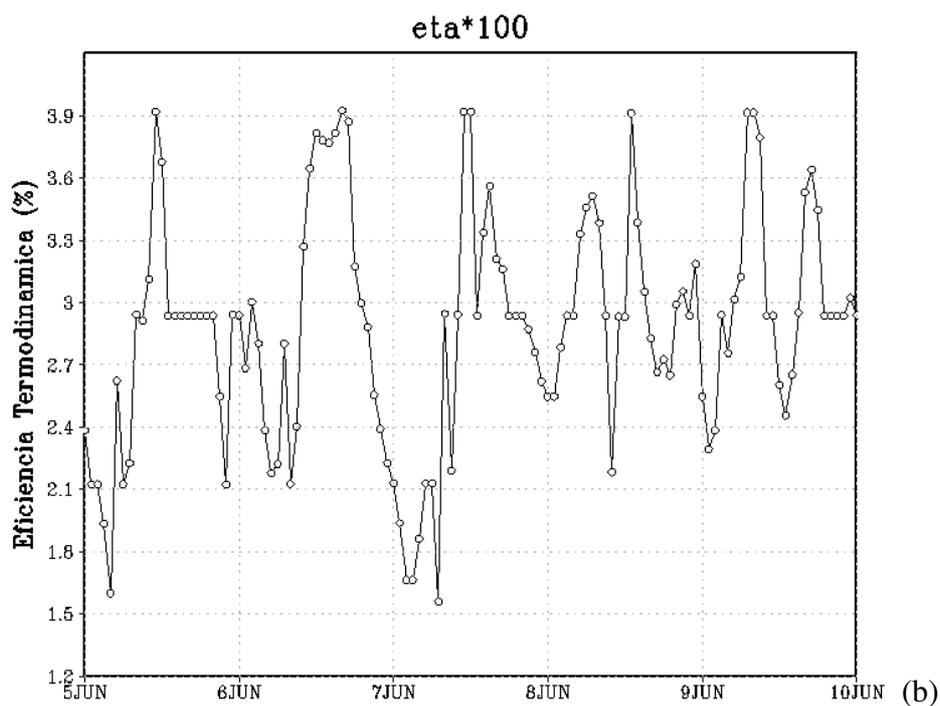
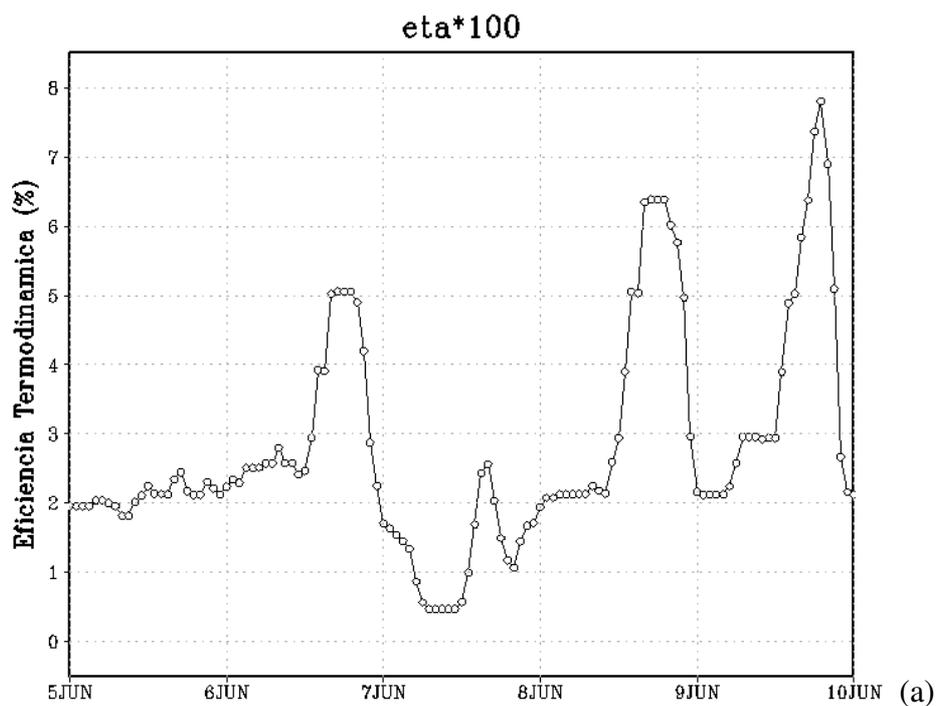


Figura 21 – Eficiência Termodinâmica sobre a área 1 (a) e área 2 (b) entre os dias 5 e 10 de Junho de 1999, com ênfase no dia 9.

Conforme pode ser observada na Figura 22a, a diferença de pressão calculada pela teoria e a diferença de pressão simulada tiveram tendências bastante similares, principalmente quanto aos indicativos de suas respectivas máximas. Para área 1, a maior diferença de pressão simulada, indicada pela linha azul, foi de 14,15 hPa, enquanto que

o calculado ficou em torno de 15,5 hPa, ambos ocorreram por volta das 18Z. Para a área 2, a diferença de pressão simulada encontrada foi de 0,28 hPa e a calculada foi igual a 0,9 hPa, como pode ser visto na Figura 22b.

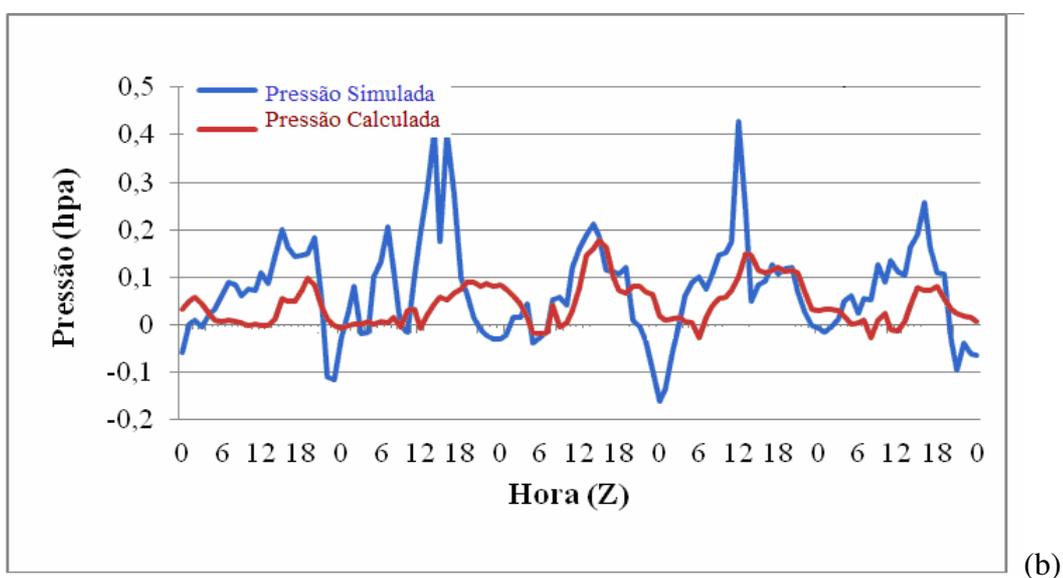
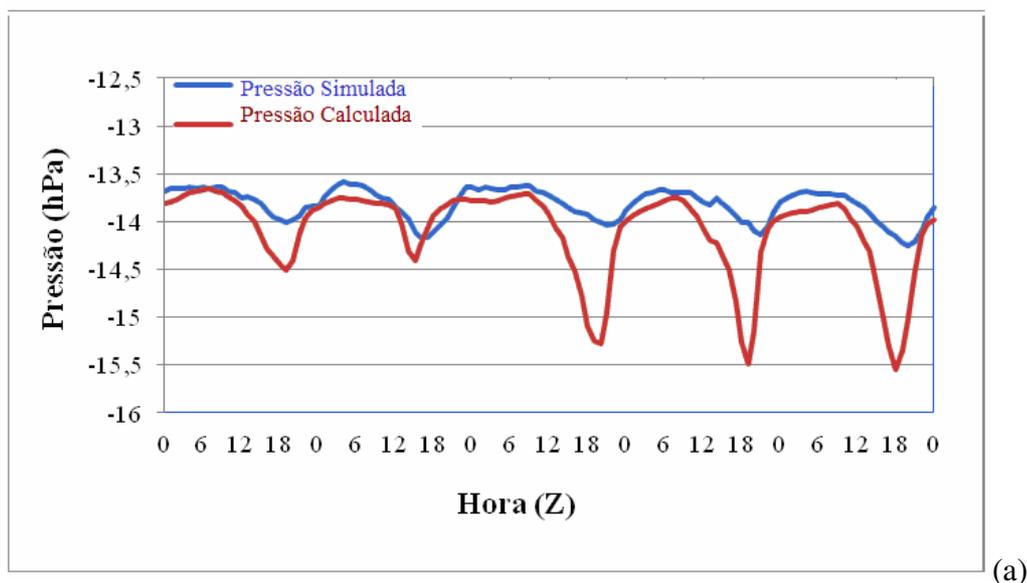


Figura 22 – Diferença de pressão simulada (linha azul) x calculada (linha vermelha) sobre as áreas 1 (a) e 2 (b) entre os dias 5 e 10 de junho de 1999, com ênfase no dia 9.

De acordo com a Figura 23, é verificado que a pressão não hidrostática sobre a área 1, atingiu seu valor máximo às 20Z em torno de 1,7 hPa. Uma diferença de 12,45 hPa em relação ao simulado e 13,8 hPa de discrepância com relação a diferença de pressão calculada pela teoria.

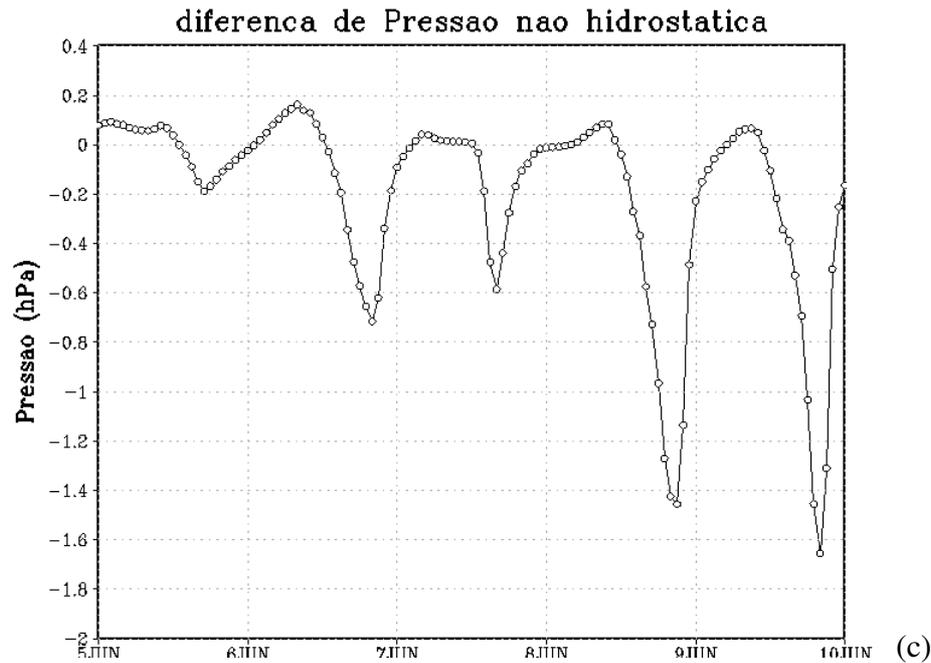


Figura 23 – Diferença de pressão não hidrostática sobre a área 1 entre os dias 5 e 10 de junho de 1999, com ênfase no dia 9.

