



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/02.13.16.30-MAN

**SOFTWARE PARA CÁLCULO DA ENERGÉTICA DOS
DISTÚRBIOS ATMOSFÉRICOS (ENERGETICA-FOK
EDIÇÃO 1)**

Sergio Henrique Soares Ferreira
Manoel Alonso Gan

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3SNP772>>

INPE
São José dos Campos
2019

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Murilo Luiz Silva Gino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/02.13.16.30-MAN

**SOFTWARE PARA CÁLCULO DA ENERGÉTICA DOS
DISTÚRBIOS ATMOSFÉRICOS (ENERGETICA-FOK
EDIÇÃO 1)**

Sergio Henrique Soares Ferreira
Manoel Alonso Gan

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3SNP772>>

INPE
São José dos Campos
2019



Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

RESUMO

Este é um guia onde é apresentado a implementação uma formulação de energética dos distúrbios atmosféricos em software desenvolvido em Fortran 90, visando sua instalação e utilização, tanto em pesquisa quanto em operação. Também é fornecida uma visão geral da estrutura do programa, visando facilitar o entendimento das várias etapas de cálculo da energética, que envolvem: a obtenção do estado básico da atmosfera, cálculo da energia dos distúrbios a obtenção dos resultados integrados na vertical e no volume. Os diversos termos de energética, assim como outros termos mais relacionados são calculados pelo programa, resultando em um leque grande de variáveis. Para identificação das variáveis e sua interpretação e utilização, as equações utilizadas são apresentadas e explicadas em detalhes, assim como os respectivos nomes e siglas das variáveis adotadas no software.

ABSTRACT

This is a guide where the implementation of an energetic formulation of the atmospheric disturbances developed in Fortran 90 is presented, aiming its installation and use, both in research and in operation. An overview of the structure of the program is also provided, in order to facilitate understanding of the various energy calculation steps, which involve: obtaining the basic state of the atmosphere, calculating the energy of the disturbances, obtaining the integrated results vertically and in volume. The various energy terms, as well as other related terms, are calculated by the program, resulting in a large range of variables. For the identification of the variables and their interpretation and use, the equations used are presented and explained in detail, as well as the respective names and acronyms of the variables adopted in the software.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Exemplo de termos da energética do distúrbio integrado da superfície a 100 hPa para o dia 01-jan-2003: a) EKL integrado (cores) e vento em 300 hPa; b) Termo BRC (cores) e altura geopotencial em 850 hPa; c) Termo BRT (Cores) e altura geopotencial em 350 hPa; c) Termo DSD (cores) e fluxo ageostrófico (vetores) (200 hPa).....	9
Figura 2.2 - Evolução Temporal da tendência da energia cinética para um evento de VCAN, formado no oceano pacífico em 01-jan-2003. O eixo do tempo está expresso em dias e frações de dias. Em (a) são apresentados: CKT-Tendencia da energia cinética calculada; OKT – Tendência da energia cinética observada; Res-resíduo. Em (b): BRC – termo baroclínico; BRT – termo barotrópico; DSD – Desenvolvimento Corrente Abaixo.....	10
Figura 3.1 - Diagrama de fluxo de dados do software Energética-FOK.....	15
Figura 3.2 - Eddy Kinetic Energy Tendece at 950 hPa ($m^2.s^{-2}$).....	23
Figura 4.1 : Esquema de fluxos de energia baseados em Lorenz.....	30
Figura 4.2 - Esquema dos fluxos de energia baseados em Orlansk e Katzfey.....	31
Figura 4.3 - Termo de Convergência do Fluxo Ageostrófico (cores) e Altura Geopotencial (linhas) em 250 hPa: a) Com vetores do fluxo de geopotencial, b:) Vetores do Fluxo Ageostrófico	41
Figura 4.4 – Corte vertical de um VCAN em 28 S, para as variáveis de CFA ($W.kg^{-1}$) em cores, Temperatura potencial (K) em linhas, e vento transversal em vetores.....	43
Figura 5.1 – Exemplo de área por ponto de grade, para uma grade regular com intervalos de 0.5 graus de latitude/longitude ($m^2 \times 10^{10}$).....	49
Figura 5.2 – Exemplo de resultado de massa da coluna vertical para uma grade regular de 0.5 graus de latitude e longitude e para integração da superfície a 100 hPa (Kg. 10^{10}).....	50
Figura 5.3 – Exemplo de resultado de energética verticalmente integrada para 2018-02-25 12UTC. Em (a), (b), (c) são apresentados em cores os termos DSD, BRC e BRT em $W.Kg^{-1} \times 10^{-3}$. Em (d) é apresentado a energia cinética do distúrbio em $J.kg^{-1}$	52
Figura 5.4 – Exemplo de resultado de energética verticalmente integrada para 2018-02-26 12UTC. Em (a), (b), (c) são apresentados em cores os termos DSD, BRC e BRT em $W.Kg^{-1} \times 10^{-3}$. Em (d) é apresentado a energia cinética do distúrbio em $J.kg^{-1}$	53
Figura 5.5 – Exemplo de resultado de energética verticalmente integrada para 2018-02-28 12UTC. Em (a), (b), (c) são apresentados em cores os termos DSD, BRC e BRT em $W.Kg^{-1} \times 10^{-3}$. Em (d) é apresentado a energia cinética do distúrbio em $J.kg^{-1}$	54
Figura 6.1 – Exemplo de polígono definido para utilização de máscara.....	59
Figura 6.2 - Cálculo da Tendência Observada (TO) em um volume em movimento. Em (a) observa-se o volume sobre o ciclone no instante (t-1); em (b) o volume no instante (t+1) quando o ciclone se deslocou para leste. TO é calculado pela variação de energia nestes volumes em suas respectivas posições.....	62
Figura 6.3 - Evolução Temporal tendência da energia cinética para um sistema frontal, formado no litoral da América do Sul em 26-abr-2017. O volume de integração é sinalizado pelo	

poligono nas figuras 5.4, 5.4, 5.5 para 3 tempos distintos. Os termos apresentados são em (a) :EKL – Energia Cinética do Disturbio; em (b), DSD: Desenvolvimento corrente abaixo, BRC: termo baroclínico, BRTM termo barotrópico. (c) dkdt – Tendência da Energia Cinética, dkdti – Tendência da energia cinética pela derivada no tempo, res = resíduo.....64

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Listagem do script run_example01.sh.....	7
Tabela 2.2 – Listagem do script run_example01.sh para processamento paralelo com 3 processadores.....	11
Tabela 2.3 – Listagem do script qsub_example01.sh para submissão da energética utilizando PBS e aprun.....	12
Tabela 3.1 – Listagem parcial de um namelist do programa Energética.....	17
Tabela 3.2 _ Listagem parcial do um arquivo descritor (.ctl) do grads.....	20
Tabela 3.3 _ Listagem parcial de um namelist do programa Energética (Cont.2).....	20
Tabela 3.4 - Atributos não fornecidos porém necessários ao programa energética para acesso aos campos dos modelos.....	21
Tabela 4.1 – Siglas utilizadas para as variáveis do estado básico e nos arquivos outfile_B: (1) Siglas que dependem da convenção do modelo.....	35
Tabela 4.2– Tabela das variáveis dos arquivos de energia cinética do distúrbio por nível isobárico ou OUTFILE_L: Obs.: (*) siglas conforme adotado no modelo numérico.....	43
Tabela 5.1-Tabela das variáveis dos arquivos de energia cinética do distúrbio integrado verticalmente (OURFILE_E).....	48
Tabela 6.1 - Listagem parcial de um namelist do programa Energética (definição da máscara).....	57
Tabela 6.3 - Listagem parcial de um namelist do programa Energética (Configuração das saídas dos resultados da integração volumétrica).....	61
Tabela 6.4 - Exemplo de resultado da evolução temporal da energética integrada volumetricamente	63

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BRC	Conversão baroclínica
BRT	Conversão barotrópica
CEC	Convergência de energia cinética
CFA	Convergência do fluxo ageostrófico (O mesmo que DSD)
CKT	Calculated kinetic energy tendency (O mesmo que TC)
CPTEC	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
CTL	Arquivo descritor do Grads. Terminação que identifica este arquivo (.ctl)
DFD	Diagrama de fluxo de dados
DSD	Desenvolvimento corrente abaixo (Downstream development)
EKL	Energia cinética do distúrbio
EKM	Energia cinética do estado básico
FOK	Formulação de Orlanski e Katzfey
GRIB	GRIdded Binary – Formato de dados da OMM para dados em ponto de grade
HDF	Hierarchical Data Format
NETCDF	Network Common Data Form
OKT	Observed Kinetic energy tendency (O mesmo que TO)
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PBS	Portable Batch System
TC	Tendência da energia cinética calculada (O mesmo que CKT)
TO	Tendência da energia cinética observada(O mesmo que OKT)
VCAN	Vórtice ciclônico de altos níveis

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área (m ²)
A _z	Energia potencial disponível
A _e	Energia potencial do distúrbio
α	Volume específico
a	Raio da Terra
D _z	Dissipação de energia do estado básico
D _e	Dissipação de energia do distúrbio
ϕ	Geopotencial ou energia geopotencial
g	Aceleração da gravidade
K	Energia Cinética
m	Massa (kg)
P	Pressão atmosférica
R _d	Constante termodinâmica do ar seco
R _m	Razão de mistura do vapor d'água
T	Temperatura
t	Tempo
T _v	Temperatura virtual
u	Componente zonal do vento
v	Componente meridional do vento
w	Componente vertical do vento em coordenada métrica
ω	Componente vertical do vento em coordenada isobática
z	Altitude ou altura geopotencial

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	1
2 - INSTALAÇÃO E UTILIZAÇÃO COM DADOS DE TESTE.....	5
2.1 - Compilação em sistema LINUX/UNIX.....	5
2.2 - Utilizando os dados de teste.....	6
2.3 - Processamento paralelo em computadores comuns e servidores.....	11
2.4 Processamento paralelo em grandes computadores.....	12
3 - CONFIGURAÇÕES E UTILIZAÇÃO.....	15
3.1 - Processos e Fluxo de Dados.....	16
3.2 Configuração dos Arquivos de Entrada e saída.....	17
3.3 - Configuração das variáveis de leitura.....	19
3.4 - Configuração da grade e da integração vertical.....	21
3.5 - Configuração da Integração vertical.....	22
.....	23
3.6 - Pressão de Superfície e Máscara de Topografia.....	23
3.7 - Converter velocidade vertical.....	24
3.8 - Converter umidade relativa para razão de mistura.....	24
3.9 - Configuração do cálculo do Estado Básico e Filtros.....	25
3.10 - Configuração do cálculo por diferenças finitas.....	26
3.11 - Rodando o programa energética.....	27
4 - FORMULAÇÃO DA ENERGÉTICA E RESULTADOS POR NÍVEL.....	29
4.1 - Uma breve comparação entre as diferentes abordagens.....	29
4.2 - Revisão das equações básicas.....	32
4.3 - Energética do Estado Básico (outfile_B).....	33
4.4 - Energia do Distúrbio por Níveis (outfile_L).....	36
4.5 - Fluxos ageostrófico e fluxo de geopotencial.....	39
4.6 - Resumo e Visualização dos resultados.....	42
5 - INTEGRAÇÃO VERTICAL E RESULTADOS.....	45
5.1 - Formas de Integração vertical e unidades dos resultados.....	45
5.2 - Termo de correção de variação de massa.....	47
5.3 - Resumo dos resultados fornecidos.....	47
5.4 - Apresentação dos resultados.....	50
6 - ENERGÉTICA INTEGRADA NO VOLUME E RESÍDUO.....	56
6.1 - Configuração da Máscara para Integração.....	56
6.2 - Obtenção da evolução temporal dos termos.....	60
6.3 - Cálculo do resíduo.....	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
APÊNDICE A – PROCEDIMENTO DE INSTALAÇÃO DE DEPENDÊNCIAS.....	67

1 - INTRODUÇÃO

Conforme Lorenz (1954), a intensificação e dissipação de sistemas atmosféricos, tais como, os ciclones e anticiclones, são frequentemente avaliados em termos de ganho e perda da energia cinética que eles possuem, respectivamente. Assim sendo, fontes e sumidouros de energia, assim como as formas de transformações, são de grande importância nos estudos destes fenômenos. Partindo desta base, são realizados estudos de energética dos distúrbios, que procuram caracterizar as principais conversões de energia que ocorrem no desenvolvimento dos distúrbios atmosféricos.

Além da formulação de Lorenz (1954), existem várias outras formulações empregadas para determinação de energética, dentre elas a proposta no trabalho de Orlanski e Jatzfey (1991) que vem sendo referenciado em diversos estudos de energética, tais como, Gan e Rao (1999), Chang (2000), Piva et al. (2010), Ferreira (2013), Gan e Piva (2013).

Em comparação aos métodos convencionais de análise sinótica, o uso de análise energética, em especial a de Orlansk e Jatzfey (1991) possui a vantagem de permitir avaliar diretamente as principais conversões de energia envolvidas, tais como conversão baroclínica e barotrópica, convergência do fluxo ageostrófico, entre outras. Outra vantagem é incorporar os resultados das componentes energéticas de todas as camadas verticais da troposfera em resultados integrados verticalmente; dando assim, uma melhor visão dos sistemas meteorológicos, sem que haja a necessidade de analisar individualmente diversas camadas da atmosfera. Quando integrados em volume em torno do sistema meteorológico de interesse, obtém-se informações de como as conversões de energia evoluem ao longo do tempo, determinando a formação, intensificação e dissipação dos sistemas meteorológicos importantes. Desta forma obtém-se informações relevantes para melhor compreender os fenômenos de tempo e do clima.