O Trabalho Total simulado e calculado apresentaram comportamentos semelhantes, obtendo seus máximos valores às 20Z, sendo estes iguais a 1900 Jkg^{-1} e 2000 Jkg^{-1} , respectivamente, uma diferença de 100 Jkg^{-1} entre os resultados na área 1, conforme pode ser visto na Figura 24a.

Segundo a Figura 24 b, o Trabalho Total simulado e calculado na área 2 foi de aproximadamente 47 Jkg^{-1} , tendo ocorrido aproximadamente às 06Z. De acordo com as Figuras 24 a e b, o Trabalho Total foi superior na área 1, quando comparado aos resultados encontrados em terreno plano.

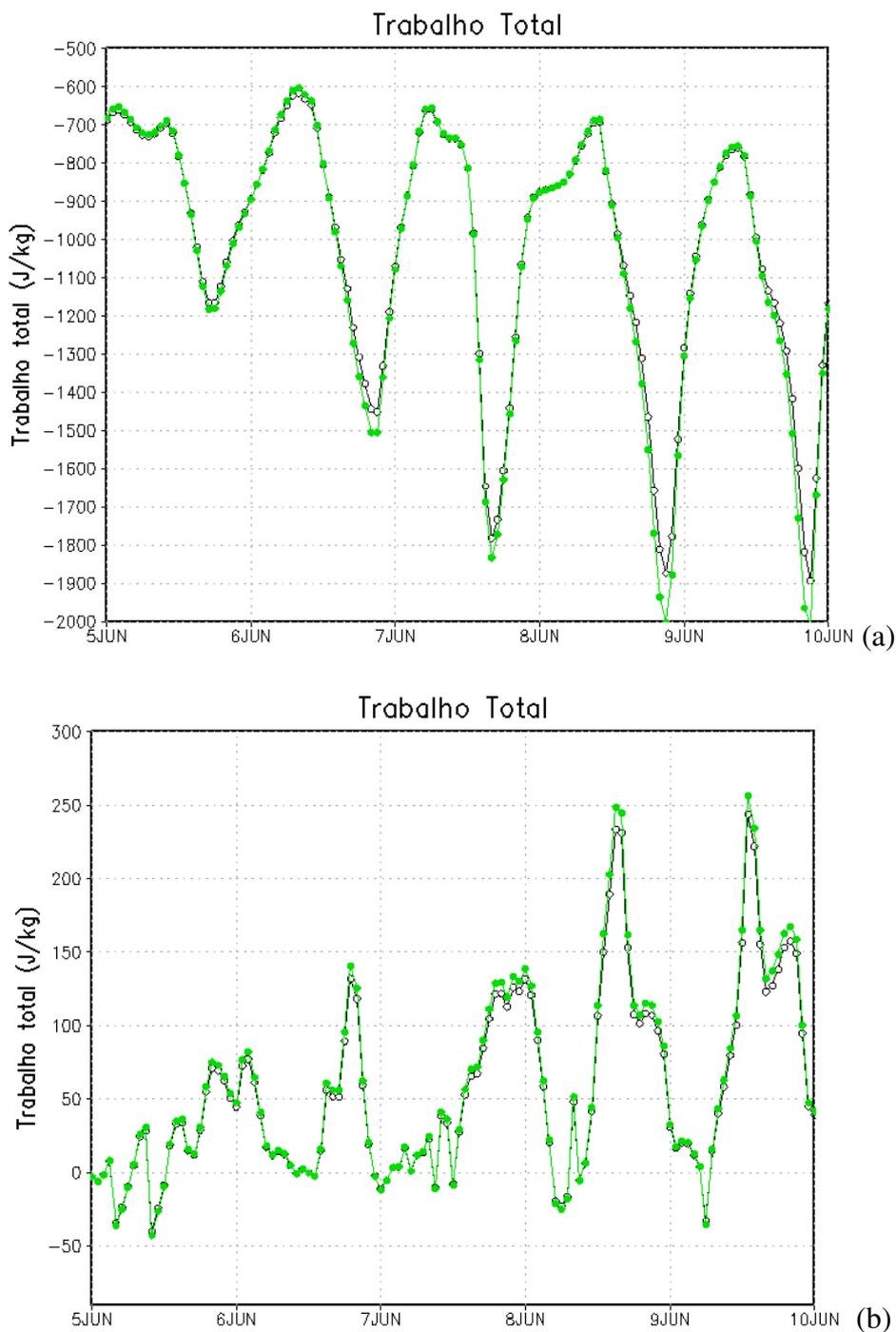


Figura 24 – Trabalho Total simulado (linha preta) x calculado (linha verde) sobre as áreas 1 (a) e 2 (b).

De acordo com a Figura 25a, é possível observar que a máxima quantidade de trabalho realizado a partir do reservatório quente (W_a), ocorreu às 20Z, conforme também foi evidenciado na Figura 24a. O termo W_a foi superior a 140 Jkg^{-1} na área 1. Para a área 2, como pode ser visto na Figura 25b, o máximo para o termo W_a foi de aproximadamente as $2,1 \text{ Jkg}^{-1}$ durante o dia 9 ocorrendo às 06Z. Observando as Figuras

25 a e b, verifica-se que houve uma defasagem de 14 horas nos máximos de W_a entre as áreas 1 e 2. Também pode ser observado que o valor de W_a sobre a área 1 foi superior em $137,9 \text{ Jkg}^{-1}$ em relação ao máximo na área 2, indicando que havia uma quantidade maior de trabalho disponível sobre as circulações em terreno inclinado, estando este resultado, de acordo com a diferença de temperatura, que foi mais elevada para essa mesma região.

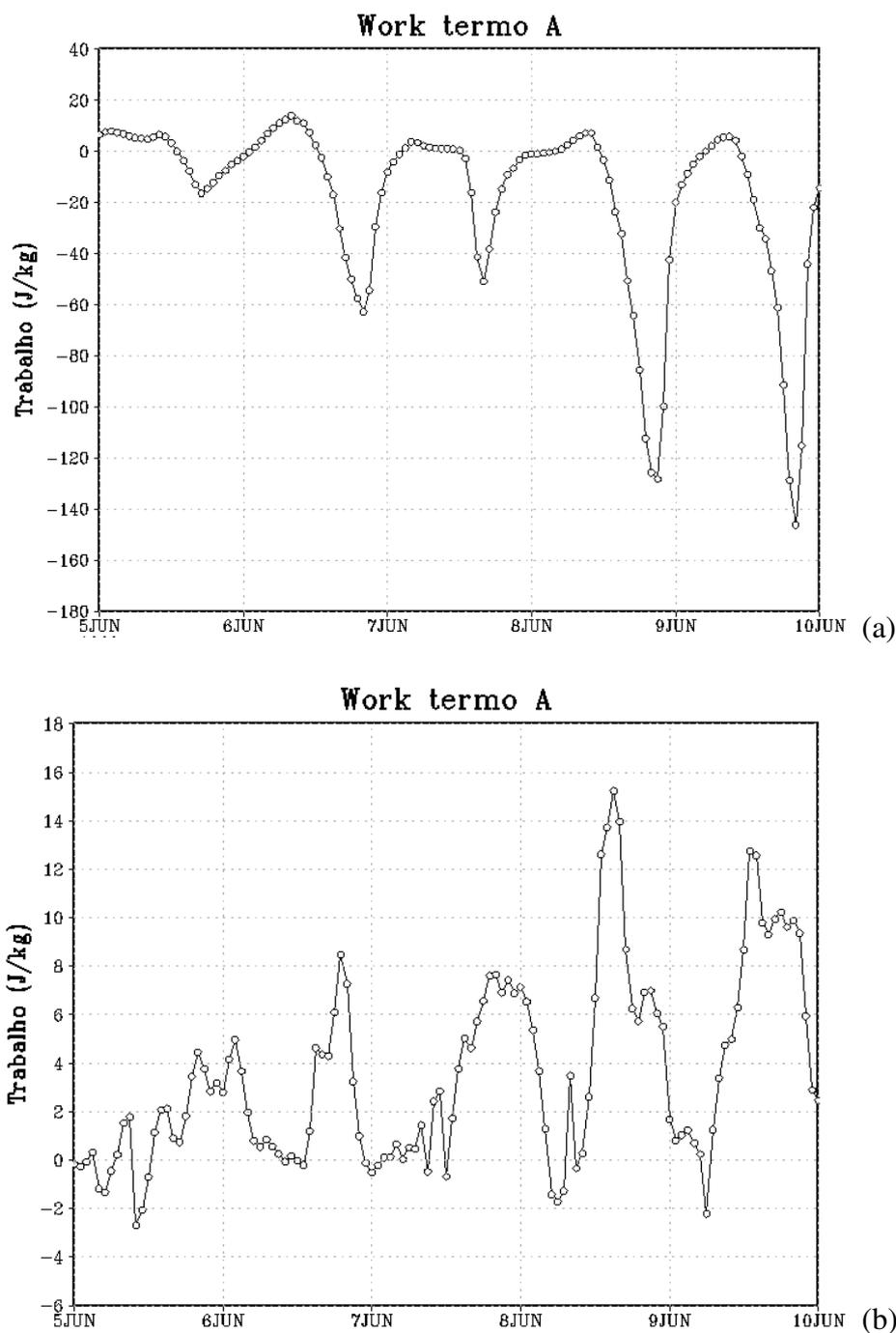


Figura 25 – Termo de trabalho W_a sobre as áreas 1 (a) e 2 (b) entre os dias 5 e 10 de junho de 1999 (b), com ênfase no dia 9.

De acordo com as análises realizadas na área 1, verifica-se que o dia 9 apresentou valores máximos para o vento médio ($3,3 \text{ m.s}^{-1}$), bem como para diferença de temperatura ($3,5^\circ\text{C}$) às 21Z. A eficiência termodinâmica obteve seu valor máximo às 19Z, 2 horas antes dos máximos de temperatura e vento médio, isso porque antes da diferença de temperatura atingir seu valor mais alto, já existe uma quantidade de calor sendo convertido em trabalho. As maiores variações da pressão ocorreram em torno das 18Z, e a pressão não hidrostática teve comportamento similar às diferenças de pressão observadas e calculadas da área 2, reforçando a importância da topografia sobre esta variável. O Trabalho Total bem como o termo W_a , foram mais elevados às 20Z, uma hora antes em relação à eficiência termodinâmica, máxima diferença de temperatura e ventos médios entre os pontos a e b.

Sobre a área 2, o maior valor para diferença de temperatura foi de $1,1^\circ\text{C}$, sendo $2,4^\circ\text{C}$ menor que na área 1 e tendo ocorrido às 16Z, 5 horas de defasagem entre as áreas estudadas. O vento médio na área 2 foi similar ao da área 1, onde seu máximo ocorreu às 21Z, tendo sido igual a $3,1 \text{ m.s}^{-1}$, menor $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ em relação à área 1. A eficiência termodinâmica foi mais elevada às 08Z, 8 horas a menos que a máxima diferença de temperatura e 13 horas mais cedo que os ventos mais intensos do dia. As pressões calculadas e simuladas foram mais intensas às 15Z e 20Z respectivamente. O Trabalho Total ocorreu nas primeiras horas da manhã e o termo W_a foi máximo às 06Z.