Contudo, utilizar as equações de energética pode não ser uma tarefa fácil. Em ge-

ral, para fins de pesquisa com energética, desenvolve-se software específicos, que realizam os cálculos a partir de dados pós-processados de reanálises de um modelo numérico de previsão do tempo. Geralmente escreve-se rotinas para processar os cálculos em uma resolução especial e área geográfica de interesse. A dificuldade que se apresenta é de se obter um software que seja geral e que seja facilmente adaptável a vários modelos de previsão do tempo, facilitando assim o uso destas técnicas tanto para pesquisa quando para uso operacional.

Assim este documento apresenta a versão 1.9 do programa *Energetica-FOK* (**Energética** segundo a **F**ormulação de **O**rlanski e **K**atzfey (1991)), no qual calcula-se os termos da energia dos distúrbios e integra-se verticalmente. O software foi escrito em Fortran-90 com o objetivo ser configurado as saídas pós-processadas da maioria dos modelos. Contudo a presente versão permite apenas acesso a dados no formato binário do software Grads (Grid Analysis and Display System). Assim, caso os dados estejam em outros formatos tais como NETCDF, HDF ou GRIB, estes devem ser previamente convertidos para o formato do Grads antes de serem utilizados.

Os campos de entrada podem ter diferentes resoluções espaciais ou verticais; contudo as projeções aceitas são apenas as regulares: A grade regular em latitude e longitude, grade linear em metros ou quilômetros. A coordenada vertical é a isobárica.

Para as versões futuras, e visando principalmente a otimização do software para uso operacional, planeja-se uso de leitura no formato GRIB da OMM, assim como o uso de diferentes projeções e coordenadas verticais.

Este guia está organizado da seguinte forma: No capítulo 2 apresenta-se as principais características da presente versão do software, assim como as instruções iniciais de como instalar e compilar e rodá-lo para um caso de teste. No capítulo 3 é apresentada a estrutura do programa assim como a forma de configurá-los para rodar com campos de outros modelos. No capítulo 4 são apresentados conceitos básicos de energética, a formulação de Orlanski e Katzfey, assim como uma descrição dos resultados para o cálculo

da energética do distúrbio por nível. No capítulo 5 é tratado a integração vertical da energética visando a visualização e interpretação dos mesmos para todo o domínio do modelo. No capítulo 6 é visto como delimitar o domínio de estudo sobre fenômeno de interesse, criando resultados integrados em volume o que permite visualizar a evolução temporal dos termos de energia.

O uso do programa de forma operacional depende da estrutura computacional, estrutura de armazenamento do sistema a ser instalado. Desta forma, adaptações podem ser necessárias para adequar os programas ao modo operacional, sobretudo no caso de uso em tempo real. Contudo espera-se que este guia possa fornecer conhecimento básico para dar início a implementações operacionais. Dicas de “como fazer” e demais informações completares poderão estar em documentos específicos inclusos na distribuição do software visando a adaptação para diferentes modos de operação.

2 - INSTALAÇÃO E UTILIZAÇÃO COM DADOS DE TESTE

Após a obtenção do pacote de distribuição do software energética será necessário compilá-lo na plataforma do usuário, podendo esta ser LINUX ou WINDOS, desde que já tenha pre-instalados um compilador fortran 90 ou superior, tal como GFORTRAN, G95, IFORT. Também é recomendável ter os seguintes pacotes instalados. O software GrADS é necessário para visualizar os campos de entrada e os resultados do programa. O PYTHON com as bibliotecas MATPLOTLIB e NUMPY são úteis para visualizar resultados de evolução temporal da energética integrada no volume, mas outros visualizadores gráficos podem ser utilizados. Procedimentos básicos de instalação do GrADS e do PYTHON pode ser encontrado no Apêndice A.

2.1 - Compilação em sistema LINUX/UNIX

Para compilação no sistema LINUX, primeiro descompacte o pacote do software. Isto pode ser feito de várias formas. A linha de comando abaixo ilustra a descompactação com comando “tar”

```
tar -zxvf energetica_fok_v1.x.tar.gz
```

Após descompactação entre no diretório do programa energética (energetica_fok_v.1x), crie um diretório bin ou um link para o diretório bin do sistema. Em seguida, indique as diretivas de compilação que pretende utilizar. Por exemplo, para compilação usando as diretivas do gfortran deve-se criar um link do makefile_gfortran para o makefile_comp conforme instruções abaixo. Por último digite o comando make para dar inicial a compilação.

```
cd energetica_fok_v1.x
mkdir bin
ln -s makefile_gfortran makefile_comp
make
```

Isto deverá proceder a compilação completa do software com todos os módulos. O executável é gerado no diretório `energetica/bin`

Para sua conveniência é recomendável que copie o executável do diretório `bin` local para o diretório `bin` do seu sistema, ou inclua na variável de ambiente `$PATH` o caminho até o diretório “`bin`” local de forma que o programa possa ser acessado de qualquer diretório

Estão disponíveis diretivas para os compiladores `gfortran`, `g95`, `ifort` e `pgf90`. Caso o compilador de sua máquina seja diferente dos mencionados, edite qualquer um dos “`makefile`” e faça as modificações necessárias para usar o compilador de sua preferência. Dependendo do tipo de compilador é necessário incluir a opção de compilação “**`-assume byterecl`**”, para que, durante a execução, o programa acesse os dados binários de forma correta.

2.2 - Utilizando os dados de teste

Dentro da distribuição do software no diretório *example* existe um conjunto de scripts, um arquivo de configuração (*example01_namalist.nml*), assim como uma sequência de 4 horários de análises de um modelo global para testar o software (diretório `example/datain`). Como só são fornecidos um conjunto pequeno de horários, utilizou-se a opção de geração do estado básico por média zonal no *example01_namalist.nml*, o que pode ser mudado nos casos de se ter séries grandes de dados de modelos.

Para rodar a sequência completa basta rodar o scripts *run_example01.sh*. Este processará os 4 passos do programa que são:

1. Obtenção do Estado Básico
2. Cálculo da Energética Cinética dos Distúrbios
3. Obtenção da Máscara de Integração
4. Cálculo da Energética Integrada no volume

Cada um dos passos geram arquivos que são rodados nos passos seguintes, os quais são gravados no diretório *dataout* em formato do Grads. A Obtenção do estado básico (s=1) corresponde ao estado médio da atmosfera, sem os distúrbios. Calcula-se também os termos de energia cinética do estado básico. Estes resultados são utilizados no passo seguinte (S=2) para obtenção da energética dos distúrbios. Ambos passos (s=1 e s=2) são processados para todo o domínio do modelo. O passo (s=3) gera uma máscara para uma região de estudo. No caso do exemplo, é selecionado a área de ocorrência de um vórtice ciclônico de altos níveis (VCAN) sobre o Pacífico Sul. Esta máscara é utilizada para obter a evolução dos termos de energética no tempo, para este fenômeno específico.

A Tabela 2.1, apresenta a listagem do programa `run_example01.sh`

```
#!/bin/bash
#set -e
export OMP_STACKSIZE=1000m
export OMP_NUM_THREADS=1
ulimit -s unlimited
# *** Run Energeica ***
../bin/energetica -c example01_namalist.nml -s 1 -t 2003010100-2003010100-06
../bin/energetica -c example01_namalist.nml -s 2
../bin/energetica -c example01_namalist.nml -s 3
../bin/energetica -c example01_namalist.nml -s 4

# *** Generate maps ***
grads -lc "run generate_maps.gs"

# *** Generates time evolution graph ***
./EvolutionGraph.py example01_namelist.nml

# To see results open the figures .png and .svg in "dataout"
```

Tabela 2.1 – Listagem do script `run_example01.sh`

Os 4 comandos após “*** Run Energetica ***” correspondem a execução do programa `energetica` para cada um dos passos. O *script* utiliza o programa `Grads` para geração das figuras (mapas) e o programa em python para gerar os gráficos de evolução temporal dos termos de energia.

Para rodar o *script* basta acessar o diretório *example* através de linha de comando e digitar:

```
./run_example01.sh
```

Os principais resultados para passo 2 (que corresponde a energia do distúrbio propriamente dita) é apresentada na Figura 2.2. Nesta figura são apresentados os termos integrados da superfície a 100 hPa, assim como outros campos adicionais. São apresentados os termos integrados de: DSDi (Downstream Development) ou Desenvolvimento Corrente Abaixo ; BRC- Conversão Baroclínica; BRT- Conversão Barotrópica; EKL tendência da energia cinética do distúrbio. Campos adicionais como altura geopotencial em níveis específicos e fluxo ageostrófico estão também inclusos para auxiliar na interpretação dos resultados. Um polígono Vermelho é posicionado nas Figuras 2.1 (a,b,c,d) na posição do VCAN mencionado anteriormente. Este corresponde ao posicionamento da máscara criada no passo (s=3). No passo (s=4) os valores da energética integrada verticalmente são também integrados na área desta máscara, formado um volume de integração, com base na superfície e topo em 100 hPa, que contém o VCAN. Esta caixa é programada para mover-se no tempo acompanhando o deslocamento deste sistema meteorológico, gerando desta forma a variação temporal dos termos de energética apresentado na Figura 2.1

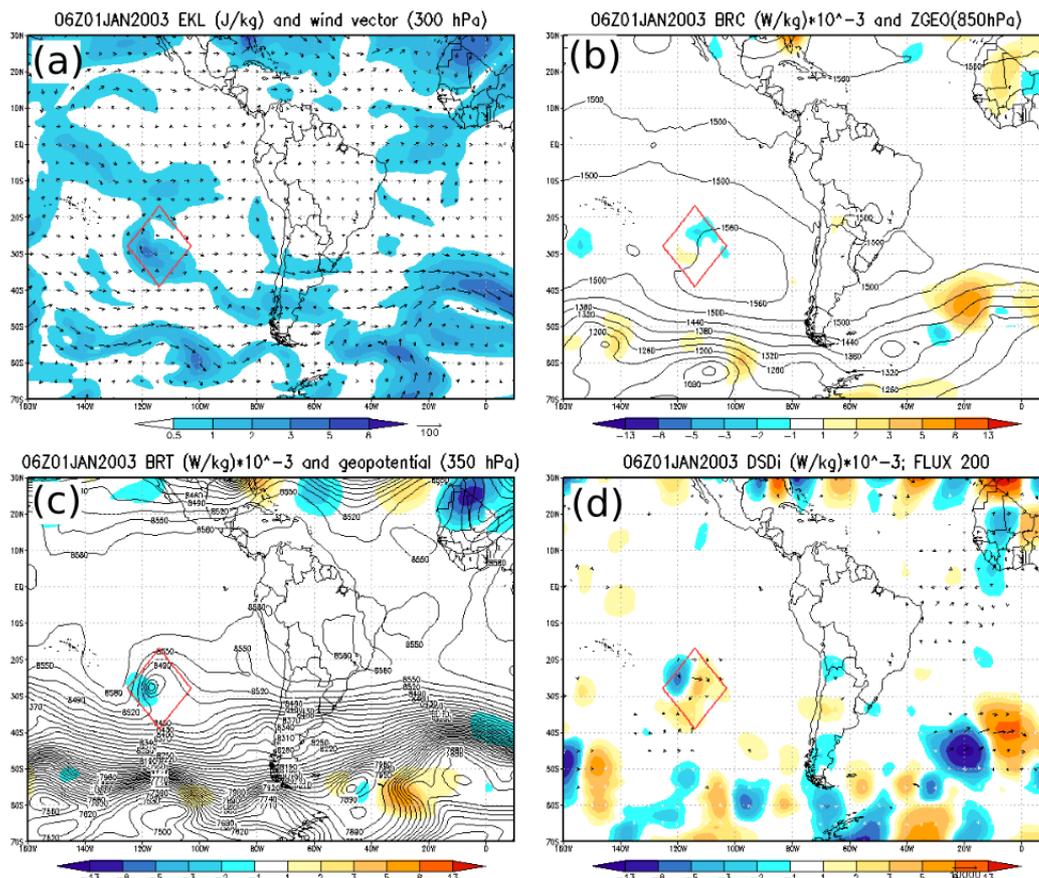


Figura 2.1 – Exemplo de termos da energética do distúrbio integrado da superfície a 100 hPa para o dia 01-jan-2003: a) EKL integrado (cores) e vento em 300 hPa; b) Termo BRC (cores) e altura geopotencial em 850 hPa; c) Termo BRT (Cores) e altura geopotencial em 350 hPa; c) Termo DSD (cores) e fluxo geostrófico (vetores) (200 hPa).

Na Figura 2.2 observa-se, portanto, a evolução temporal dos termos da energética durante 6 horas. Na Figura 2.2-a, observa-se redução da energia cinética do distúrbio, o que também pode ser constatado pelos valores negativos de tendência da energia cinética observada (OKT). Contudo os valores calculados da tendência da energia cinética (CKT) são positivos, o que em princípio indicaria ganho de energia cinética, ao invés da perder que é observada. Esta diferença entre OKT e CKT é computado como resíduo de cálculo (Res), o que, em partes, pode ser explicado pela ação das forças de atrito, não computadas nos cálculos de CKT. Na figura 2.2-b são o termo BRT mantém-se negativo, contribuindo portanto para redução da energia cinética e do CKT. O termo BRC também é negativo

no início, mas eleva-se no tempo seguinte chegando ao valor próximo a zero, o que em parte contribui para o aumento do CKT. O termo DSD é positivo durante todo o período, sendo portanto o termo que mais contribuiu neste caso para a manutenção do distúrbio e, também pelos valores positivos de CKT.

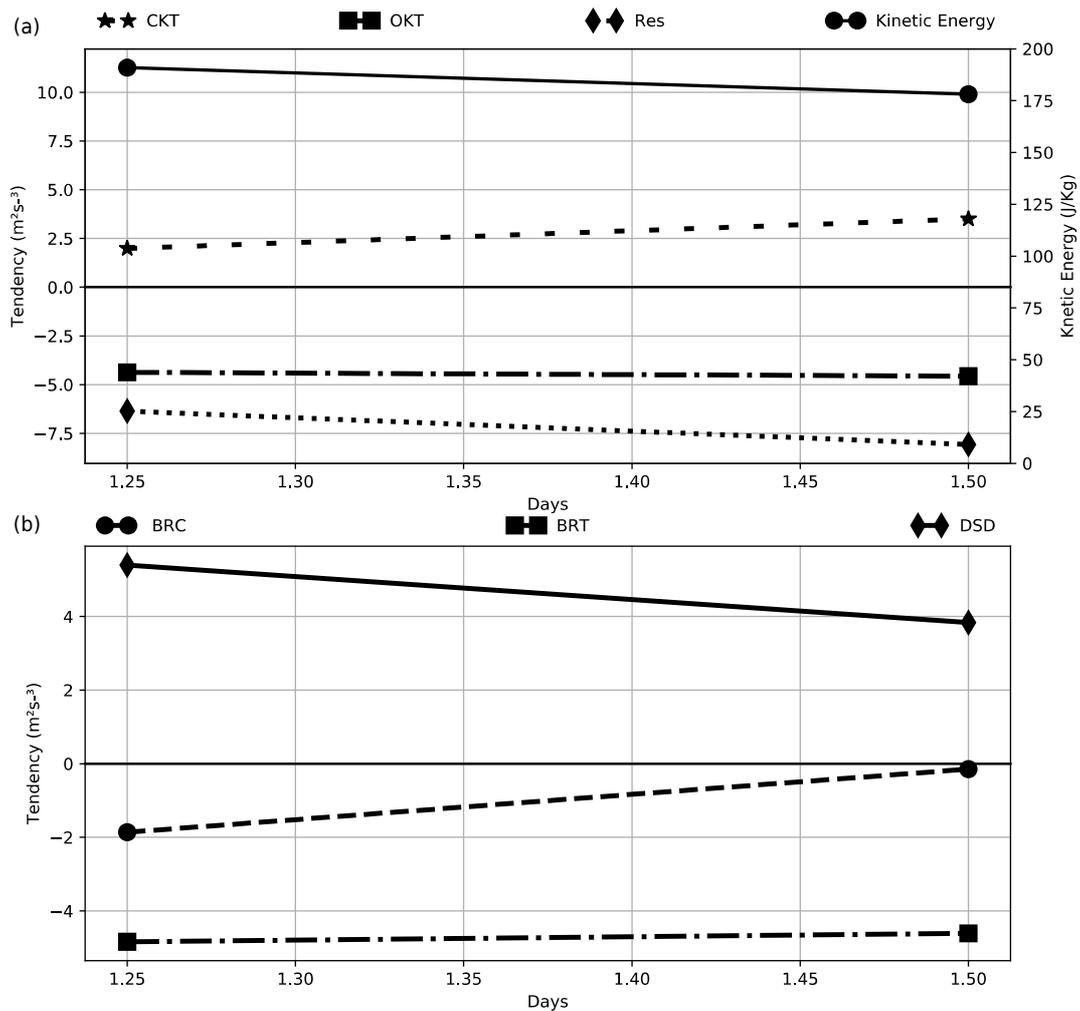


Figura 2.2 - Evolução Temporal da tendência da energia cinética para um evento de VCAN, formado no oceano pacífico em 01-jan-2003. O eixo do tempo está expresso em dias e frações de dias. Em (a) são apresentados: CKT-Tendência da energia cinética calculada; OKT – Tendência da energia cinética observada; Res-resíduo. Em (b): BRC – termo baroclínico; BRT – termo barotrópico; DSD – Desenvolvimento Corrente Abaixo.

2.3 - Processamento paralelo em computadores comuns e servidores

A presente versão está preparada para processamento paralelo com OpenMP (Open Multi-Processing), o que permite que o processamento das matrizes de dados seja realizada de forma compartilhada em vários processadores, ganhando assim maior velocidade de processamento e utilizando mais adequadamente a capacidade computacional da máquina. No caso do exemplo da tabela 2.1, o ambiente está configurando para usar apenas 3 núcleos de processamento: OMP_NUM_THREADS=3. Os PC atuais geralmente são “quad-core”, isto é, possui 4 núcleos de processamento. Neste caso, o computador irá este programa usando 3 processadores deixando 1 processador ocioso. A Tabela 2.2 mostra a listagem do **run_example01.sh**.

Tabela 2.2 – Listagem do script run_example01.sh para processamento paralelo com 3 processadores

```
#!/bin/bash
#set -e
export OMP_STACKSIZE=2000m
export OMP_NUM_THREADS=3
ulimit -s unlimited
# *** Run Energeica ***
../bin/energetica -c example01_namalist.nml -s 1 -v 0 -t 2003010100-2003010100-06
../bin/energetica -c example01_namalist.nml -s 2 -v 0
../bin/energetica -c example01_namalist.nml -s 3 -v 0
../bin/energetica -c example01_namalist.nml -s 4 -v 0

# *** Generate maps ***
grads -lc "run generate_maps.gs"

# *** Generates time evolution graph ***
./EvolutionGraph.py example01_namelist.nml
```

Antes de rodar, verifique o número de processadores e a memória de seu equipamento ajustando conforme o caso. Pode-se também configurar a memória alocada para cada núcleo de processamento. Isto é feito através da variável OMP_STACSIZE.

Note que o script acima é um arquivo de lote que pode ser rodado de forma interativa, diretamente no terminal de comando, ou de forma

automática, agendado a rodada através dos comandos “**crontab**” ou comando “**at**” do linux. Por exemplo, para rodar em modo “batch” na data presente digite: “**at -f run_examp101.sh now**”.

2.4 Processamento paralelo em grandes computadores

No caso de grandes computadores e supercomputadores, onde utiliza-se o sistema PBS (Portable Batch System) e o comando `aprun` para submeter processos paralelos, a configuração pode ficar um pouco diferente. Contudo a ideia é basicamente a mesma no que concerne a utilização de memória e de processamento, ou seja. Sabendo-se quais são os recursos da máquina, ajusta-se o script para adequar ao número de processadores. Por exemplo, no caso do atual supercomputador do CPTEC/INPE, este possui 1280 nós com 24 núcleos e 32 GB de memória em cada nó. A versão atual do programa energética está paralelizada apenas com OpenMP, o que limita a utilização de apenas 1 nó de processamento. Assim, mesmo que o supercomputador tenha um número de núcleos muito maior, os núcleos que podem ser utilizados para processamento paralelo são apenas os núcleos de um único nó, isto é, no caso do supercomputador do CPTEC são no máximo 24 processadores com 32 GB de memória.

Como exemplo, na tabela 2.3 é mostrado a listagem do script `qsub_example01.sh`.

Tabela 2.3 – Listagem do script `qsub_example01.sh` para submissão da energética utilizando PBS e `aprun`

```
#!/bin/bash
#
#PBS -o /scratchin/grupos/das/home/sergio.ferreira/example
#PBS -e /scratchin/grupos/das/home/sergio.ferreira/example
#PBS -l walltime=0:10:00
#PBS -l mppwidth=24
#PBS -V
#PBS -S /bin/bash
#PBS -N example01
#PBS -q pesq
#PBS -A CPTEC
```

```

export ATP_ENABLED=1
export OMP_STACKSIZE=2000m
export OMP_NUM_THREADS=24
echo 'PBS_O_WORKDIR='$PBS_O_WORKDIR
mkdir -p $PBS_O_WORKDIR/dataout/gif
cd $PBS_O_WORKDIR
BINDIR=./bin
echo 'BINDIR='$BINDIR

aprun -d 24 $BINDIR/energetica -c $PBS_O_WORKDIR/example01_namelist.nml -s 1 -t
2003010100-2003010100-06
aprun -d 24 $BINDIR/energetica -c $PBS_O_WORKDIR/example01_namelist.nml -s 2
$BINDIR/energetica -c $PBS_O_WORKDIR/example01_namelist.nml -s 3
$BINDIR/energetica -c $PBS_O_WORKDIR/example01_namelist.nml -s 4

```

Para submeter o script `qsub_example01.sh` basta digitar **qsub qsub_example01.sh**. Note que o script está preparado para rodar com 24 processadores. Isto é feito tanto na configuração do parâmetro “**PBS -I mppwidth=24**”, quanto no “**aprun -d 24**”. Os passos 3 e 4 da energética não são submetidos através do aprun pois estes passos não são paralelizados. Os comandos para realizar os gráficos utilizando grads e python não estão inclusos no `qsub_example01.sh`, mas podem ser rodados à parte.

Uma vez instalado o programa e obtidos estes resultados, pode-se concluir que o programa foi instalado corretamente no computador. Caso haja problemas na instalação aconselha-se verificar os erros reportados e buscar a solução apropriada em cada caso. Uma boa estratégia é examinar os scripts `run_example01.sh` e o `example01_namelist.nml`.

Após realizada esta parte, o próximo passo é adaptar o programa para o caso real, para rodar com os dados dos modelos desejados, o que pode se visto nos próximos capítulos.

3 - CONFIGURAÇÕES E UTILIZAÇÃO

Tendo-se o programa previamente compilado e testado no computador conforme capítulo anterior, e selecionado um conjunto de dados de modelos para os quais se deseja processar a energética, o próximo passo é configurar o programa energética, para processar adequadamente e gerar os resultados desejados. Portando, este capítulo tem como objetivo auxiliar nesta configuração. Para melhor entendimento recomenda-

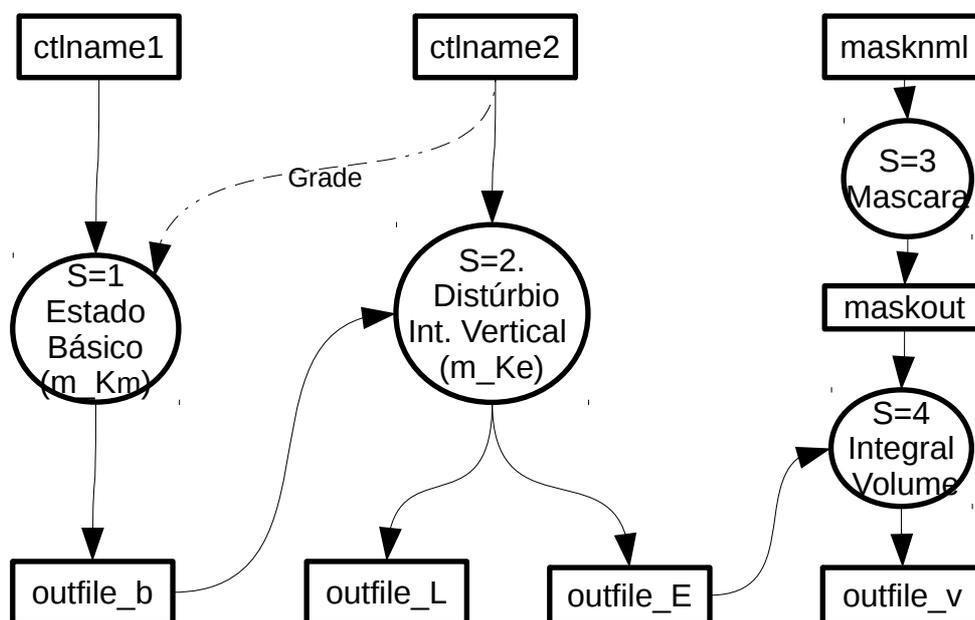


Figura 3.1 - Diagrama de fluxo de dados do software Energética-FOK

mos copiar o arquivo de namelist (*example01_namelist.nml*), que está na pasta *example*, para outro local ou/e outro nome. Por exemplo, para ***my_namelist.nml***. Assim poderá editá-lo e testá-lo com configurações diferentes.

Neste capítulo, também é apresentada uma visão geral dos processos executados pelo programa energética, do fluxo de dados de entrada e saída e dos demais parâmetros que são configurados no namelist.

3.1 - Processos e Fluxo de Dados

O diagrama de fluxo de dados (DFD), apresentado na Figura 3.1 mostra cada um dos 4 processos ou passos de execução e seus respectivos arquivos de entrada e/ou saída.

Note que o formato de dados do *Grads* utiliza um corpo binário simples, baseado em sequências de números reais de 4 bytes, sem qualquer informação interna de como estes dados estão estruturados. Desta forma é utilizado um arquivo descritor (".ctl"), que corresponde a um arquivo "texto" que contém informações sobre a estrutura do arquivo binário de dados ou arquivo ".bin"

Por uma questão de simplicidade, no DFD da Figura 3.1, utiliza-se setas com linhas cheias para representar leitura ou gravação de ambos os arquivos (.bin e .ctl) e linha tracejada para representar os casos onde apenas informações do ".ctl" são lidas.