O dia 9 apresentou uma cronologia semelhante ao dia 2 para as duas áreas, onde, observou-se primeiro a atuação da temperatura, em seguida gradientes de pressão mais acentuados que propiciam a formação das brisas como uma forma de equilibrar a temperatura entre mar e continente, também foi verificado diante dos dois dias analisados, que as variáveis que proporcionam a ocorrência de brisa marítima começaram relativamente mais cedo em terreno plano, embora a brisa se aprofunde menos e tenha uma menor intensidade quando comparada à brisa formada em terreno inclinado.

3° Caso - Brisa terrestre do dia 7 de junho de 1999

Análise sobre terreno inclinado (área 1)

De acordo com a Figura 26a, referente às 08Z, observa-se a presença de ventos descendentes, originados pela topografia inclinada, esses ventos chamados brisa de montanha somados a brisa terrestre, fluíram pelo continente e entre as latitudes de 02°S e 02°05'S ocorreu seu escoamento para mar. Segundo a Figura 26b, às 09Z, não foram evidenciadas mudanças significativas no escoamento dos ventos e a circulação de brisa terrestre associada à brisa de montanha persistiu.

As 10Z é possível observar através da Figura 26c, a intensificação da brisa de montanha, que por sua vez, intensificou a brisa terrestre. O acoplamento entre estes ventos resultou em único fluxo de intensidade tão significativa que ficou próximo a se apresentar como uma circulação fechada bem definida, ressaltando que tais brisas costumam apresentar fraca intensidade.

As 11Z (figura 26d), a brisa de montanha associada à brisa terrestre alcançou a máxima intensidade ao longo do dia observado, onde se verificou um escoamento do continente em direção ao oceano e um ramo ascendente com indicativos da formação de uma circulação fechada, porém, no horário seguinte, o retorno dos ventos ao oceano já não foram evidenciados e a brisa de montanha desintensificou, começando a surgir à superfície, fluxos de ventos ascendentes, devido provavelmente ao aquecimento superficial a partir deste horário. Como observado na Figura 10a, a maior diferença de temperatura média referente à brisa terrestre (valor positivo), ocorreu às 06Z (tendo sido de 1,8°C), duas horas antes do vento médio apresentar sua maior intensidade, que chegou a 3,5 m.s⁻¹, bem como da formação da brisa terrestre em terreno inclinado.

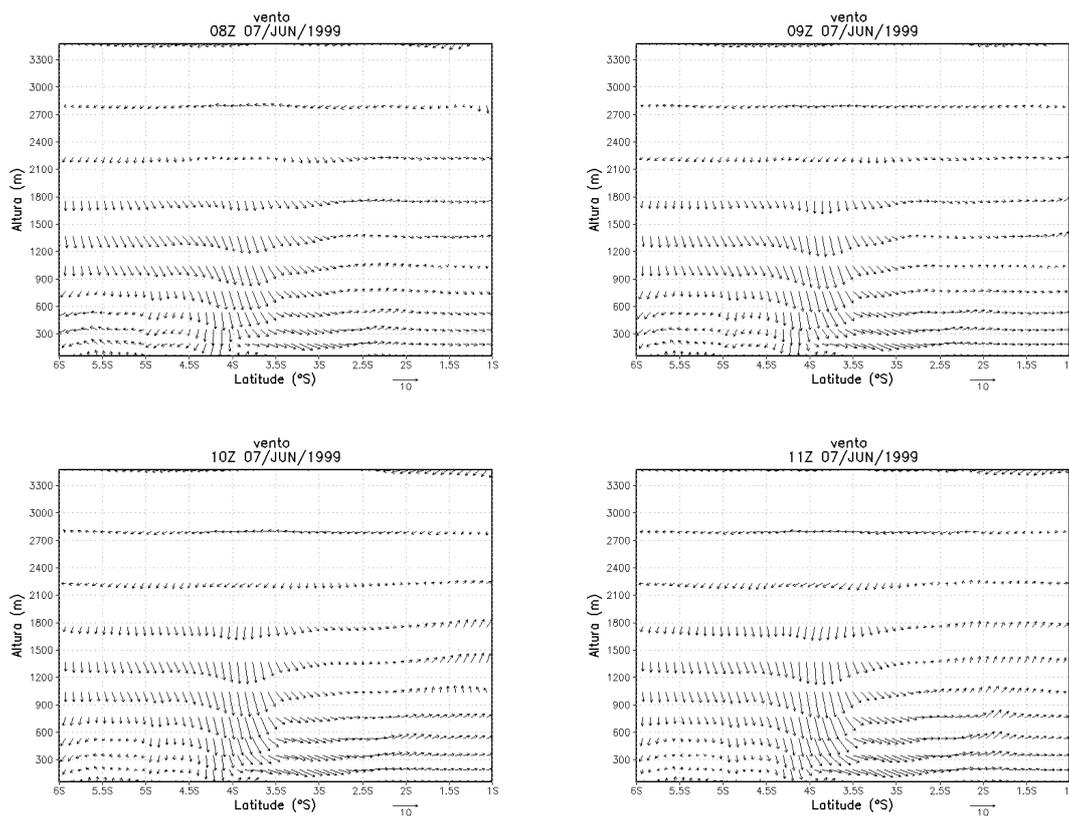


Figura 26 – Componentes v e $w \cdot 100$ do vento para as 08Z (a), 09Z (b), 10Z (c) e 11Z (d) do dia 7 de Junho de 1999 sobre a área 1 – brisa terrestre.

Análise sobre terreno plano (área 2)

Sobre terreno plano, a brisa terrestre surgiu mais cedo em relação ao terreno inclinado. Pode ser observado na Figura 27a, que às 04Z, os ventos fluíram a partir do continente, caracterizando a presença de brisa terrestre, este fluxo, originado sobre o continente, se manteve paralelo à superfície ao longo da linha da costa.

De acordo com a Figura 27b, não foram encontradas mudanças significativas no escoamento da brisa terrestre para o horário das 05Z, apenas uma discreta intensificação desta circulação, que continuou paralela a costa até cerca das 08Z, onde os ventos do oceano começaram a adentrar o continente nas proximidades da área observada.

As brisas terrestres são mecanismos atuantes no período noite/madrugada/início da manhã, onde o aquecimento da superfície cessa e o continente começa então a liberar calor por resfriamento radioativo. Ainda com essa definição clássica para eventos de brisa terrestre, durante o dia 7 de Junho de 1999, foram evidenciadas brisas terrestres durante o período diurno, mesmo havendo o aquecimento das superfícies. Uma possível explicação poderia estar na presença de um sistema próximo a latitude da área de

observação (entre 03°S e 04°S), que teria influenciado na brisa terrestre, onde se verificou que à medida que este sistema se intensificava, a brisa terrestre também se intensificava, tendo se dissipado de acordo com o deslocamento deste sistema para oeste.

A maior diferença de temperatura encontrada, de acordo com a Figura 10b, referente à brisa terrestre sobre a área 2 (valores positivos da diferença de pressão), foi de 04°C, ocorrida durante boa parte do período noturno e nas primeiras horas do dia. De acordo com o vento médio (Figura 11 b), o vento foi máximo à 16Z, cerca de aproximadamente 7 horas depois da diferença de temperatura mais elevada. Ressalta-se que o dia 7 esteve sob a influência de perturbação, que pode ter alterado o comportamento dos ventos característicos da região.

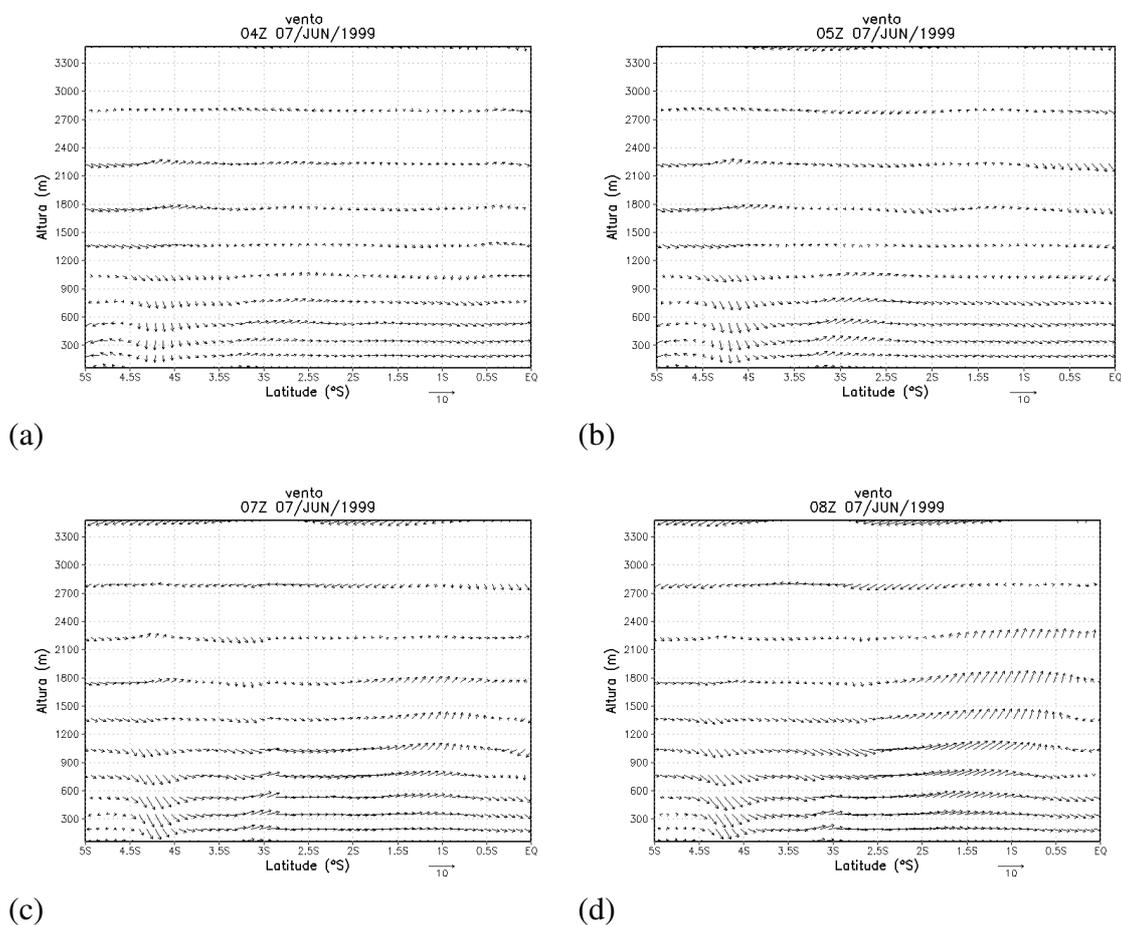


Figura 27 – Componentes v e $w \cdot 100$ do vento para as 04 (a), 05Z (b), 07Z (c) e 08Z (d) do dia 7 de Junho de 1999 sobre a área 2 – brisa terrestre.

Aplicação da teoria de máquina térmica para o dia 7 de Junho

Conforme pode ser visto na Figura 21a, verifica-se que a eficiência termodinâmica não obteve valores significativos nos horários em que havia a atuação da brisa terrestre, sendo inferior a 1% sobre a área 1. O máximo valor de aproximadamente 2,5% que ocorreu durante o dia 7, surgiu logo após enfraquecimento da brisa terrestre, onde foi verificada a predominância da circulação de brisa marítima acoplada à brisa de vale.

É possível observar na Figura 21b, que η apresenta valores maiores sobre a área 2, quando comparados ao terreno inclinado, apresentando máximos em torno de 2,8% às 08Z, duas hora antes da ocorrência dos ventos alcançarem máxima intensidade, estando, portanto, com mesmo padrão cronológico apresentado anteriormente.