Desta forma, observa-se que no processo S=1 (passo 1) são necessários arquivos indicados por **ctlname1** e **ctlname2**. A seta com linha cheia que conecta o **ctlname1** ao processo s=1, indica que tanto o arquivo ".ctl" quanto o arquivo ".bin" correspondente são lidos e processados. A seta com linha tracejada, que liga o **ctlname2** ao mesmo processo, indica que apenas parte da informação do ".ctl" é passada. Os resultados são então gravados em arquivos indicados por **outfile_B** (tanto o ".bin" quanto o ".ctl")

O processo S=2 é representado a principal parte do cálculo da energética. Este depende do estado básico (**outfile_B**), previamente calculado assim como o arquivo indicado por **ctlname2**. A partir das diferenças entre o estado básico e o arquivo **ctlname2** são feitos os cálculos dos termos da equação da tendência da energia cinética do distúrbio (Ke'), que em seguida são gravados

em **outfile_L** e **outfile_E**. Estes correspondem respectivamente aos resultados da energética por nível isobárico e resultados verticalmente integrados.

Os processos seguintes (S=3 e S=4) são opcionais e só são utilizados, nos casos em que se deseja fazer uma análise da enética específica para um determinado sistema meteorológico. Voltaremos a tratar destes processos mais adiante. Continuaremos então com as configurações dos processos S=1 e S=2, que são essenciais para a execução do programa.

3.2 Configuração dos Arquivos de Entrada e saída

Ao abrir o namelist, por exemplo o *my_namelist.nml*, encontra-se logo no início as informações apresentadas na Tabela 3.1 (excluindo-se as linhas de comentário)

Tabela 3.1 – Listagem parcial de um namelist do programa Energética

```
&geral
version=1.9,
/
&energy
ctlname1='./datain/pgbanl.2003010100_template.ctl',
ctlname2='./datain/pgbanl.2003010100_template.ctl',
outfile_B='./dataout/pgbanl_MeanFlow%y4%m2%d2%h2',
outfile_L='./dataout/pgbanl_EddyKineticEnergy%y4%m2%d2%h2',
outfile_E='./dataout/pgbanl_VerticalIntegration%y4%m2%d2%h2',
```

Note que o namelist é subdividido em várias seções. A primeira é o “**\$general**”, que é relativo à versão do modelo do *namelist*. A presente versão do programa Energética utiliza o modelo 1.9, portanto não se deve modificar o número desta versão.

O segundo conjunto é denominado “**&energy**” e contém as configurações de funcionamento dos módulos de energia do estado básico (m_km) e da energia do distúrbio (m_ke). As variáveis **ctlname1**, **ctlname2**, **outfile_B**,

outfile_L e **outfile_E** devem ser configuradas com o nome dos respectivos arquivos necessários aos processos apresentados no DFD da Figura 3.1

Note que pode ser utilizada uma notação de data e hora para a formação do nome dos arquivos. Esta notação é formada pelos seguintes símbolos.

- %y4 = ano com 4 dígitos
- %m2 = mês com 2 dígitos
- %d2 = dia com 2 dígitos
- %h2 = hora com 2 dígitos

Utilizando esta notação, o programa realizará o acesso aos arquivos conforme as suas respectivas datas e horas, sem a necessidade de modificação das configurações dos nomes dos arquivos no *namelist*.

No caso dos arquivos de entrada, fornece-se somente o “nome” do arquivo “.ctl”. O programa procederá a leitura do “.ctl” e em seguida a leitura dos arquivos “.bin” correspondentes.

No caso dos arquivos de saída, deve-se omitir a terminação “.ctl”, pois as terminações “.bin” e “.ctl” serão completadas automaticamente pelo programa.

Existem uma outra possibilidade de configuração, sobretudo para os arquivos de entrada. Pode-se, por exemplo, utilizar arquivos “.ctl” do tipo “template”, tal como apresentado na Tabela 3.2. Esta tabela apresenta uma listagem parcial do arquivo *pgbanl.20030101d_template.ctl* que vem no diretório *example*. Note que a informação em DSET já corresponde a formação do nome do arquivo binário com base na data (usando a notação %y4,%m2, etc). A declaração “OPTIONS template” indica tanto ao *Grads* quanto ao programa *Energética*, para acessar múltiplos arquivos binários, cujo nome segue o modelo apresentado. Assim, uma vez que já existe a notação de data e hora dentro do “.ctl”, não é preciso mais utilizar esta notação para formação dos nomes em **ctlname1** e/ou **ctlname2**. Basta utilizar o nome real dos arquivos.

3.3 - Configuração das variáveis de leitura

Uma das virtudes do formato binário do Grads é sua simplicidade, o que o torna um formato bastante utilizado no meio da pesquisa em meteorologia. Uma das suas principais deficiências é a falta de padronização dos nomes/siglas das variáveis, unidades de medidas, entre outras informações pertinentes. Isto torna necessário a passagem das informações que faltam dentro do arquivo “.ctl” para o programa *Energética* o que é feito através do namelist.

Assim, antes de partir para configuração do programa *Energética*, é recomendado abrir os arquivos “.ctl” e verificar atentamente as variáveis que serão necessárias, suas respectivas siglas/abreviações e unidades de medida. A inserção incorreta destes parâmetros na configuração do programa *Energética* poderá fazer com que o programa não funcione ou funcione mas com erros nos resultados.

Para ajudar a esclarecer esta configuração, recomendamos verificar novamente o arquivo *pgbanl.20030101d_template.ctl* da Tabela 3.2.

Para visualizar todas as 116 variáveis é necessário abrir o arquivo *pgbanl.20030101d_template.ctl* com editor de sua preferência. Do total das 116 variáveis contidas no modelo, somente 8 variáveis são necessárias ao programa *Energética*. São estas

- Topografia (altura do relevo em metros)
- pressão à superfície (em Pa)
- Pressão do nível isobárico (em Pa)
- Temperatura do ar (K)
- Umidade específica ou razão de mistura (kg/kg)
- Componente zonal do vento (m/s)
- Componente meridional do vento (m/s)
- Vento vertical (m/s) ou Omega (Pa/s)

Tabela 3.2 _ Listagem parcial do um arquivo descritor (.ctl) do grads

```

DSET      ^%d2/pgban1.%y4%m2%d2%h2.bin
TITLE     Sample Data Set
OPTIONS   template
UNDEF     9.9990003E+20
XDEF      360 LINEAR 0 1
YDEF      181 LINEAR -90 1
ZDEF      31 LEVELS 1000 975 950 925 900 850 800 750 700 650 600 550 500 450 400 350 300
250 200 150 100 70 50 30 20 10 7 5 3 2 1
TDEF      4 LINEAR 00Z01JAN2003 6HR
VARS      116
no4LFTXs  0 0 132 1 0 ** surface Best (4-layer) lifted index [K]
no5WAVAp  0 0 230 100 500 ** 5-wave geopot. height anomaly [gpm]
no5WAVHp  0 0 222 100 500 ** 5-wave geopotential height [gpm]
ABSVprs   31 0 41 100 0 ** Absolute vorticity [/s]
CAPEsfc   0 0 157 1 0 ** surface Convective Avail. Pot. Energy [J/kg]
CAPE180_  0 0 157 116 46080 ** 180-0 mb above gnd Convective Avail. Pot. Energy [J/kg]
CINsfc    0 0 156 1 0 ** surface Convective inhibition [J/kg]
CIN180_0  0 0 156 116 46080 ** 180-0 mb above gnd Convective inhibition [J/kg]
CLWMrprs  21 0 153 100 0 ** Cloud water [kg/kg]
CWATclm   0 0 76 200 0 ** atmos column Cloud water [kg/m^2]
GPAprs    2 0 27 100 0 ** Geopotential height anomaly [gpm]
topo      0 0 7 1 0 ** surface Geopotential height [gpm]
(continua)

```

Uma vez que não há uma padronização que identifique estas variáveis, assim como não há uma padronização para as unidades das mesmas, é necessário localizá-las no “.ctl” e informá-las no namelist, conforme sequências mostrada no namelist de exemplo, listado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 _ Listagem parcial de um namelist do programa Energética (Cont.2)

```

!-----
! Codes= Sigla      | A | B | Comentários
!-----
codes= 'topo'      , '1', '0', !Topografia (m)
      'pressfc'   , '1', '0', !Pressao a Suferficie (Pa)
      'HGTprs'    , '1', '0', !Altura Geopotencial (m)
      'press'     , 100', '0', !Pressao -Nível Isobarico (Pa)
      'TMPprs'    , '1', '0', !Temperatura do Ar (K)
      'SPFHprs'   , '1', '0', !Umidade específica ou Razão de Mistura
      'UGRDprs'   , '1', '0', !Vento zonal (m/s)
      'VGRDprs'   , '1', '0', !Vento meridional (m/s)
      'VVELprs'   , '1', '0', !Vento vertical (m/s) ou Omega (Pa/s)
/
!}

```

Nesta parte do namelist é necessário fornecer na primeira coluna, as siglas das

variáveis, como estão representadas no “.ctl”. Nas colunas A e B insere-se os coeficientes de conversão de unidades. Estes coeficientes são utilizados pelo programa energética durante a leitura dos arquivos, sendo aplicado a cada uma das variáveis lidas a transformação linear dada pela equação 3.1

$$y = Ax + B \quad (3.1)$$

Onde Y é o valor convertido, X é o valor de lido no arquivo original, A e B são os coeficientes fornecidos para conversão. No exemplo acima, quase todos os valores lidos estão sendo multiplicados por 1 e somados a zero, permanecendo portanto inalterados. A exceção é a variável “*press*”, que está sendo multiplicado por 100. Isto foi feito para converter os valores de pressão do nível isobárico (indicados em ZDEF), que estão em hPa para valores de pressão em Pa, ajustando-se desta forma a unidade. Se por exemplo, a temperatura do ar estivesse em Graus Célsius, seria necessário somar 273.16 para converter para Kelvin. Assim, precisaria ser incluído na coluna B o valor 273.16 para proceder a conversão.

3.4 - Configuração da grade e da integração vertical

A maior parte das informações da grade dos dados do modelo já são fornecidas no arquivo CTL. São fornecidos parâmetros tais como XDEF, YDEF e ZDEF, que definem a grade horizontal e vertical. Por outro lado, existem algumas informações que o programa energética necessita e não podem ser lidas diretamente do CTL. Os parâmetros são listados na Tabela 3.4

Tabela 3.4 - Atributos não fornecidos porém necessários ao programa energética para acesso aos campos dos modelos

MTYPE	Tipo de Modelo/Domínio. É utilizado para ajustar os cálculos das derivadas por diferenças finas nas bordas dos domínios. Para isto são fornecidos os seguintes valores:
-------	---

	0 = Modelo/Domínio Global 1 = Modelo/Domínio Regional ou de área limitada;
HCOORDS	Tipo de coordenadas da grade horizontal. É utilizado para determinar se é necessário o cálculo do tamanho do ponto de grade nas direções X e Y em metros. 1 = Grade em coordenadas de Latitude e Longitude. 2 = Grade regular em metros.
ZCOORDS	Tipo de coordenada vertical. Atualmente só é possível a coordenada isobárica. Neste caso ZCOORDS=2
vcoords_from_ctl	Se .true . Indica que a coordenada vertical vem no arquivo ".ctl". Se .false . A coordenada vertical é fornecida no arquivo binário.

3.5 - Configuração da Integração vertical

A integração vertical da energética pode ser feita para qualquer camada, sendo em geral feita da superfície até o nível de 100 hPa. Para realizar a configuração da camada de integração edite as variáveis K1 e K2 que representam respectivamente os níveis iniciais e finais. É necessário verificar nos arquivos de entrada quais são os índices que correspondem aos níveis isobáricos desejados. No exemplo, estes estão configurados do nível K1 = 1 (primeiro nível), K2= 21 (Nível 21 – Nível de 100 hPa no caso deste exemplo).

3.6 - Pressão de Superfície e Máscara de Topografia

Em geral, os resultados pós processados dos modelos apresentam resultados extrapolados abaixo do relevo. Estes resultados não devem ser considerados na integração vertical da energética. O programa faz automaticamente a remoção destes dados para realização dos cálculos, preferencialmente a partir dos dados da pressão de superfície. Nos pontos de grade, onde a pressão de superfície é menor que o nível vertical do modelo, os valores dos campos são eliminados (preenchidos com valor

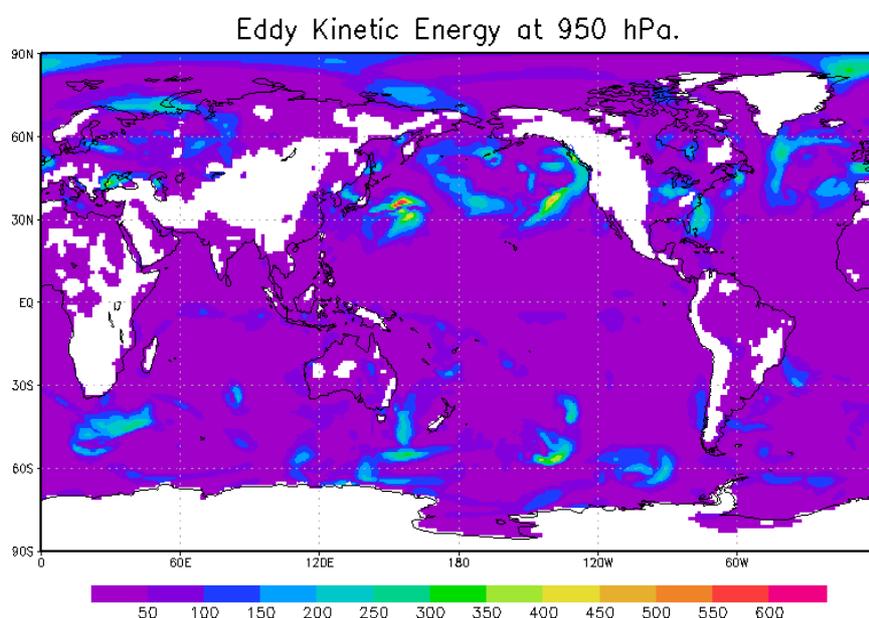


Figura 3.2 - Eddy Kinetic Energy Tendece at 950 hPa (m^2/s^2) “missing”) e não são computados nos cálculos de integração vertical. Caso o modelo não tenha a pressão de superfície, o programa tem opções para utilizar a altura geopotencial da superfície ou topografia para estimar a pressão de superfície e realizar o corte. A Figura 3.1 apresenta o resultado da tendência da energia cinética (m^2/s^2) para o nível 950 hPa. As partes em branco correspondem aos valores eliminados, devido ao nível de 950 hPa está sob o nível de superfície, ou seja, pressão de superfície menor que 950 hPa.

Para configurar a forma como o programa processará a máscara de to-

pografia, configure a variável Tk no namelist. Utilize Tk = 1 para usar a pressão de superfície existente . Utilize Tk=2 para calcular a pressão de superfície a partir da topografia.

3.7 - Converter velocidade vertical

O programa “espera ler” a componente vertical do vento em coordenadas de pressão. Caso a componente vertical esteja em coordenadas métricas basta modificar os parâmetros wo1 e wo2 do namelist de “.false.” para “.true.” Desta forma o programa realizará a conversão utilizando a Equação 3.2

$$\omega = w p \frac{-g}{R_d T_v} \quad (3.2)$$

Onde ω é a componente vertical em ‘Pa/s’, w a componente vertical em ‘m/s’, p a pressão atmosférica em Pa no respectivo nível isobárico, g é a aceleração da gravidade ($9,8 \text{ ms}^{-2}$), R_d é constante do ar seco (287.05) e T_v a temperatura virtual calculada em função da temperatura do ar (T) e da razão de mistura (Rm) conforme Equação 3.3

$$T_v = T(1 + 0.60 * Rm) \quad (3.3)$$

3.8 - Converter umidade relativa para razão de mistura

A umidade do ar é utilizada para correção do cálculo do volume específico utilizado nas equações de energética. O programa espera receber a informação de umidade na forma de razão de mistura adimensional (Rm) . Caso o modelo forneça umidade relativa do ar (Ur) pode-se ativar o processamento da conversão de Ur para Rm modificando “.true.” as variáveis rh1 e rh2, ativando assim o processamento da Ur tanto no caso do estado básico quanto

na energética do distúrbio. A conversão será feita utilizando as equações 3.4-a e 3.4-b

$$e = e_s(T) \cdot \frac{Rh}{100} \quad (3.4-a)$$

$$Rm = \frac{0.622 \cdot e}{P - e} \quad (3.4-b)$$

Onde “*e*” é a *tensão do vapor existente*, $e_s(T)$ e a *tensão máxima do vapor d`água a uma data temperatura (T)*, *Rh* é a *umidade relativa em %*, *P* a *pressão atmosférica* e *Rm* a *razão de mistura (adimensional)*

3.9 - Configuração do cálculo do Estado Básico e Filtros

O cálculo do estado básico, vem do conceito de que os escoamentos atmosféricos podem ser divididos em escoamento médio e flutuações desde escoamento, sendo estes chamados respectivamente de estado básico e distúrbio. O Método clássico de obtenção do estado básico, assim como as equações da energia do estado básico são realizados a partir da média de Reynolds (Calculado como média temporal dos campos numéricos) geralmente calculados para períodos longos superiores a 30 dias. Nos casos de dados de modelos globais de previsão de tempo, uma vez que os principais distúrbios transientes propagam-se zonalmente, pode-se obter o estado básico de forma alternativa através da média zonal. A média zonal é computacionalmente mais rápida de se processar e não consome espaço em disco para o armazenamento de grandes períodos de dados. Porém, deve-se ter cuidado ao analisar os resultados porque a equação da tendência da energia cinética foi determinada usando o método temporal para definir o estado básico. De qualquer forma, o programa oferece as duas opções para o cálculo do estado básico.

Para isto, no namelist “&filtro”, configure a variável “Temporal_mean” .

- `Temporal_mean = 0`: Utiliza média zonal.
- `Temporal_mean = 1`: Utiliza média no tempo.

Além da opção de escolha da média de filtro, existe a opção `grid_filter`. Esta opção é útil quando a energética é aplicada aos modelos de resolução altas, pois os resultados passam a conter energética de ondas muito curtas, sendo que, em geral, se objetiva a análise de ondas de escala sinótica. A opção `grid_filter` ativa uma suavização por média em torno dos pontos de grade, isto é, para cada ponto de grade do modelo, processa-se uma média que inclui os pontos de grade ao redor e aplica-se ao ponto de grade central.

- `grid_filter=0`: Nenhuma filtragem é aplicada
- `grid_filter=1`: Média na grade de 3 x 3 pontos
- `grid_filter=2`: Média na grade de 5 x 5 pontos
- `grid_filter=3`: Média na grade de 7 x 7 pontos
- `grid_filter=n`: Média na grade de $(2n+1) \times (2n+1)$ pontos

Nesta grade, é realizado uma média ponderada dos pontos, onde o ponto central tem o maior peso, e os pontos ao redor têm pesos definidos pelo inverso da distância do ponto adjacente ao ponto central. O resultado é atribuído ao ponto central. O processo se repete para cada ponto de grade do modelo, suavizando portanto o resultado sobre todos o domínio. Quanto maior for o valor de “n” maior a área considerada, e portanto maior a suavização dos campos.

3.10 - Configuração do cálculo por diferenças finitas

Os termos de equação da energética é processada por diferenças finitas. Através da *namelist* “&mcalculos” configura-se as sub-rotinas de cálculo de diferenças finitas contidas no modulo `mcalculos.f90`, que implementa esta parte. Configurando-se `ordem=2`, configura-se para processar diferenças finitas com ordem 2.

3.11 - Rodando o programa energética

Uma vez configurado corretamente o *namelist*, o programa energética pode ser rodado de forma simples, por exemplo, utilizando-se os mesmos comandos demonstrados no item 2.3 ou 2.4. Note que, no exemplo do capítulo 2 (Figura 2.1) pode-se rodar o programa passando-se o período através do parâmetro “-t” seguido da “data inicial”, “data final” e o “passo de tempo”, conforme mostra exemplo abaixo.

```
energética -c My_Namelist.nml -s 1 -t 2017010100-2017013100-06
```

Neste exemplo foi utilizado o período que vai de 01/01/2017 as 00Z ate 31/01/2017 as 00Z com dados a cada 6 horas, isto é, 4 saídas de modelo por dia, totalizando $4 \times 30 = 120$ tempos ou 120 arquivos de modelos para o processamento do estado básico ($s=1$). O resultado deste exemplo é um único arquivo que contém o estado básico para todo o período selecionado. Obviamente, que para este comando funcione, é necessário que os arquivos de entrada correspondentes aos respectivos horários existam e que estejam organizados conforme informado no arquivo “.ctl” ou no *namelist*.

Para rodar a energética do distúrbio o processamento é bem similar, conforme exemplo abaixo.

```
energética -c My_Namelist.nml -s 2 -t 2017011400-2017011618-06
```

Neste exemplo, a opção ($s=2$) indica o processamento da energética do distúrbio, Note que o período de tempo foi mudado. Passou-se a usar um período menor entre o dia 14/01/2017 as 00Z a 16/01/2017 18Z, totalizando o período de 3 dias, com 4 arquivos por dia, ou seja, 12 tempos, ou 12 arquivos. Também são gerados 12 arquivos de energética do distúrbio, um para cada tempo.

Note que o ideal é adotar um período para o cálculo do distúrbio que esteja contido dentro do período do estado básico. Contudo, esta configuração

fica a critério do usuário, podendo-se utilizar qualquer período que se achar conveniente para o estado básico e para o distúrbio. Para que funcione de forma desejada, precisa-se apenas ter cuidado com o nome dos arquivos adotados.

Para facilitar a rodada da energética do distúrbio com estado básico com média no tempo, o ideal é não usar os símbolos %y4%m2%d2%h2 no nome dos arquivos de saída do estado básico. Isto fixa a leitura e escrita no nome do arquivo do estado básico, evitando confundir o período do cálculo do estado básico com o período usado para o cálculo do distúrbio. Por outro lado, no caso do estado básico com média zonal, o ideal é fazer o oposto, isto é, manter os símbolos %y4%m2%d2%h2, de forma que para cada data e hora seja gerado um estado básico com media zonal.

4 - FORMULAÇÃO DA ENERGÉTICA E RESULTADOS POR NÍVEL

Conforme introdução deste documento, este programa implementa a formulação apresentada por Orlandi e Katzfey (1991), mas especificamente da energia cinética do distúrbio. Contudo existe um conjunto grande de variáveis que são geradas, que podem ser visualizadas diretamente, ou combinadas para obter gráficos e mapas desejados. É importante interpretar corretamente cada uma das variáveis apresentadas. Assim, este capítulo tem o objetivo de apresentar as equações utilizadas e a forma como os resultados são apresentados, destacando-se a convenção de siglas e abreviaturas utilizadas e as respectivas variáveis e equações utilizadas, assim como auxiliando nas possíveis interpretações dos resultados

4.1 - Uma breve comparação entre as diferentes abordagens

Lorenz (1954) introduziu o conceito de energia potencial disponível para a atmosfera, e definiu algumas propriedades, a saber: 1) a soma da energia potencial e a energia cinética é conservada em um escoamento adiabático; 2) a energia potencial disponível é determinada pela distribuição de massa; 3) A energia potencial disponível é zero no caso de uma atmosfera horizontalmente estratificada e estaticamente estável. Tanto a energia potencial disponível quanto a energia cinética podem ser separadas em duas formas de energia, a do estado básico, que segundo Lorenz pode ser obtida pela média zonal das energias e a do distúrbio. Muenh (1965) descreve esquematicamente o ciclo de energia de Lorenz, conforme Figura 4.1.

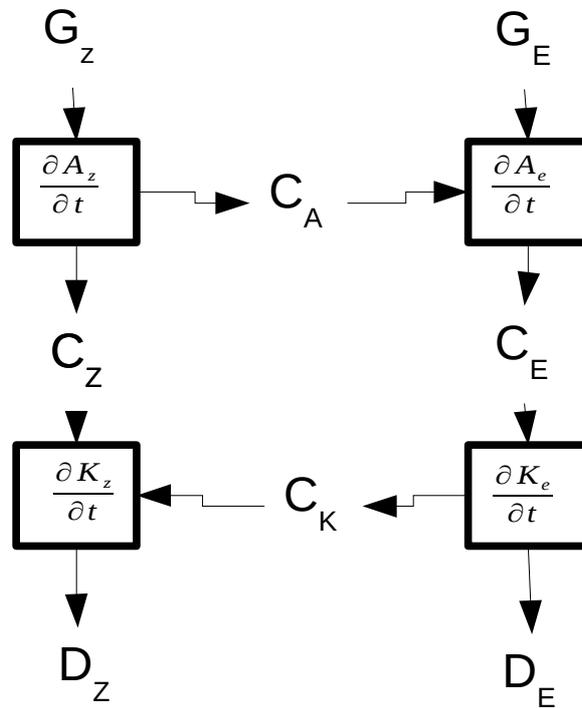


Figura 4.1 : Esquema de fluxos de energia baseados em Lorenz.

Na Figura 4.1, C_A representa conversão de energia potencial disponível do estado básico (A_z) para energia potencial da perturbação (A_e), C_z conversão de A_z para energia cinética do estado básico (K_z), C_e conversão de A_e para energia cinética da perturbação (K_e) e C_K conversão de K_e para K_z , os G_z e G_e gerações de energia potencial disponível do estado básico e do distúrbio, respectivamente e D_z e D_e correspondem às dissipações pelas forças de fricção.

Na formulação de Orlansk e Katzfey (1991) o estado básico é calculado através da média temporal e não na média zonal, onde é adotado um período de 30 dias para o cálculo das médias. Os principais resultados são representados esquematicamente na Figura 4.2 e correspondem ao termo de conversão baroclínica (BRC) que converte A_e em K_e . O termo barotrópico (BRT),

que corresponde a conversão de K_e em K_z e o termo de Convergência do Fluxo Ageostrófico (CFA). Este último, que não havia no trabalho inicial de Lorenz, é importante para estudos regionais onde é preciso considerar os fluxos laterais da área de estudo. Este está associado à natureza dispersiva das ondas e é também referido como convergência do fluxo radiativo a fim de enfatizar a natureza não-advectiva do fluxo. Este termo representa a energia que se propaga, através dos fluxos ageostróficos, a partir de um centro de energia cinética para outros centros corrente abaixo ou corrente acima, mas a maior parte da energia propaga corrente abaixo, motivo pelo qual também é chamado de termo de Desenvolvimento Corrente a Baixo (Downstream Development - DSD). Assim, quando há convergência do fluxo ageostrófico significa que energia cinética é importada para o centro de energia, contribuindo para intensificação do sistema meteorológico associado a esse centro de energia. Quando há divergência desse fluxo a energia cinética é exportada para fora do centro de energia, enfraquecendo então o sistema meteorológico.