Conforme observado na Figura 22a, a máxima diferença de pressão tanto simulada quanto calculada sobre a área 1 ocorreu por volta das 04Z, com valores próximos a 13,7 hPa. Sobre a área 2, os maiores valores de diferença de pressão correspondentes ao período de atuação da brisa terrestre ocorreram durante as primeiras horas da manhã, não ultrapassando 0,1 hPa, como observado na Figura 22b.

A diferença de pressão não hidrostática, apresentada na Figura 23, indica que os valores para o início do dia 7 estiveram próximos a 0,0 hPa até as 12Z, quando foi observado o enfraquecimento da brisa terrestre e início da brisa marítima. Estes valores de diferenças de pressão bem apresentaram valores menores do que em dias com predomínio de brisa marítima.

O valor máximo do Trabalho Total na área 1 ocorreu às 06Z durante o período de brisa terrestre, sendo de aproximadamente 700 Jkg^{-1} (Figura 24a). Como observado na Figura 24b, sobre a área 2, esse máximo ocorreu durante o período noturno, com valores em torno de 120 Jkg^{-1} .

Segundo a Figura 25a, o termo de trabalho W_a na área 1, também atingiu valores próximos de $0,0 \text{ Jkg}^{-1}$ até as 13Z, ou seja, até o referido horário, a quantidade de calor disponível para a circulação foi muito pequena. Semelhante a área 2, em que W_a apresentou valores inferiores a $2,0 \text{ Jkg}^{-1}$ até 10Z.

No dia 7, a maior diferença de temperatura entre os pontos a e b, foi de $1,8^\circ\text{C}$ na área 1, tendo ocorrido às 06Z, 2 horas após, (08Z), os ventos alcançaram intensidade

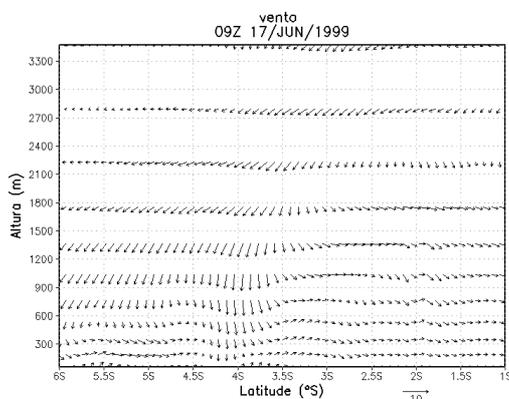
máxima ($3,5 \text{ m.s}^{-1}$). Todos os termos apresentaram concordância entre os horários de seus máximos, tendo ocorrido no período clássico da atuação das brisas terrestres.

Embora a diferença de temperatura média tenha sido pequena (04°C), em terreno plano, a velocidade do vento foi mais elevada às 16Z, atingindo $9,0 \text{ m.s}^{-1}$, tendo sido maior que na área 1, cerca de $5,5 \text{ m.s}^{-1}$. Essa discussão será feita juntamente com a análise do dia 17, também referente à brisa terrestre.

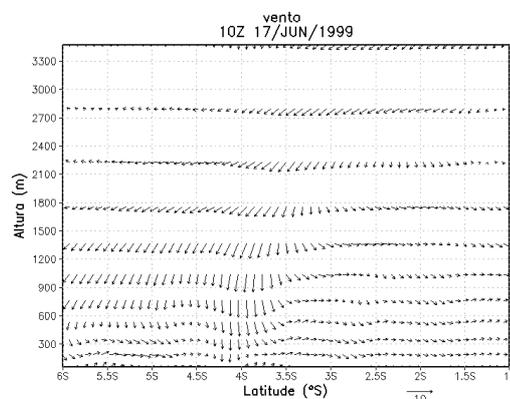
4° Caso - Brisa terrestre do dia 17 de junho de 1999

Análise sobre terreno inclinado (área 1)

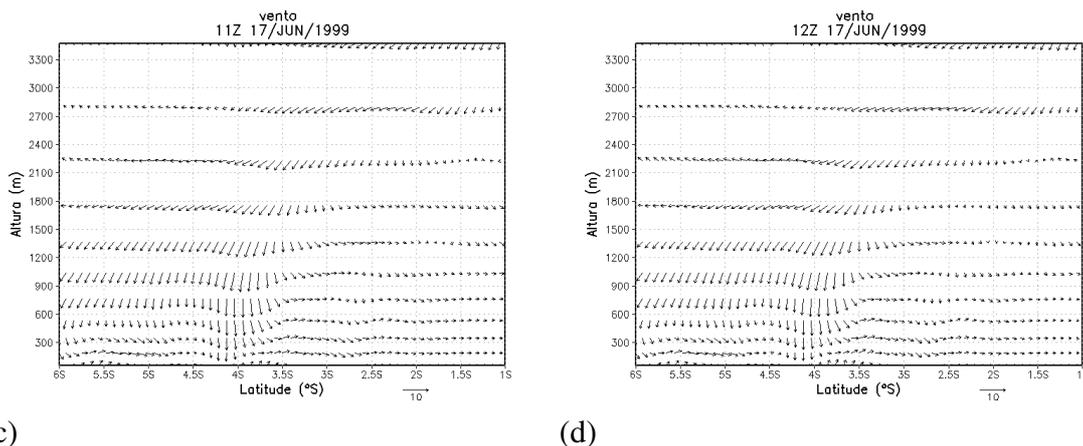
Na Figura 28a, é possível verificar a presença de um fluxo descendente dos ventos sobre o terreno inclinado entre $03^{\circ}05'S$ e $04^{\circ}05'S$ às 09Z. Esse fluxo é denominado brisa de montanha. O escoamento predominante destes ventos para o referido horário foi do continente em direção ao mar, indicando a presença de brisa terrestre sobre a área 1. Observando as Figuras, verifica-se que houve uma intensificação deste escoamento, onde os ventos de montanha persistiram até o final da simulação. Apesar de não serem caracterizadas de maneira evidente a atuação da brisa terrestre persistiu até as 12Z, tendo sido as 11Z o horário onde as brisas associadas alcançaram máxima intensidade. De acordo com a Figura 28d, a partir das 12Z, é possível observar que sobre a superfície inclinada, iniciaram-se discretos fluxos de vento ascendentes, que foram se intensificando no decorrer do dia, desestabilizando a brisa terrestre, que por fim dissipou, dando lugar à brisa marítima.



(a)



(b)



(c)

(d)

Figura 28 – Componentes v e $w*100$ do vento para as 9Z (a), 10Z (b), 11Z (c) e 12Z (d) do dia 17 de Junho de 1999 sobre a área 1 - brisa terrestre.

Análise sobre terreno plano (área 2)

Ao observar a Figura 29a, referente às 20Z, é possível verificar a presença de uma fraca brisa marítima, com ventos adentrando o continente em 03°S e com escoamento de retorno em 01°S . No horário seguinte (Figura 28b), houve uma desintensificação da brisa marítima. As 22Z, o escoamento nos primeiros níveis foi paralelo à superfície, indicando que a região já não se encontrava mais sob a influência da brisa marítima. Às 23Z houve um fluxo de brisa terrestre de intensidade significativa sobre a área 2, com ascendência dos ventos de superfície sobre a região, bem como em latitudes próximas (01°S).

Assim como no dia 7, em que a brisa terrestre durou algumas horas no período diurno, observou-se que no dia 17 de Junho havia a presença de perturbações próximas às áreas de estudo. Conforme essas perturbações se intensificaram, a brisa terrestre também se intensificou, tendo, portanto, a perturbação no campo dos ventos contribuído para a intensificação e permanência da brisa terrestre.

De acordo com a Figura 10b, a maior diferença de temperatura entre os pontos a e b ocorreu às 17Z (05°C) e os ventos médios apresentaram maior intensidade às 20Z, tendo alcançado $4,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Fig. 11b).

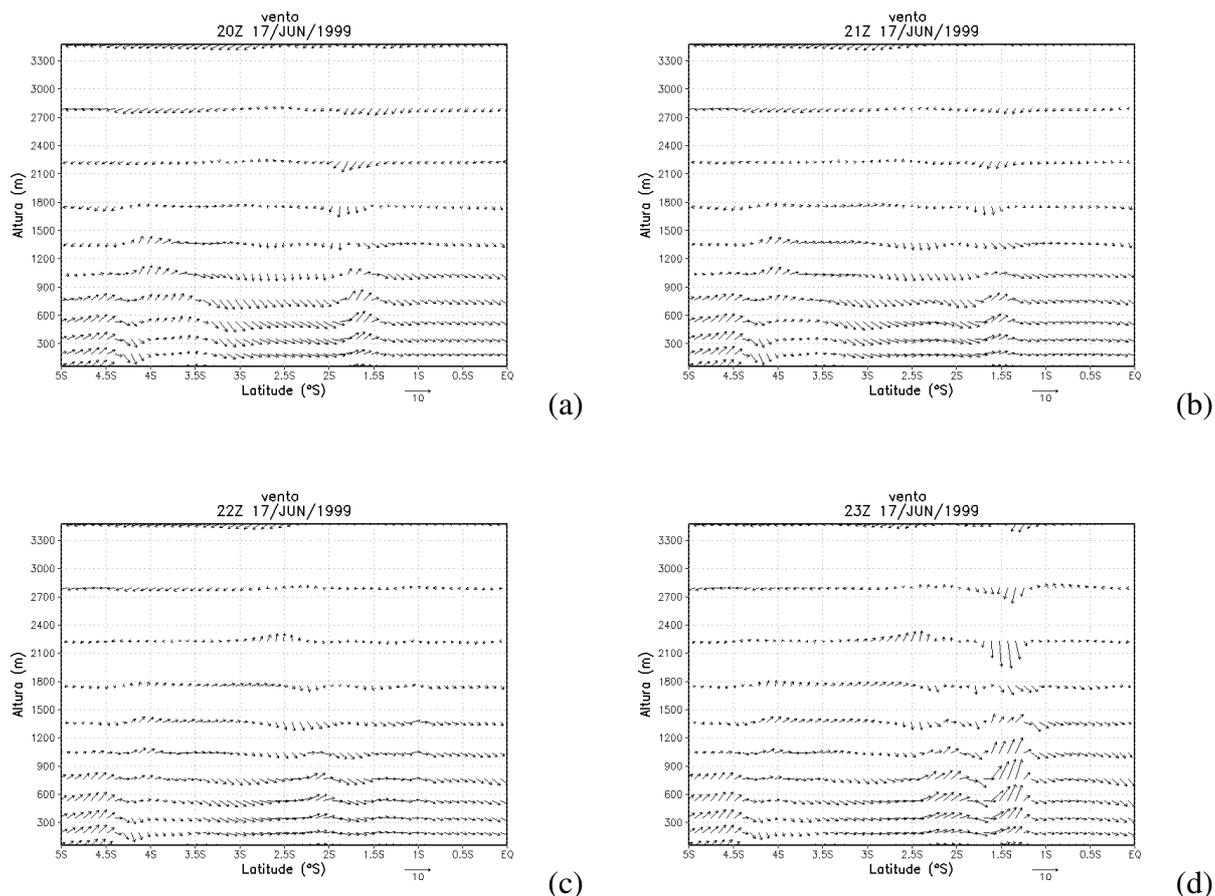


Figura 29 – Componentes v e $w*100$ do vento para as 13Z (a), 14Z(b), 15Z (c) e 16Z (d) do dia 17 de Junho de 1999 sobre a área 2 – brisa terrestre.