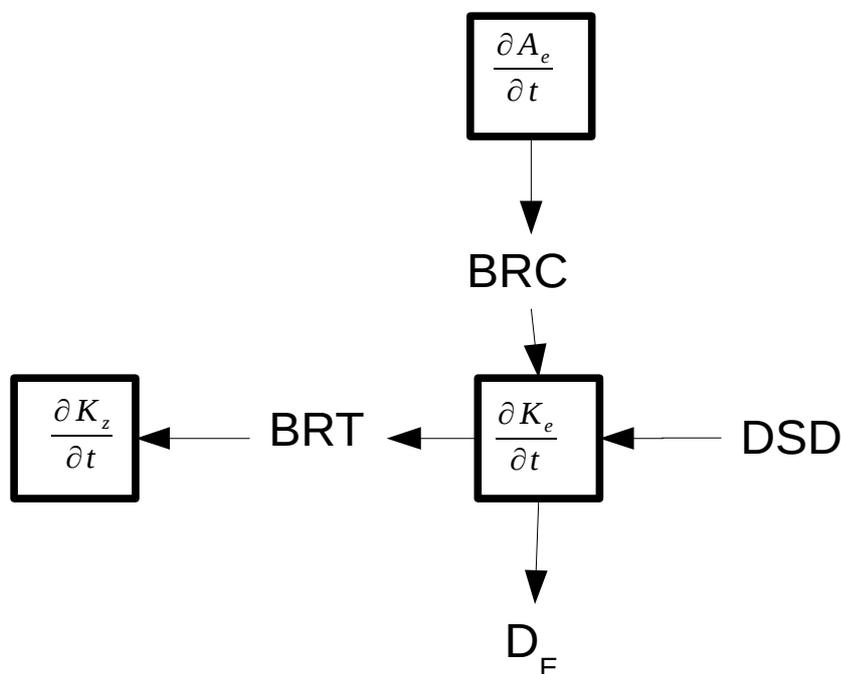


Figura 4.2 - Esquema dos fluxos de energia baseados em Orlansky e Katzfey

4.2 - Revisão das equações básicas

As equações da energética utilizadas são deduzidas a partir de um conjunto de equações básicas. Apresentamos aqui as equações de movimento e do equilíbrio hidrostático em coordenadas de pressão, que conforme Haltier e Willian (1974), referenciado por Orlansk e Katzfey (1993) podem ser escritas, respectivamente, conforme as Equações 4.1 e 4.2

$$\frac{d\vec{V}}{dt} + \omega \frac{\partial \vec{V}}{\partial p} + f \hat{k} \times \vec{V} = -\nabla \phi + \vec{F}_r \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial p} = -\alpha \quad (4.2)$$

Onde, $\vec{V} = (u_i + v_j)$ corresponde ao vento horizontal em coordenadas métricas (m/s), u_i, v_j são respectivamente as componentes zonal e meridional do vento e $\omega = dp/dt$ é o vento vertical em coordenadas de pressão (Pa/s), o f é o parâmetro de Coriolis, o ϕ é o geopotencial ou energia geopotencial (m^2/s^2), \vec{F}_r representa as forças friccionais, α é o volume específico e d/dt é a derivada total ou substantiva.

Desenvolvendo o termo de gradiente de geopotencial de 4.1 e substituindo a componente vertical pela equação 4.2 vem a Equação 4.4

$$\nabla \phi = \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} i + \frac{\partial \phi}{\partial y} j + \frac{\partial \phi}{\partial p} \hat{k} \right) = \nabla_2 \phi - \alpha \hat{k} \quad (4.4)$$

Para efeitos práticos e para evitar erros de interpretação vale ressaltar que o geopotencial ϕ é calculado pelo programa *Energética* a partir da altura geopotencial z , conforme a Equação 4.5

$$\phi = g \cdot z \quad (4.5)$$

e onde g é a aceleração da gravidade considerada constante e igual a $9,8 \text{ m/s}^2$ independente da latitude.

Desenvolvendo a derivada substantiva d/dt da Equação 4.1 e também, considerando a Equação 4.4, a Equação 4.1 pode ser escrita na forma da equação 4.6

$$\frac{D\vec{V}}{Dt} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla_p \vec{V} + \omega \frac{\partial \vec{V}}{\partial p}) + f \hat{k} \times \vec{V} = -\nabla_p \phi - \alpha \hat{k} + \vec{F}_r \quad (4.6)$$

A partir da equação 4.6, pode-se obter as equações da tendência da energia cinética simplesmente multiplicando-se esta equação pelo vetor velocidade (Equação 4.7)

$$\frac{DK}{Dt} = \frac{dK}{dt} + \vec{V} \cdot \nabla_2 K + \omega \frac{\partial K}{\partial p} = -\vec{V} \cdot \nabla_2 \phi - \omega \alpha + diss \quad (4.7)$$

Fazendo-se ainda o particionamento das variáveis em estado básico e distúrbio, obtém-se as equações da energética para os referidos estados. A dedução completa destas equações podem ser encontradas em Orlansk e Katzfey (1993), a seguir partimos direto para a descrição destas equações e da forma como esta formulação é processada no programa.

4.3 - Energética do Estado Básico (outfile_B)

O processamento dos cálculos do estado básico é realizado pelo módulo "m_km.f90" durante a execução do passo $s=1$. As equações implementadas baseiam-se no estado básico com média no tempo, mas existe a opção do estado básico por média zonal. Apresentaremos assim o processamento da energética do estado básico por média no tempo. Ao final do capítulo apresentamos o que ocorre quando se processa o estado básico com média zonal.

No cálculo do estado básico por média temporal, são realizadas as médias no tempo das variáveis de geopotencial e vento e também o cálculo

da equação do estado básico, conforme Equação 4.8

$$\underbrace{\vec{V}_m \nabla K_m}_{1(advkm)} + \underbrace{\vec{V}_m (\overline{\vec{V}' \nabla \vec{V}'})}_2 = - \underbrace{\vec{V}_m \nabla \Phi_m}_{3(advgm)} + \underbrace{\vec{V}_m \vec{F}_o}_4 + \underbrace{res}_5 \quad (4.8)$$

Note que estado básico, é considerado como um estado aproximadamente permanente, não havendo portanto um termo de variação da energia cinética no tempo. Assim, os dois primeiros termos são termos advectivos. O terceiro termo representa o trabalho do geopotencial médio, ou seja, a energia cinética produzida pelos gradientes de pressão médios. O termo 4 representa as forças dissipativas, que supostamente é proporcional a velocidade do vento. O termo 5 é o resíduo de cálculo, que pode ser decorrente dos erros numéricos. Mesmo como médias temporais bastante longas, pode-se ter uma variação deste estado básico, no tempo. Como, na prática pode se configurar períodos de tempos mais curtos o termo de resíduo “res”, poderá conter todos estes erros, que de qualquer forma espera-se que sejam pequenos.

Convém salientar que parte do termo 2 da equação, que corresponde as tensões de Reynolds para o estado básico, possui internamente um termo de média da advecção do vento do distúrbio conforme Equação 4.9

$$\overline{(\vec{V}' \nabla \vec{V}')} = \begin{pmatrix} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial p} \right) i \\ \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \omega \frac{\partial v}{\partial p} \right) j \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

As componentes i e j da Equação 4.9 são chamadas respectivamente de médias da advecção do vento do distúrbio para a componente zonal (mavlx) e componente meridional (mavly). Estes termos não são apenas resultados intermediários do cálculo do termo 2 da equação do estado básico (equação 4.8), mas aparecem também nos termos da equação da energética do distúrbio, como será visto mais adiante. Desta forma, estes resultados são grava-

dos para uso no processamento posterior do passo S=2.

Os valores médios das variáveis atmosféricas básicas são gravados primeiro, e utilizam a mesma convenção de sigla utilizada no modelo numérico. Após este conjunto básico, vem os valores de energética do estado básico, propriamente dito conforme Tabela 4.1

Tabela 4.1 – Siglas utilizadas para as variáveis do estado básico e nos arquivos outfile_B: (1) Siglas que dependem da convenção do modelo.

Sigla	Descrição
(1)	Topografia, Altura Geopotencial, Pressão, Temperatura, Umidade Específica Componentes do Vento....
Ro	Densidade do ar
ekm	Energia Cinética média (m ² .s ⁻²)
advkm	Advecção da Energia Cinética Média (m ² .s ⁻³) - Termo 1 da equação 4.8
mavlx	Componente zonal da média da Advecção do vento do distúrbio (equação 4.9 – componente i)
mavly	Componente meridional da média da Advecção do vento do distúrbio (equação 4.9 – componente j)
AGEOm	Advecção de geopotencial pelo estado básico (termo 3)
BRCm	Termo baroclínico médio
DSDm	Termo de desenvolvimento corrente abaixo médio

Nesta tabela, falta apresentação o termo ekm. Este corresponde a Energia cinética do estado básico, que é calculada a partir do vento médio V_m conforme equação 4.10

$$Ekm = \frac{1}{2} V_m^2 \quad (4.10)$$

Destaca-se também que o termo 2 da Equação 4.8, que corresponde as Tensões de Reynolds do estado básico, não é gravado nos arquivos de saída por conveniência de espaço. Contudo, caso haja interesse, pode ser facilmente calculadas a partir das demais variáveis disponibilizadas,

conforme a Equação 4.11

$$Rey_m = u_m \cdot mavlx + v_m \cdot mavly \quad (4.11)$$

Os termos 4 e 5 da Equação 4.8 são considerados como um único termo de resíduo e calculado como $(vmf0=advkm+Reym+advgb)$.

4.4 - Energia do Distúrbio por Níveis (outfile_L)

No módulo m_ke.f90 é processado a energia cinética do distúrbio (Ke') por nível, cujos resultados são gravados nos arquivos outfile_L, e também a integração vertical dos mesmos termos, cujos resultados são gravados nos arquivos outfile_E.

No arquivo outfile_L, as 5 primeiras variáveis estão relacionadas as mesmas 5 variáveis proveniente do modelo. Contudo, deve-se ter atenção que a maioria das variáveis apresentadas aqui, representam as variáveis do distúrbio, ou seja, o valor do modelo menos o valor do estado básico ($a' = a - a_m$). Em geral a sigla para cada uma das variáveis são as mesmas utilizadas nos arquivos do modelo, podendo assim variar conforme a sigla adotada em cada modelo. A exceção são a altitude da topografia, que é sempre “topo”, e a pressão do nível isobárico, que é sempre “press.” Como a presente versão do programa processa os campos em coordenadas isobáricas, os campos de press serão sempre valores constantes e iguais ao respectivo nível isobárico.

As variáveis da energética do distúrbio são calculadas da equação K' (Equação 4.12), conforme desenvolvida por Orlanski e Katzfey (1991).

$$\underbrace{\frac{\partial K'}{\partial t}}_1 + \underbrace{(\vec{V}_m \cdot \nabla)}_2 K' + \underbrace{(\vec{V}' \cdot \nabla_3)}_3 K' = \dots$$

$$\dots = \underbrace{-(\vec{V}' \cdot \nabla_3 \Phi')}_4 - \underbrace{(\vec{V}' \cdot (\vec{V}' \cdot \nabla \vec{V}_m)) + \vec{V}' \cdot \overline{(\vec{V}' \cdot \nabla \vec{V}')}}_{5-(BRT)} + \underbrace{\vec{V}' \cdot \vec{F}_o}_6 \quad (4.12)$$

Os 3 primeiros termos desta equação, no lado esquerdo da igualdade, correspondem a derivada local da energia do distúrbio (1) e os termos advectivos da energia cinética do distúrbio pelo vento do estado básico (2) e da energia cinética do distúrbio pelo vento do distúrbio (3). o termo 5, está associado ao cisalhamento e representa a conversão barotrópica (BRT). Note que, dentro do termo 5, existe uma parte sob “barra de média” vista anteriormente na equação do estado básico (equação 4.8), cujas os resultados (equação 4.9) são gravados na forma de duas componentes: “mavlx” e “mavly”. Estes resultados previamente calculados no modulo m_km, são reaproveitados no cálculo do termo 5 da equação 4.12. Desta forma, o período para cálculo dos termos médios do termo 5 são os mesmos utilizados para o cálculo do estado básico. Conseqüentemente, caso se selecione o cálculo da média zonal no processamento do estado básico, estas mesmas médias zonais também serão utilizadas no termo 5 da equação do distúrbio. O termo 6 representa o resultado das forças dissipativas e é obtido na forma de resíduo.

O termo 4 da Equação 4.12 pode ser expandindo na forma da Equação 4.13

$$-(\vec{V}' \cdot \nabla_3 \Phi') = \underbrace{-\nabla_p (\vec{V}' \cdot \Phi')}_{4a-(DSD)} - \underbrace{\omega' \alpha'}_{4b-(BRC)} + \underbrace{\phi' \nabla_p \vec{V}'}_{4c} \quad (4.13)$$

Onde o termo 4.a é aqui chamado de convergência de geopotencial (CFG), mas tradicionalmente conhecido como a convergência do fluxo ageostrófico (CFA) devido à propriedade não convergente/divergente do vento geostrófico. Este é um termo, conforme mostrado no item 4.1, representa a propagação da energia cinética do distúrbio geralmente a jusante do escoamento, motivo pelo qual este também é conhecido como termo de desenvolvimento corrente abaixo (DSD – *Down-stream Development*). O sinal deste termo, positivo ou negativo, indica respectivamente se a energia cinética é importada ou exportada do centro de energia. O termo 4b representa o trabalho associado aos movimentos verticais e

a conversão em energia potencial, também conhecido como termo de conversão baroclínica (BRC). O termo 4c geralmente é desprezado, por ser pequeno quando integrado verticalmente da superfície ao topo da atmosfera e no volume do distúrbio. Contudo, o cálculo deste termo é mantido no programa, pois localmente pode ter valores grandes, além de junto com o termo 4.b corresponde à conversão vertical de energia potencial. Considerando-se a equação da continuidade no termo 4c e o equilíbrio hidrostático em 4b, a equação 4.13 pode ainda ser escrita na forma da equação 4.14.

$$-(\vec{V}' \nabla_3 \Phi') = -\underbrace{\nabla_p (\vec{V}' \Phi')}_{4a} - \underbrace{\frac{\partial \Phi' \omega'}{\partial p}}_{4b+4c} \quad (4.14)$$

Onde o termo 4b+4c corresponde a conversão de energia potencial da perturbação em energia cinética.

Outra forma de se expandir o termo 4 da equação 4.12 é separar a componente horizontal da vertical, resultando na equação 4.15

$$-(\vec{V}' \nabla_3 \Phi') = -\underbrace{(\vec{V}' \nabla_p \Phi')}_{4a-(Ageo)} - \underbrace{\omega' \alpha'}_{4b-(BRC)} \quad (4.15)$$

Onde o termo 4-a -e a advecção horizontal de geopotencial (ageo) e o termo 4.b, conforme apresentado anteriormente, é o termo de conversão baroclínica.

Outro termo interessante de ser expandido na equação 4.12 é o termo 3, tal como apresentado na Equação 4.16.

$$(\vec{V}' \nabla_3) K' = \underbrace{\nabla_2 (\vec{V}' K')}_{3.a-(CEC)} + \underbrace{\frac{\partial \omega' K'}{\partial P}}_{3b} \quad (4.16)$$

Nesta, o termo 3.a, representa a convergência horizontal da energia cinética (CEC) e o termo 3.b a convergência vertical.

4.5 - Fluxos ageostrófico e fluxo de geopotencial

Os termos de energética são valores escalares, contudo para indicar o sentido de propagação do termo 4a (DSD) são calculados algumas variáveis vetoriais. São estas o vento ageostrófico do distúrbio (\vec{V}_{ag}') e o vento projetado na direção da força de gradiente de geopotencial (\vec{V}_c')

O (\vec{V}_{ag}') é calculado pela diferença entre o vento real do distúrbio \vec{V}' e o vento geostrófico do distúrbio \vec{V}'_g , conforme a expressão $\vec{V}_{ag}' = \vec{V}' - \vec{V}'_g$. O Vento geostrófico por sua vez é calculado a partir do segundo nível vertical do modelo até o topo da atmosfera conforme Equação 4.17

$$\vec{V}'_g = \frac{\hat{k}}{f} \times \nabla_p \phi' \quad (4.17)$$

Onde o parâmetro de Coriolis $f = 2 \cdot \Omega \sin(\phi)$ é obtido conforme latitude ϕ . Para evitar descontinuidade neste cálculo sobre o equador, são consideradas latitudes entre +/- 90 graus até +/- 5 (graus). Para faixa de -5 a 5 utiliza parâmetro de Coriolis fixo para a latitude de 5 graus.

O \vec{V}'_g do primeiro nível vertical do modelo, próximo a superfície é calculado com base no vento térmico do distúrbio \vec{V}'_t , ou seja, considera-se que o vento térmico entre o primeiro e o segundo nível, representa a variação do vento geostrófico entre estes dois níveis. Assim o vento geostrófico no primeiro nível é calculado conforme equação 4.18

$$\vec{V}'_g(1) = \vec{V}'_g(2) - \vec{V}'_t \quad (4.18)$$

Onde os índices (1) e (2) representam respectivamente o primeiro e segundo nível a partir da superfície. O Vento térmico da perturbação, neste caso é obtido conforme equação 4.19

$$\vec{V}'_t = \frac{\hat{k}}{Pf} \times \nabla_p T'_v \quad (4.19)$$

Onde \bar{T}'_v é a temperatura virtual da perturbação.

O Vento \vec{v}'_c é uma simples projeção do vento do distúrbio obtida conforme equação 4.20

$$\vec{v}'_c = (\vec{v}' \cdot \hat{n}) \cdot \hat{n} \quad (4.20)$$

Onde $\hat{n} = -\nabla \Phi / |\nabla \Phi|$ é o versor na direção da força do gradiente de geopotencial. Como, \vec{v}'_c é sempre perpendicular as linhas de geopotencial, este está associado ao (ganho ou perda) de energia cinética dos ventos devido a ação exclusiva da força de gradiente de pressão (à favor ou contra) o movimento, sem considerar a ação de forças dissipativas e a ação da força de Coriolis.

Quando o vento real, ou mais especificamente o vento do distúrbio se aproxima do balanço geostrófico, (\vec{V}_{ag}') tende a se aproximar de (\vec{V}_c') de forma que ambos podem ser utilizados de forma similares. Por exemplo, a partir do (\vec{V}_{ag}') fornecido pelo programa *Energética* pode-se calcular e plotar o vetor fluxo ageostrófico dado por $(\phi \vec{V}_{ag}')$, vetor que permite representar a direção e sentido da programação do termo de DSD. Alternativamente pode-se plotar o fluxo de geopotencial dado $(\phi \vec{V}_c')$, que também dá indicação similar. Um exemplo comparativo entre os resultados de plotagem de $(\phi \vec{V}_c')$ e $(\phi \vec{V}_{ag}')$ é apresentado na Figura 4.3

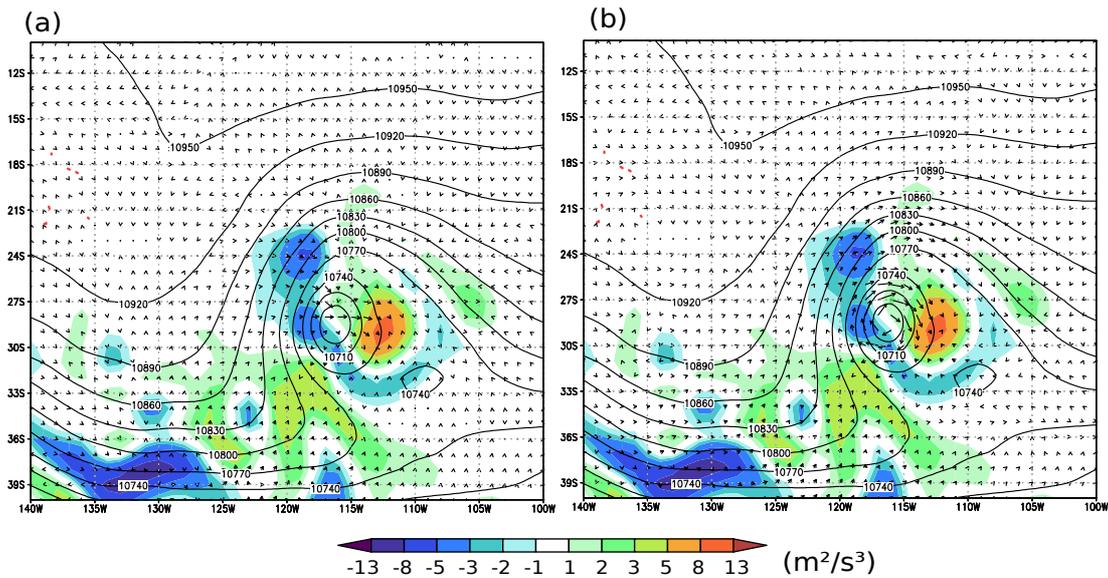


Figura 4.3 - Termo de Convergência do Fluxo Ageostrófico (cores) e Altura Geopotencial (linhas) em 250 hPa: a) Com vetores do fluxo de geopotencial, b:) Vetores do Fluxo Ageostrófico

Nesta figura é apresentado o campo de DSD no nível de 250 hPa para o caso de um VCAN, onde também se mostra os vetores de Fluxo de Geopotencial (Figura 4.3-a) e os vetores do fluxo ageostrófico (Figura 4.3-b). Ambos apontam a direção da propagação de energia, que deixa a região onde o termo DSD é negativo (tons de azul) para a região onde DSD é positivo (tons do verde ao vermelho). Contudo $(\phi \vec{V}_c')$ evidencia uma trajetória sempre perpendicular às linhas de geopotencial, convergindo para o centro do ciclone, depois divergindo. Já o $(\phi \vec{V}_{ag}')$ tende a apresentar trajetória curva, contornando o centro de baixa.

Importante destacar que a plotagem do fluxo de geopotencial é particularmente indicado para as regiões tropicais, sendo válido para qualquer domínio ou qualquer situação. Por outro lado o fluxo ageostrófico não é válido sobre o equador, podendo fornecer valores espúrios nas regiões tropicais ou nas demais situações onde aproximação geostrófica não é válida. Ainda que $(\phi \vec{V}_c')$ possa ser uma alternativa nestes casos. Para o caso em que se deseja plotar $(\phi \vec{V}_{ag}')$ o programa fornece um parâmetro de controle de qualidade (qc) para ser aplicado a (\vec{V}_{ag}') ou (\vec{V}_g') e que elimina da plotagem os eventuais valores espúrios. O qc é obtido a partir da relação da equação 4.21

$$r = \frac{|\vec{V}_g' - \vec{V}'|}{|\vec{V}'|} \quad (4.21)$$

Onde “r” é representa uma comparação entre a magnitude do \vec{V}_g e a magnitude do vento real. Para esta relação é adotado no programa o seguinte limite de tolerância: Caso $r > 2 \Rightarrow qc = 0$; caso $r \leq 2 \Rightarrow qc = 1$, ou seja, se a magnitude do vento ageostrófico do distúrbio for maior que duas vezes a magnitude do vento, então considera-se que o valor de (\vec{V}_g') é um valor espúrio. Assim, basta multiplicar o fluxo ageostrófico por qc na plotagem, para que os pontos espúrios sejam automaticamente zerados.

4.6 - Resumo e Visualização dos resultados

As unidades usuais de energia utilizadas nos arquivos de distúrbio por níveis (outfile_L) são: para energia cinética por unidade de massa é o **Joules.Kg⁻¹**, também expresso como **m².s⁻²** . Para a tendência da energia cinética os valores estão em **W.Kg⁻¹** . Também expresso por **m².s⁻³**.

A Tabela 4.2 apresenta as siglas utilizadas nos arquivos OUTFILE_L para um dos termos apresentados neste capítulo.

Os resultados destes arquivos OUTFILE_L da energética do distúrbio são reutilizados no programa para cálculo dos termos integrados na vertical, apresentados no próximo capítulo. Além deste uso interno do programa, estes arquivos podem ser utilizados também para examinar a energética por nível, tal como mostrado na Figura 4.3 ou ainda para produção de cortes verticais da energia cinética, motivo pelo qual são calculados também variáveis tais como temperatura potencial, que, em cortes verticais, permitem verificar os escoamentos em relação aos níveis isentrópicos. Como exemplo, a Figura 4.4 apresenta um corte vertical ao longo da latitude de 28S para o VCAN da Figura 4.3. Neste é plotado o termo DSD e a temperatura potencial real (tp) .

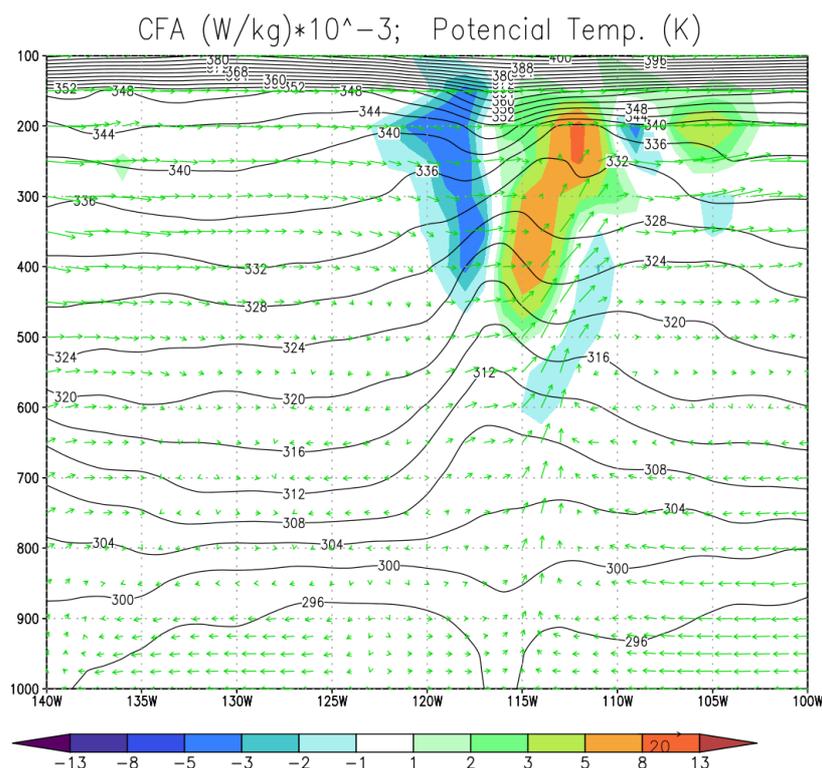


Figura 4.4 – Corte vertical de um VCAN em 28 S, para as variáveis de CFA ($\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$) em cores, Temperatura potencial (K) em linhas, e vento transversal em vetores.