Aplicação da teoria de máquina térmica ao dia 17 de Junho

Podem ser observados de acordo com Figura 30a, os baixos valores de η , durante as primeiras horas do dia 17 para a área 1, onde estes não apresentaram grandes variações entre 0Z e 11Z, tendo sido menores que 2,0%. Às 12Z, η começou a aumentar, devido ao aquecimento da superfície, que de acordo a Figura de diferença de temperatura entre os pontos a e b (Figura 10a), teve início as 12Z. Foi verificado na Figura 28d, que neste horário, haviam movimentos ascendentes sobre a superfície inclinada que começaram a descaracterizar a brisa terrestre.

Sobre a área 2, como observado na Figura 30b, os valores de eficiência termodinâmica também foram pequenos até às 10Z, começando a aumentar as 11Z, onde a Figura 10b, indicou que também houve um aumento da temperatura média para o mesmo horário. Durante todo o período em que a brisa terrestre persistiu, η indicou

valores abaixo de 1.0%. Os máximos observados em ambas as figuras foram referentes à circulação de brisa marítima.

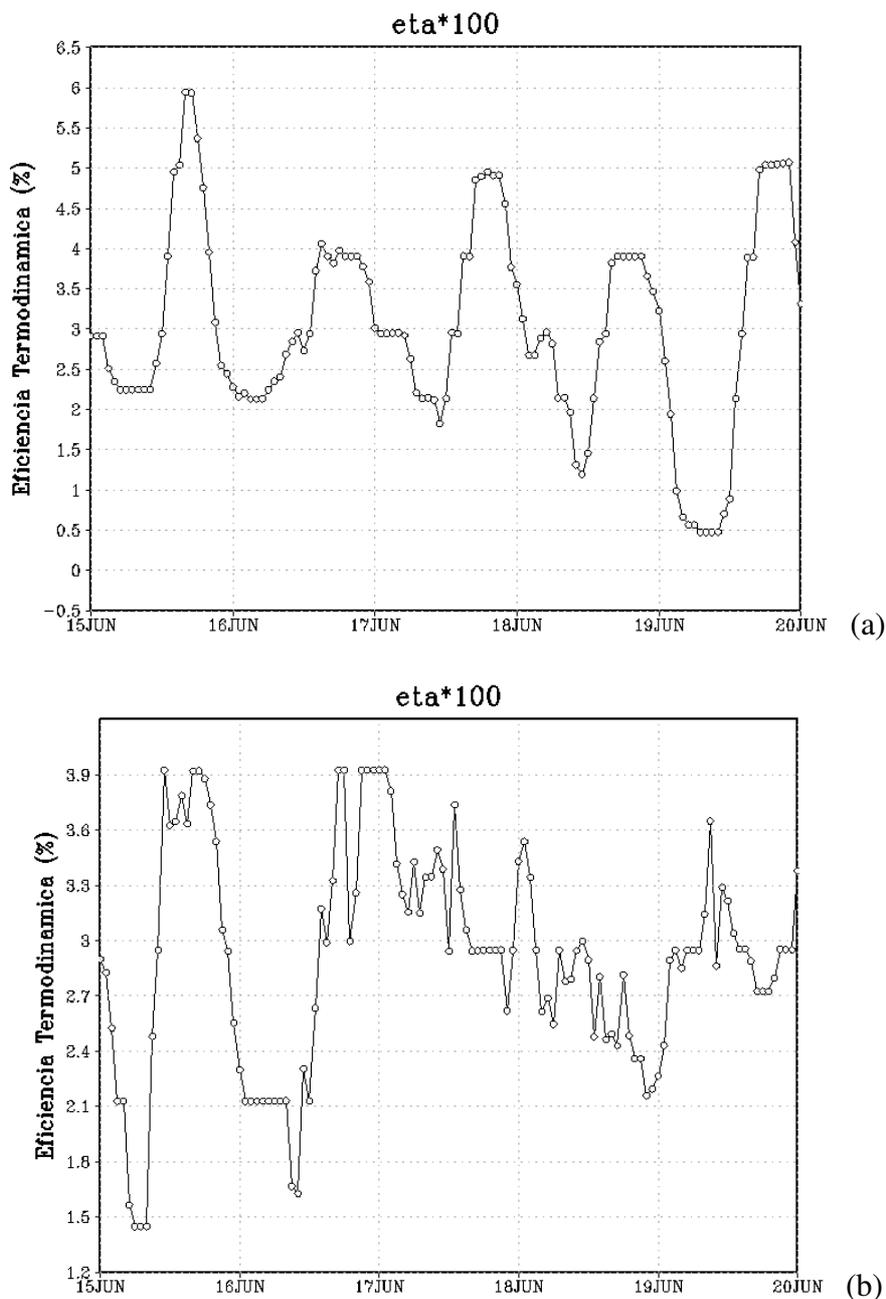
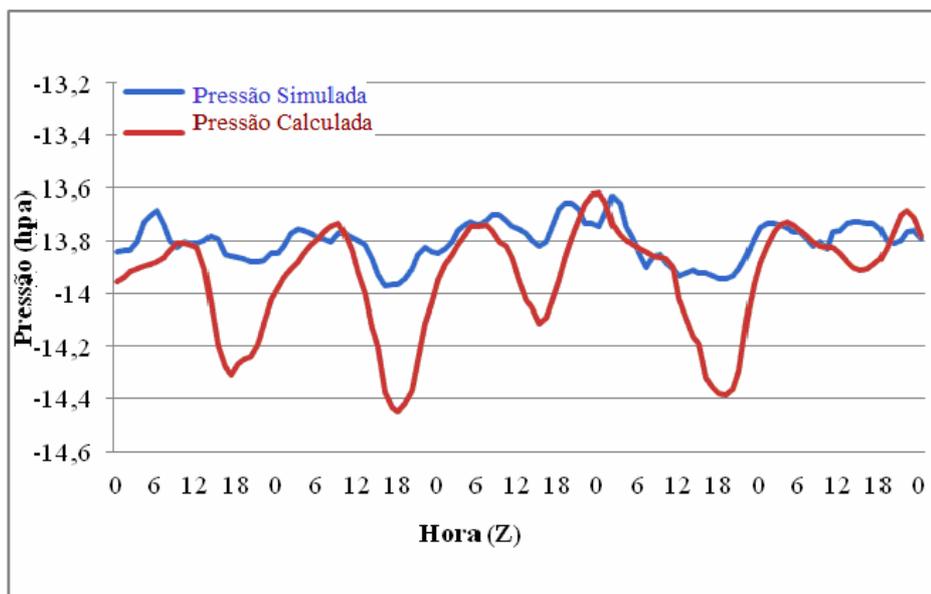


Figura 30 – Eficiência Termodinâmica sobre a área 1 (a) e área 2 (b) entre os dias 15 e 20 de Junho de 1999, com ênfase no dia 17.

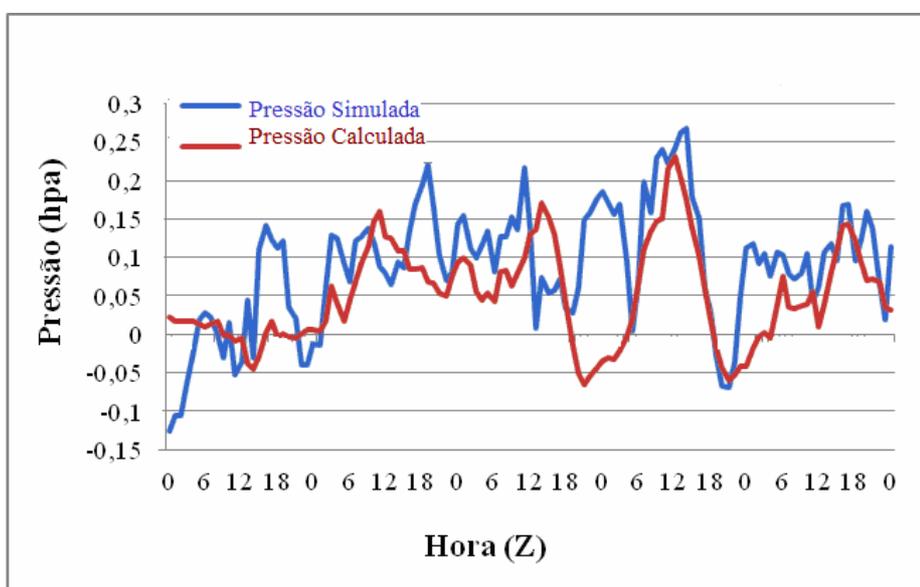
Segundo as Figuras 31a e b, observa-se que em terreno inclinado, as diferenças de pressão simulada e calculada apresentaram comportamentos similares, tanto em suas tendências quanto em seus valores. É possível verificar, conforme a Figura 31a que os valores de diferença de pressão simulada e calculada oscilaram entre 13,6 hPa e 13,8

hPa até às 13Z, após esse horário verifica-se uma mudança no comportamento desta variável, indicado a formação da brisa marítima.

De acordo com a Figura 31b, observa-se que houve uma discrepância de 0,05 hPa entre os máximos de diferença de pressão simulada e calculada, porém, ambos apresentaram comportamentos semelhantes enquanto se registrou a atuação da brisa terrestre.



(a)



(b)

Figura 31 – Diferença de pressão simulada (linha azul) x calculada (linha vermelha) sobre a área 1 (a) e área 2 (b) entre os dias 15 e 20 de junho de 1999, com ênfase no dia 17.

Segundo a Figura 32 é possível verificar que a diferença de pressão não hidrostática foi máxima às 10Z, com valor inferior a 02 hpa, apresentando comportamentos mais próximos aos casos de pressão calculada e simulada sobre a área 2.

Diante dos resultados obtidos nos 4 casos, observou-se que o comportamento da pressão não hidrostática, gerada apenas sobre o terreno inclinado (área 1), foi similar as diferenças de pressão simulada e calculada para o terreno plano. O que reforça a influência da topografia na diferença de pressão entre mar e continente, que, por conseguinte vem a influenciar intensidade das circulações de brisas.

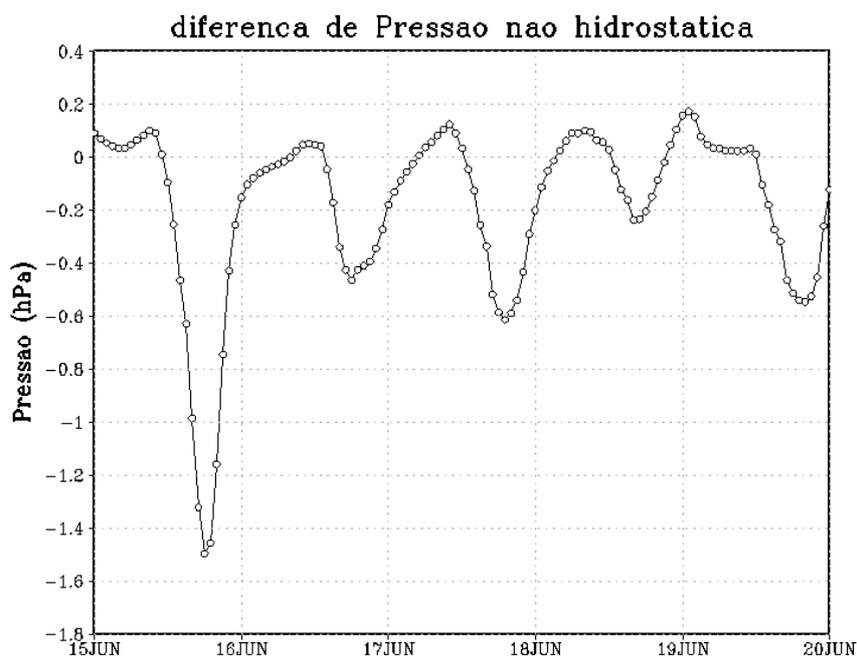


Figura 32 – diferença de pressão não hidrostática sobre a área 1.

Na área 1, foi encontrada a maior quantidade de Trabalho Total disponível para a circulação às 10Z, tendo alcançado 600 Jkg^{-1} nos horários de atuação da brisa terrestre. Sobre a área 2, a quantidade de Trabalho Total, foi bem menor quando comparada com a área 1, onde seu máximo foi de 200 Jkg^{-1} , ocorrido às 11Z, como pode ser visto na Figura 33b.

Comparando ambos os resultados, se verifica que os horários de ocorrência foram próximos, tendo início uma hora antes sobre topografia elevada. Já os valores de Trabalho Total foram cerca de 400 Jkg^{-1} mais elevados sobre o terreno inclinado.

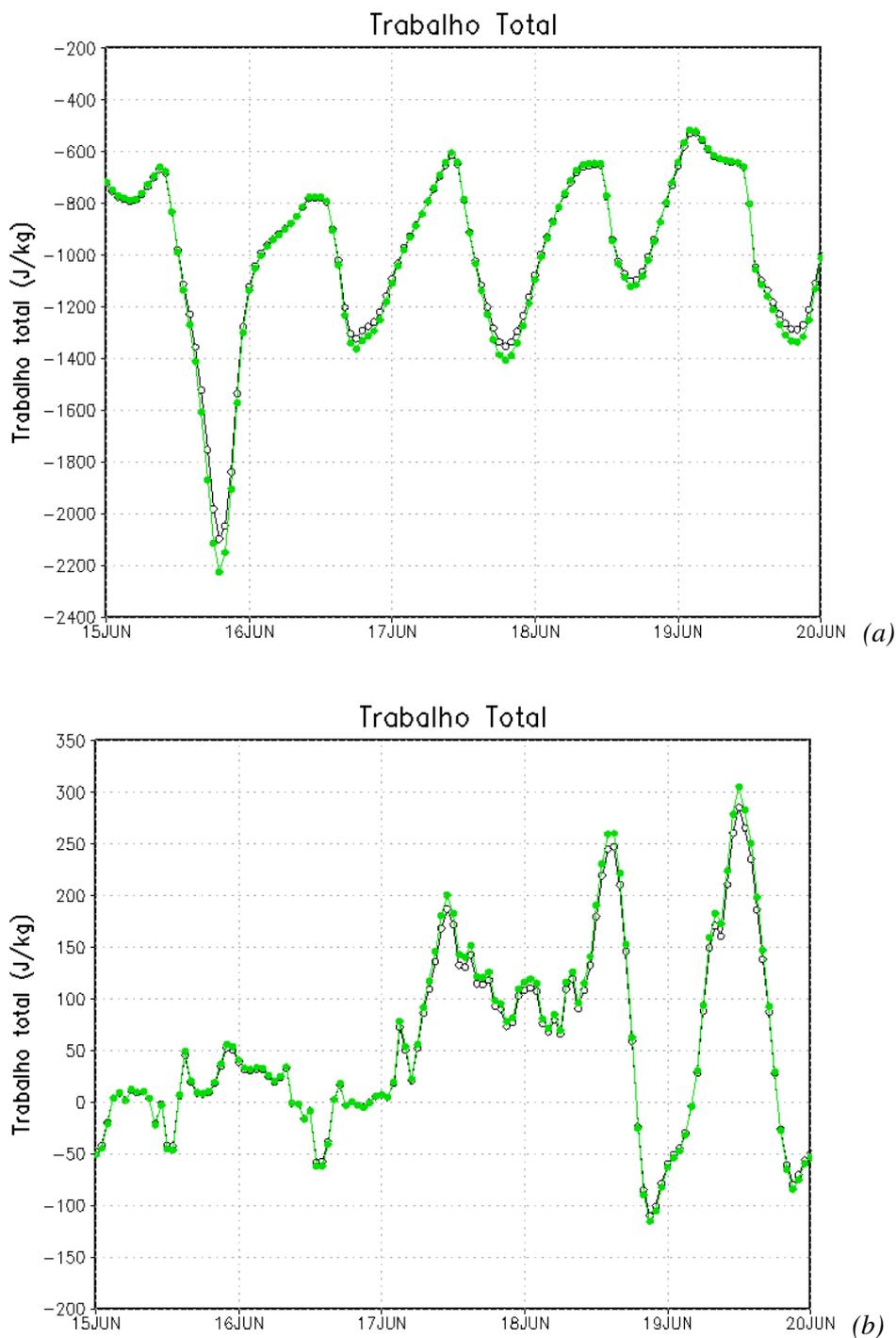


Figura 33 – Trabalho Total simulado (linha preta) x calculado (linha verde) sobre a área 1 (a) e área 2 (b).

De acordo com a Figura 34a, os valores de W_a sobre a área 1, se mantiveram baixos até as 10Z, quando começaram a atingir os $8,0 \text{ Jkg}^{-1}$. Este termo mostrou maior amplitude as 08Z, com valor próximo a $2,0 \text{ Jkg}^{-1}$ sobre terreno plano (Fig 34b). Portanto, o termo W_a foi superior em $6,0 \text{ Jkg}^{-1}$ sobre a área 1 durante os eventos de brisa terrestre durante o dia 17 de Junho de 1999.

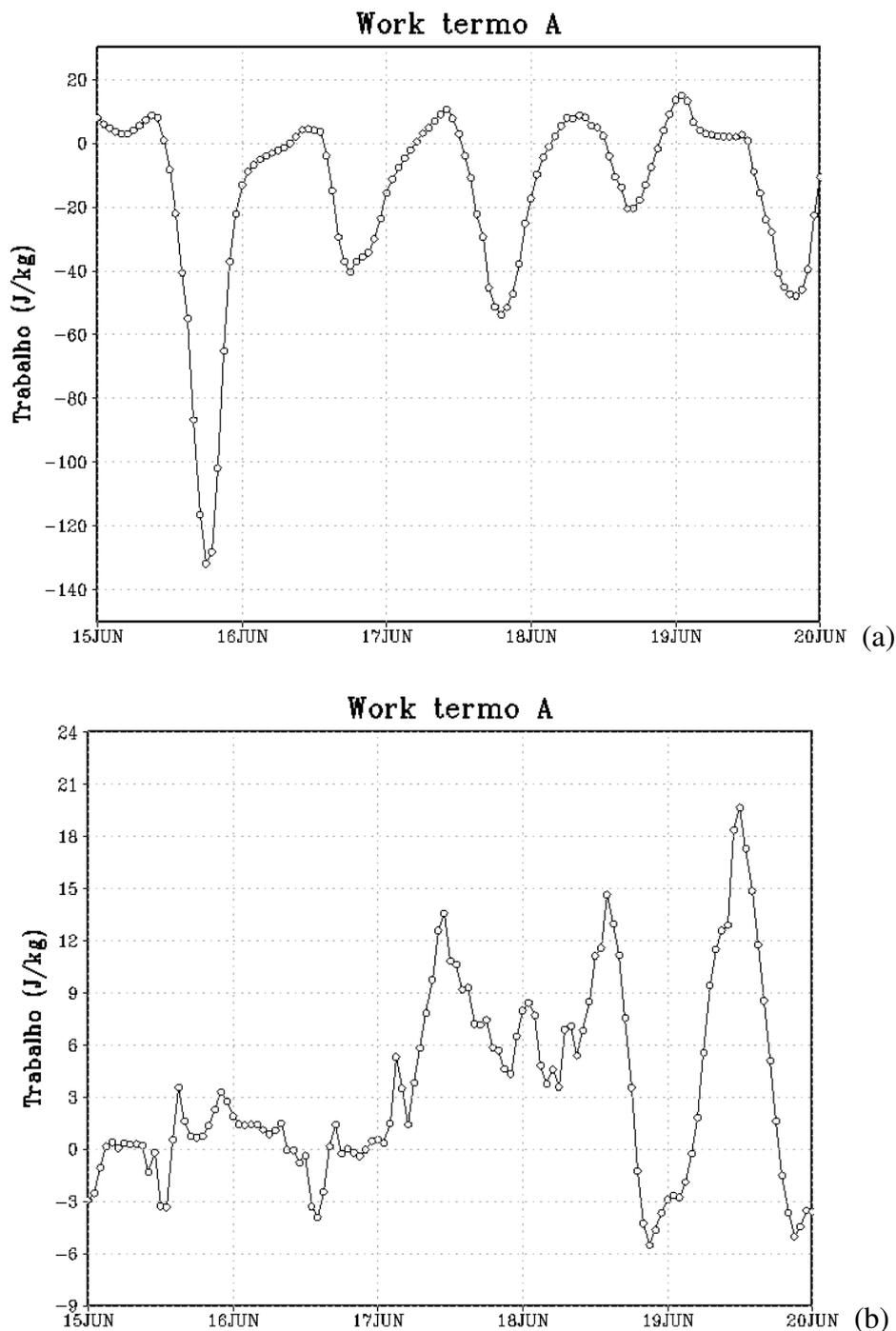


Figura 34 – Termo de trabalho W_a sobre a área 1(a) e área 2(b) entre os dias 15 e 20 de Junho de 1999, com ênfase no dia 17.

De acordo com os termos apresentados para a brisa terrestre durante o dia 17, observa-se que na área 1, a diferença de temperatura foi máxima às 10Z, tendo sido de $2,1^{\circ}\text{C}$, os ventos para este dia ocorreram 2 horas depois, com uma intensidade de $2,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. A eficiência termodinâmica sobre terreno inclinado foi máxima às 10Z durante o período de atuação da brisa terrestre, enquanto que sobre a área 2, a diferença de

temperatura foi mais elevada às 17Z (05°C). Isso ocorreu devido ao rápido aquecimento da topografia, onde o ar em contato com a superfície ascendeu e desestruturou a brisa terrestre, fazendo com que a mesma não evoluísse e se dissipasse mais rapidamente sobre o terreno inclinado (área 1). Os termos obtiveram a mesma sequência dos dias anteriores, tendo início pela temperatura, resultando por fim nas circulações de brisas.

Observando os 4 dias analisados, pode-se ressaltar que o dia 9, foi o que obteve maior eficiência termodinâmica durante todo o mês de Junho em ambas as áreas de estudo, embora tivesse sido observada a presença de perturbação no campo dos ventos sobre o oceano.

Diante dos resultados apresentados, pode ser verificado que as brisas terrestres, comparando regiões plana e inclinada, obteve sua intensidade máxima bem como sua dissipação em horários distintos. Sobre superfícies planas, as brisas terrestres se mostraram mais intensas e perduraram por mais tempo em relação à topografias inclinadas.

Para os casos com topografia inclinada, verificou-se que o topo do terreno inclinado começou a receber as maiores quantidades de energia e a emití-las mais rapidamente através dos fluxos de ar ascendente. Quando o ar começa a ascender sobre o topo do terreno inclinado, se inicia uma mudança na direção dos ventos que constituem a brisa terrestre, enfraquecendo e dissipando a brisa terrestre e dando lugar a brisa marítima. Portanto, de acordo com os resultados obtidos no presente trabalho, verifica-se que a topografia auxilia e reforça a brisa marítima, tendendo a enfraquecer e dissipar brisas terrestres nas primeiras horas do dia, o que não ocorreu sobre terreno plano. Também se evidenciou baixos valores de eficiência termodinâmica no estudo de brisa terrestre, isso porque ela representa a máxima quantidade de energia disponível para formar o mecanismo de brisa e está diretamente relacionada a altura da CLA, que tem sua maior profundidade no período diurno devido a maior convecção.

Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Alcântara et al. (2008), onde a topografia atuou para reforçar a brisa marítima e dissipar a brisa terrestre, porém, contrasta-se aos resultados obtidos por Qian et al, (2011). A provável causa para as divergências nos resultados, se deve ao fato do autor ter utilizado em seus experimentos cenários idealizados, onde as reais condições atmosféricas não estão sendo consideradas, principalmente no que diz respeito à influência dos ventos de grande escala.

5.4 - Validação estatística

Para uma maior confiabilidade dos resultados obtidos neste experimento, foram utilizados parâmetros estatísticos para as diferença de pressão simulada e calculada pela teoria, bem como o Trabalho Total disponível para circulação. A Tabela 1 mostra os valores do erro quadrático médio (RMSE) e o RMSE(BIAS) que é o RMSE retirado de um BIAS constante e o desvio padrão simulado (σ_s) e calculado (σ_c), onde foi tomado como referência, o desvio padrão simulado, para as variáveis já referenciadas.

De acordo com resultados apresentados na tabela 1, pode ser observado que o RMSE(BIAS) obteve resultados melhores, (mais próximos de 0) em relação ao RMSE em todos os casos. Também observa-se que as melhores correlações ocorreram sobre a área 2.

De acordo com a metodologia aplicada por Pielke, para observação de brisas marítimas sobre o estado da Flórida –USA, **1) $\sigma_c \sim \sigma_{obs}$; 2) $RMSE < \sigma_{obs}$ e 3) $RMSE(BIAS) < \sigma_{obs}$** são condições indicadoras de simulações satisfatórias. No caso deste experimento a condição 1, foi modificada, uma vez que a finalidade do experimento é validar os resultados calculados pela teoria, o desvio padrão simulado foi adotado como referência. A partir disto e diante de Tabela1, observa-se que os melhores resultados foram os de pressão, porém, é válido ressaltar que os termos de trabalho, apresentaram valores significativamente altos devido aos mesmos terem relação intrínseca com a temperatura, que no caso de da área 1, variou bastante, uma vez que a temperatura diminui com a altura e esta região encontra-se numa altitude mais elevada em relação a área 2.

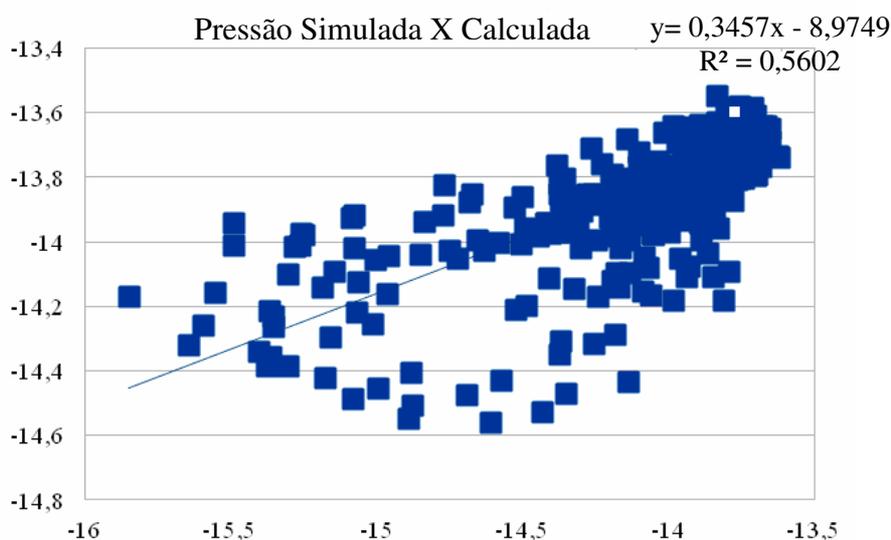
A segunda e terceira condições, se mostraram bastante satisfatórias, em que, somente o caso $RMSE < \sigma_{sim}$ para avaliação da pressão sobre a área 1, não se aplicou.

Tabela 1– Parâmetros estatísticos aplicados à pressão e Trabalho Total sobre as áreas 1 e área 2, S(Simulado) e C(Calculado).

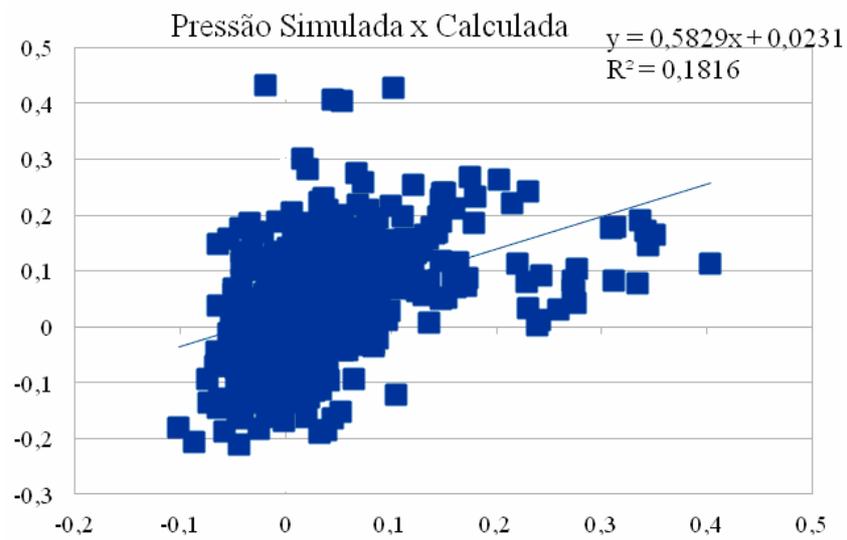
| Variáveis utilizadas | RMSE | RMES(BIAS) | σ (Simulado); σ (Calculado) |
|----------------------|-------|------------|--|
| Pressão-área 1 SxC | 0,412 | 0,298 | 0,351 ; 0,19 |
| Pressão- área 2 SXC | 0,09 | 0,089 | 0,102; 0,05 |
| Trabalho-área 1 SXC | 40,74 | 40,68 | 371 ; 405 |
| Trabalho área 2 SXC | 4,7 | 4,6 | 69 ; 73,5 |

Nas Figuras 35 a, b, c e d, pode ser observado que os parâmetros de simulados e calculado, tiveram relação satisfatória e corresponderam melhor entre si para os termos de Trabalho Total, alcançando uma correlação ainda maior sobre a área 1.

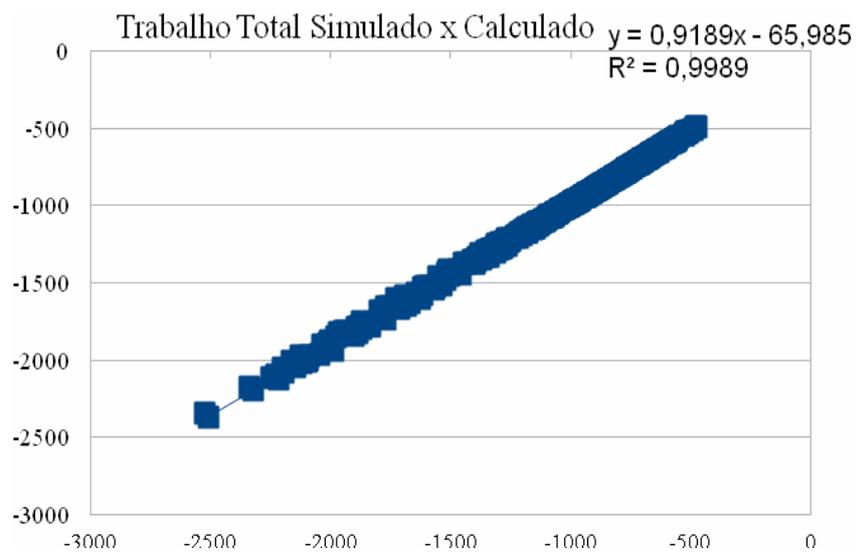
Aplicando o teste de significância de T-Student, que classifica valores superiores a 3 como satisfatórios, todas as correlações se mostraram coerentes, principalmente, as referentes ao Trabalho Total, onde esta validação estatística foi superior a 80, implicando em 99% de confiabilidade dos resultados. O menor limiar foi encontrado para Pressão sobre a área 1, onde o cálculo para o teste de significância indicou valores em torno de 6.



(a)



(b)



(c)

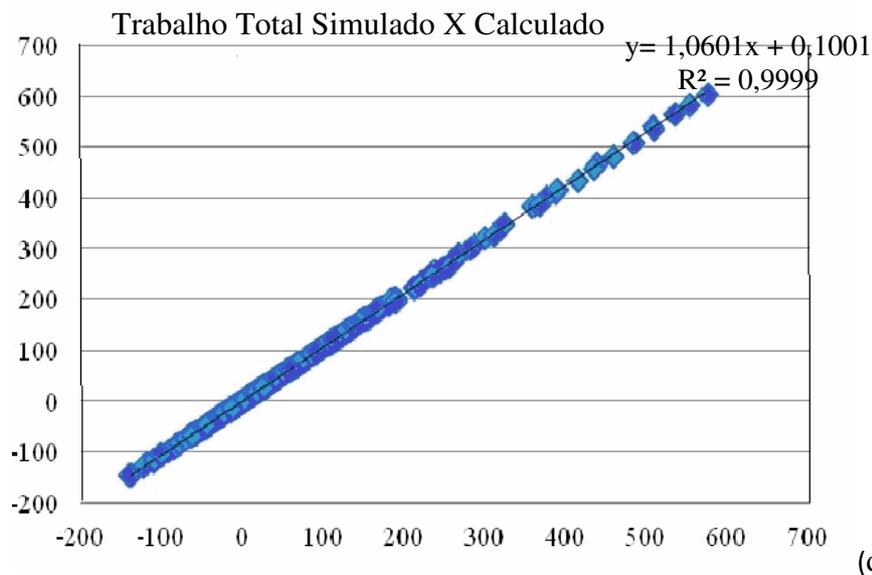


Figura 35 – Correlação dos parâmetros estatísticos de Pressão e Trabalho Total sobre as áreas 1(a e c) e área 2 (b e d).

6 - CONCLUSÃO

De acordo com os resultados encontrados nas simulações bem como os obtidos através da teoria de diferença de pressão, pode-se concluir que:

A topografia auxilia o acoplamento entre a brisa marítima e de vale, porém, enfraquece as brisas terrestres associadas às brisas de montanha.

Os resultados obtidos através da teoria de diferença de pressão apresentaram resultados bastante semelhantes aos simulados pelo BRAMS, principalmente referentes à área 1.

Os termos de Trabalho Total apresentaram resultados próximos entre o simulado e o calculado pela teoria, apresentando uma correlação de aproximadamente 1.

A eficiência mostrou-se um parâmetro importante quanto à intensidade das brisas marítimas, contudo, não se verificou a mesma relação para as brisas terrestres.

A diferença de pressão não hidrostática sobre a área 1 apresentou resultados similares às diferenças de pressão simuladas e calculadas na área 2.

A temperatura é a principal variável na formação das brisas, porém, sua intensidade bem como sua penetração sobre o continente, aumenta conforme aumenta o

gradiente de pressão, tendo sido mais intensa, portanto, sobre a área 1, devido a grande inclinação do terreno.

A intensidade da brisa terrestre foi maior em terreno plano do que sobre o terreno inclinado, devido à rápida absorção de calor sobre o topo do terreno inclinado, que dissipou rapidamente a brisa terrestre.

Os termos de trabalho total entre os pontos a e b apresentaram o mesmo comportamento de diferença de temperatura entre mar e continente.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abbs, D. J. and Physick, W. L. (1992).: **Sea breeze observations and modelling: a review.** Aust Meteorol. Mag., 41

Adkins, C. J. (1968).: **Equilibrium Thermodynamics.** Cambridge University Press, Cambridge, UK, 285 pp.

Alcântara, C.R. e Souza, E. P., (2008).: **Uma Teoria Termodinâmica para Brisas: teste utilizando simulações numéricas.** Revista Brasileira de Meteorologia, v.23, n.1, - 11.

Alcântara, C.R. (2007). **aplicação de teorias termodinâmicas às circulações de brisa utilizando simulações numéricas.** Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

Atkinson, B.W.; **Meso-scale atmospheric circulations.** Academic Press, p. 125-214.

Avissar, R.; Pielke, R. A.; A (1989).: **Parameterization of heterogeneous land surface for atmospheric numerical models and its impact on regional meteorology.** Mon. Wea. Rev. v. 117, p. 2113-2136.

Azorin-Molina, C., Chen, D., Tijm, S., and Baldi, M (2011).: **A multi-year study of sea breezes in a Mediterranean coastal site: Alicante (Spain),** Int. J. Climatol., 31, 468–486,

Baumbach, Gunter.; Vogt, Ulrich (1999).: **Experimental determination of the effect of mountain-valley breeze circulation on air pollution in the vicinity of Freiburg.** Atmospheric Environment 33 4019}4027.

Cabral, F. C (2008).: **Estudo Numérico Sobre os Impactos da Expansão de Áreas de Pastagem e Cultivo de Soja nas Circulações Locais da Região Amazônica.** Trabalho de dissertação; Universidade de São Paulo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas.

Cavalcanti, I. F. A., kousky, V.E (1982).: **Influência da Circulação da Escala Sinótica na Circulação da Brisa Marítima na Costa NNE da América do Sul.** INPE-2573-PRE/221, INPE, São José dos Campos (SP), 13p.

Chen. C; Cotton, W. R 1987.; **The physics of the marine stratocumulus-capped mixed layer.** J. Atmos. Sci.. v. 44, p. 2951-2977.

CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos):
<http://www.cptec.inpe.br/brams>.

Crosman, E. and Horel, J (2010): Sea and Lake Breezes: A Review of Numerical Studies, Bound.-Lay. Meteorol., 137, 1–29. Dalu, G. A., Baldi, M., Pielke, R. A., and Leoncini, G.: Mesoscale

Damato, F., O. Planchon, and Dubreuil (2003): A remote-sensing study of the inland penetration of sea-breeze fronts from the English Channel Weather, 58, 219-226.

Decaria, A. Exploring the land/sea breeze circulations 2005.: Lead to learn modules, Millersville.

Fay B, Neunh userer L. (2006). Evaluation of high-resolution forecasts with the non-hydrostatic numerical weather prediction model Lokalmodell for urban air pollution episodes in Helsinki, Oslo and Valencia. Atmospheric Chemistry and Physics 6: 2107–2128. DOI: 10.5194/acp-6-2107-2006.

Fock H.B., K., Schlünzen, H.K.; Characterization of typical coastal circulations with high-resolution measurements in the Gulf of Valencia Meteorological Institute, University of Hamburg, Bundesstra e 55, D-20146 Hamburg

Franchito, S. H., Yamazaki, Y (1984b): Simula o das Circula es Locais com um Modelo Numérico em três Dimensões. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 3, 1984, Belo Horizonte, Sociedade Brasileira de Meteorologia:

Fritz, R., Teixeira, B. (2008): O Fen meno da brisa e sua rela o com a chuva sobre Fortaleza-ce., revista brasileira de meteorologia, v.23, n.3, 282-291,

Gangoiti, G., Alonso, M., Navazo, M., Albizuri, A., Perez-Landa, G., Matabuena, M., Valdenebro, V., Maruri, M., Garcia, J.A., Millan, M.A., (2002): Regional transport of pollutants over the Bay of Biscay: analysis of an ozone episode under a blocking anticyclone in west central Europe. Atmos. Environ. 36, 21349–21361.

Grell, G. A.; D v nyi, d (2002): A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. Geophysical research letters, v. 29, n. 14, p. 38-1/38-4.

Kikuchi Y, Arakawa S, Kimura F, Shirasaki K, Nagano Y (1981): Numerical study on effects of mountains on the land and sea breeze circulation in Kanto District. J Meteor Soc Japan 59: 723–737

Kottmeier C, Palacio-Sese P, Kalthoff N, Corsmeier U, Fiedler F. (2000): Sea breezes and coastal jets in southeastern Spain. *International Journal of Climatology* 20: 1791–1808.

Kuo, H. L 1974.: **Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large-scale flow.** J. Atmos. Sci. V. 31, p.1232-1240.

Lelieveld, J., Berresheim, H., Borrmann, S., Crutzen, P.J., Dentener, F.J., Fischer, H., Feichter, J., Flatau, P.J., Heland, J., Holzinger, R., Kormann, R., Lawrence, M.G., Levin, Z., Markowicz, K.M., Mihalopoulos, N., Minikin, A., Ramanathan, V., De Reus, M., Roelofs, G.J., Scheeren, H.A., Sciare, J., Schlager, H., Schultz, M., Siegmund, P., Steil, B., Stephanou, E.G., Stier, P., Traub, M., Warneke, C., Williams, J., Ziereis, H., 2002. **Global air pollution crossroads over the Mediterranean.** Science 298, 794–799.

Lu R, Turco RP (1995).: **Air pollutant transport in a coastal environment. Part II: Three-dimensional simulations over Los Angeles basin.** Atmos Environ 29: 1499–1518.

Mahfouf, J.; Richard, E.; Mascart, P 1987.: **The influence of soil and vegetation on the development of mesoscale circulations.** J. Clim. Appl. Meteor. v. 26, p. 1483-1496.

Mahrer, Y.; Pielke, R. A. 1978.: **The meteorological effect of the changes in surface albedo and moisture.** Isr. Meteorol. Res. *Pap.*, v.2, p.55-70.

Melo, E.C.S. Simulação Numérica de Circulações de Brisa no Estado da Paraíba. 2000. 74p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

Mellor, G.L.; Yamada, T. (1982).: **Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems.** Rev. Geophys. Space Phys. v. 20, p. 851–875.

Miao, J.-F; Kroon, L. J. M.; Vilá-Guerau de Arellano, J.; H., A. A. M. (2003). **Impacts of topography and land degradation on the sea breeze over eastern Spain.** Meteorol Atmos Phys, v.84, p.157–170.

Millaín MM, Mantilla E, Salvador R, Carratala´ A, Sanz MJ, Alonso L, Gangoiti G, Navazo M (2000).: **Ozone cycles in the western Mediterranean basin: Interpretation of monitoring data in complex coastal terrain.** J Appl Meteor 39.

Miller, S. T. K., B. D. Keim, R. W. Talbot, and H. Mao, (2003): **Sea breeze: Structure, forecasting and impacts.** Rev. Geophys., 41, 1-1–1-31.

Molion, L.C.B e Bernardo.S.O (2000).: **Dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro.**

Neumann, J.(1973). **The sea and land breezes in the classical Greek literature.:** Bull. Am. Met. Soc., v.54, p.5 – 8.

Pielke, R. A. (1974) **A three-dimensional numerical model of sea breezes over south Florida.** *Mon. Wea. Rev.*, 102.

Planchon, F. Damato, V. Dubreuil & P. Gouery (2006).: **A method of identifying and locating sea-breeze fronts in north-eastern Brazil by remote sensing.**

Qian, C. T. Epifanio.:F. Z. (2011).: **Topographic Effects on the Tropical Land and Sea Breeze.**

Renno, N. O. and Ingersoll, A. P. (1996).: **Natural convection as a heat engine: a theory for CAPE.** *J. Atmos. Sci.* **53**, 572–585.

Renno, N. O., Burkett, M. L. and Larkin, M. P. (1998).: **A simple theory for dust devils.** *J. Atmos. Sci.* **55**, 3244–3252.

Renno, N. O. and Bluestein, H. B. (2001).: **A simple theory for waterspouts.** *J. Atmos. Sci.* **58**, 927–932.

Renno, N. O. and Adams, D.K. (2005).: **Thermodynamic efficiencies of an idealized global climate model.**

Renno, N. O. (2008).: **A thermodynamically general theory for convective vortices.**, Oxford, Oxford, OX1 3PU, UK and Department of Atmospheric, Oceanic and Space Sciences, University of Michigan, Ann Arbor, MI 48109, USA.

Ries H, Schlunzen KH. (2009).: **Evaluation of a mesoscale model with different surface parameterizations and vertical resolutions for the bay of Valencia.** *Monthly Weather Review* 137: 2646–2661.

Rotunno, R. (1992).: **Coastal Meteorology. A review of the state of the science. Panel on Coastal Meteorology, Committee on Meteorological Analysis, Prediction, and Research, Board on Atmospheric Sciences and Climate, Commission on Geosciences, Environment, and Resources, National Research Council, National Academy of Sciences.** Washington: The National Academy Press p. 112.

Rotunno, R., and Coauthors, (1996).: **Coastal meteorology and oceanography: Report of the Third Prospectus Development Team of the U.S.** Weather Research Program to NOAA and NSF. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 1578–1585.

Segal, M.; Avissar, R.; Mccumber, M. C.; Pielke, R. A (1988).: **Evolution of vegetation effects on the generation and modification of mesoscale circulations.** *J. Atmos. Sci.* v.45, n. 16, p. 2268-2292.

Segal, M.; Avissar, R.; Mccumber, M. C.; Pielke, R. A (1988).: **Evolution of vegetation effects on the generation and modification of mesoscale circulations.** *J. Atmos. Sci.* v.45, n. 16, p. 2268-2292.

Simpson, J. E.(1994).: **Sea breeze and local wind**. Cambridge University Press, Cambridge. 234p.

Souza, E. P. (1999).: **Estudo teórico e numérico entre convecção e superfícies heterogêneas na Região Amazônica**. TESE DE DOUTORADO. Universidade de São Paulo, 7-31.

Souza, E. P.; Rennó, N. O.; Silva Dias, M.A.F. (2000).: **Convective circulations induced by surface heterogeneities**. *Journal of Atmospheric Sciences*. 57: 2915-2922.

Souza, E. P.(2004).: **Trabalho de expansão e de compressão associado às circulações convectivas**. *Rev. Bras. Meteorol.*, v. 19, n. 2, p. 141-148.

Tijm, A. B. C., A. J. van Delden, and A. A. M. Holstag, (1999).: **The inland penetration of sea breezes**. *Contrib. Atmos. Phys.*, 72, 317–328.

Varejão-Silva.M.A (2006), P 312-313.

Walko, R.; Cotton, W.R.; Meyers, M.P.; Harrington, J.Y. (1973).: **New RAMS cloud microphysics parameterization. Part I: The single-moment scheme**. *Atmos. Res.* V. 38, p. 29-62.

Woolard, E. W. .(1973).: **Recent investigations on the energy in the earth's atmosphere, its transformation and dissipat on**. *Monthly weather review*, p. 254-255

Gevaerd,R. Freitas,S (2006).: **Estimativa operacional da umidade do solo para iniciação de modelos de previsão numérica da atmosfera**.