O vento transversal foi obtido utilizando-se a componente zonal do vento real (m/s), e a vento vertical (Pa/s), contudo multiplicando-se a última componente por “-10”, para melhor visualizar os movimentos verticais.

Tabela 4.2– Tabela das variáveis dos arquivos de energia cinética do distúrbio por nível isobárico ou *OUTFILE_L*: Obs.: (*) siglas conforme adotado no modelo numérico

Sigla	Descrição
(*)	Topografia, Altura Geopotencial, Pressão, Temperatura, Umidade Específica Componentes do Vento, etc.
ekl	<i>Edgy kinetic energy</i> (m^2/s^2)- Energia cinética do distúrbio conforme equação 4.12
ro	<i>Air density</i> (Kg/m^3) - Distúrbio da densidade do Ar (Kg/m^3) (o mesmo que $1/\alpha'$)
Ulag	<i>Ageostrophic wind</i> (zonal) - Vento ageostrófico do distúrbio
Vlag	<i>Ageostrophic wind</i> (meridionall)- Vento ageostrofico do distúrbio

Ulg	<i>Geostrophic wind</i> (zonal) - Vento geostrófico do distúrbio
Vlg	<i>Geostrophic wind (meridional)</i> - Vento geostrófico do distúrbio
Ult	Termal wind (zonal) – Vento térmico do distúrbio (zonal)
Vlt	Termal wind (meridional) – Vento térmico do distúrbio (meridional)
Ulc	Vento na direção da força do gradiente de geopotencial (componente zonal da equação 4.20)
Vlc	Vento na direção da força do gradiente de geopotencial (componente meridional da equação 4.20)
Adhk	Advecção Horizontal de Energia Cinética (componente horizontal do Termo 3 da equação 4.12)
Advk	Advecção Vertical de Energia Cinética (componente vertical do Termo 3 da equação 4.12)
Adkb	Advecção de Energia pelo Estado Básico (Termo 2 da equação 4.12)
Ageo	Advecção horizontal de geopotencial (Termo 4-a da equação 4.15)
BRC	Termo Baroclínico (Termo 4b da equação 4.13)
BRT	Termo Barotrópico (termo 5 da equação 4.12)
Rey2	Cálculo parcial do termo barotrópico
CEC	Convergência da Energia Cinética (termo 3-a da equação 4.16)
DSD	Desenvolvimento corrente abaixo Convergência do Fluxo de Geopotencial (termo 4-a, da equação 4.13)
gdv	Divergência de geopotencial. Termo 4c da equação 4.13
Tp	Temperatura Potencial real
dTp	Temperatura Potencial do distúrbio
qc	Controle de qualidade do vento geostrófico (Valores 0 ou 1 conforme equação da equação 4.21)

Note que alguns outros termos podem ser derivados a partir dos fornecidos nesta tabela, dentre estes a conversão vertical de energia potencial do distúrbio e a conversão de energia cinética do distúrbio.

5 - INTEGRAÇÃO VERTICAL E RESULTADOS

No capítulo anterior, apresentamos as equações da energética para o estado básico e para o distúrbio, assim como os resultados fornecidos nos arquivos OUTFILE_B, do estado básico e OUTFILE_I, da energética do distúrbio por nível. Neste capítulo abordamos o processo de integração vertical para os termos da energética do distúrbio, que são gravados nos arquivos OUTFILE_E. Os resultados desta integração vertical, caracterizam-se pelo saldo da energia na coluna vertical, sendo assim um dos principais resultados antes da integração volumétrica. Por este motivo, são também tratados neste capítulo as formas de plotagem destes resultados.

5.1 - Formas de Integração vertical e unidades dos resultados.

A integração vertical é feita para cada um dos termos individualmente onde é usual duas formas de integração. A integração em termos de energia por unidade de massa e energia por unidade de área.

Para poder lidar com duas possibilidades de integração vertical, o módulo m_ke processa previamente a integral numérica de cada termo das equações de energética apresentadas no capítulo anterior em Watts x 10^{10} segundo a Equação 5.1.

$$\langle E_j \rangle = \int_{i=s}^t E_{ij} d m_i \quad (5.1)$$

Onde E_{ij} representa genericamente cada um dos termos das equações da energética em seus respectivos níveis i . A massa m_i é calculada para cada nível vertical conforme Equação 5.2

$$m_i = A(P_i - P_{(i+1)}) / g \quad (5.2)$$

Onde P_i e $P_{(i+1)}$ são, respectivamente, as pressões na base e topo do elemento de volume, situado no meio dos níveis isobáricos do mode-

lo; g é a aceleração da gravidade; A é a área da base do elemento de volume que, para o caso de HCOORDS=1 (vide item 3.4) são calculados conforme a equação 5.3

$$A = a^2 \cos(\phi) d\lambda d\phi \quad (5.3)$$

“a” onde é o raio da Terra, ϕ é a latitude, $d\lambda$ e $d\phi$ correspondem respectivamente aos intervalos de longitude e latitude em radianos. Para o caso de HCOORDS=2, é calculado simplesmente como lado x comprimento.

Também é calculado a massa de ar na coluna vertical (Equação 5.4) em Kg x 10^{10}

$$\langle M \rangle = \int_{i=s}^t dm_i = A(P_s - P_t)/g \quad (5.4)$$

Onde P_s e P_t são respectivamente a pressão na base (pbas) e a pressão no topo (ptop) da coluna vertical.

Assim, para se obter os resultados da integração vertical em $W.Kg^{-1}$ ou $m^2.s^{-2}$ de cada um dos termos E_{ij} basta dividir o valor integrado da energética por $\langle M \rangle$, o que equivale a obtenção da integração vertical ponderada conforme Equação 5.5

$$\frac{\langle E_j \rangle}{\langle M \rangle} = \frac{\int_{i=s}^t E_{ij} dm_i}{\int_{i=s}^t dm_i} = \frac{1}{(P_s - P_t)} \int_{i=s}^t E_{ij} dP_i \quad (5.5)$$

Para obtenção dos resultados em W/m^2 , basta dividir o valor integrado pela área A, o que equivale a obtenção da integração vertical pela equação 5.6.

$$\frac{\langle E_j \rangle}{A} = \frac{\int_{i=s}^t E_{ij} dm_i}{A} = \frac{1}{g} \int_{P_s}^{P_t} E_{ij} dP_i \quad (5.6)$$

5.2 - Termo de correção de variação de massa

O campo de pressão de superfície podem mudar com o tempo e no espaço, o que resulta em variação da massa na coluna vertical de integração que podem afetar o cálculo do resíduo das equações que é feito posteriormente. Afim de melhor equacionar o cálculo do resíduo acrescenta-se a equação 5.7.

$$K' \frac{dm}{dt} = \left[\frac{\partial m}{\partial t} + \vec{V} \nabla m \right] k' \quad (5.7)$$

Onde m é a massa da coluna vertical tal como expresso na equação 5.2 e K' é energia cinética do distúrbio em m^2s^{-2} . Note que, aplicando-se a equação 5.2, a equação 5.7, considerando-se o a pressão no topo da camada constante e também e dividindo o resultado pela massa da coluna a equação 5.7 pode ser rescrita na forma da equação 5.8 que expressa a variação de energia devido a variação de pressão de superfície por unidade de massa.

$$\frac{K'}{m} \frac{dm}{dt} = \frac{1}{(P_s - P_t)} \left[\frac{\partial P_s}{\partial t} + \vec{V} \nabla P_s \right] k' \quad (5.8)$$

5.3 - Resumo dos resultados fornecidos

Como resumo apresentamos na tabela 5.1 as variáveis fornecidas nos arquivos OUTFILE_B, composto principalmente pelas variáveis da energética integrada verticalmente conforme equação 5.1, além de outras variáveis úteis.

Tabela 5.1-Tabela das variáveis dos arquivos de energia cinética do distúrbio integrado verticalmente (OURFILE_E)

Sigla	Descrição
topo	Topografia (m)
pressfc	Pressao a superficie (Pa)
pbas	P_s : Pressão na base da coluna vertical (O mesmo P_s das equações 5.5 e 5.6)
ptop	P_t : Pressão no topo da coluna vertical. Geralmente valor constante de 10000 (Pa)
mass	$\langle M \rangle$: Massa total da coluna vertical (kg x 10^{10}) - (Equação 5.4)
area	A : Área da grade (m ² x 10^{10}) – (Equação 5.3)
ekli	$\langle K' \rangle$: Energia cinética integrada (J x 10^{10})
ageoi	Adv. Geopotencial Integrado (J x 10^{10}) - Integração do termo 4 da equação 4.12
AdHKi	Adv. Horiz. Energ. do distúrbio (W x 10^{10}) - Integração da componente horizontal do Termo 3 da equação 4.12
AdvKi	Adv. Vert. Energ. do distúrbio (W x 10^{10}) - Integração da componente vertical do Termo 3 da equação 4.12
AdKBi	Adv. Energia. p/ est. básico (W x 10^{10}) - Integração do termo 2 da equação 4.12
BRCi	Termo Baroclínico integrado (W x 10^{10}) - Integração do termo 4b da equação 4.13
BRTi	Termo Barotropico integrado (W x 10^{10}) - Integração do termo 5 da equação 4.12
DSDi	Desenvolvimento corrente abaixo Integrado (W x 10^{10}) Integração do termo 4-a, da equação 4.13. O mesmo que Convergência do Fluxo Ageostrófico Integrado.
Rey2i	Integração do cálculo parcial de BRTi (W x 10^{10})
CECi	Convergência de Energia Cinética Integrada (W x 10^{10}) - Integração do termo 3.a da equação 4.15
gdvi	Divergência de geopotencial (Joules x 10^{10}) - Integração do termo 4c da equação 4.13

As Figuras 5.1 e 5.2 são exemplos de resultados área e massa fornecidos pelo

programa. Estes campos são utilizados para permitir o cálculo posterior da tendência da energia por unidade de massa ou por unidade de área. Note que a área (Figura 5.2) é um valor constante no tempo, mas varia conforme a latitude devido ao tipo de grade utilizada. O campo de massa, além de variar com a latitude, destaca a topografia, evidenciando camadas atmosféricas mais ou menos espessas, não apenas pela topografia, mais devido a centros de baixa/alta pressão. Este campo, ao contrário da figura anterior, apresenta variações no tempo e no espaço, conforme a variação da pressão de superfície (figura não mostrada).

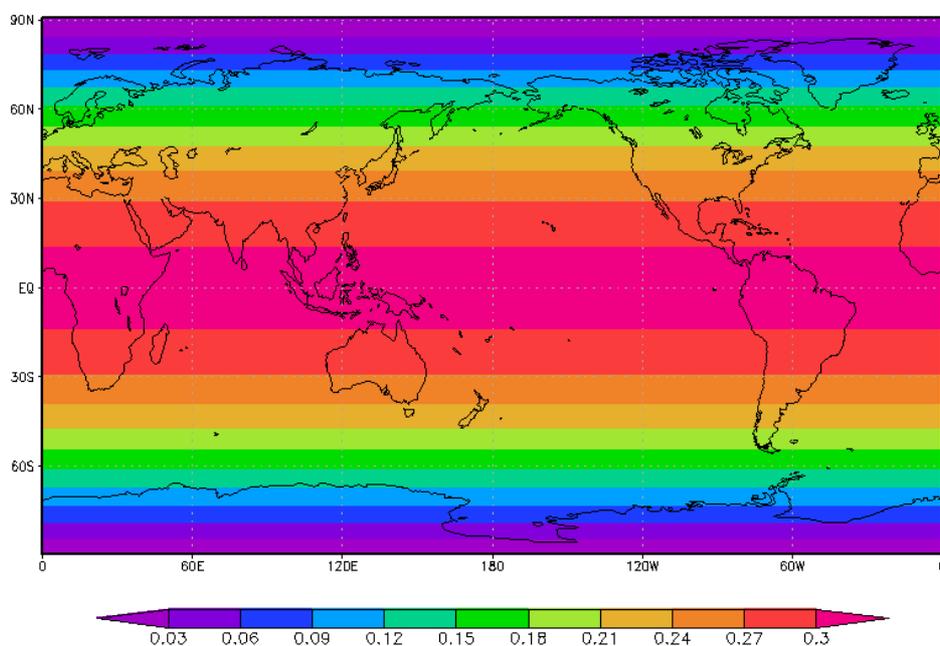


Figura 5.1 – Exemplo de área por ponto de grade, para uma grade regular com intervalos de 0.5 graus de latitude/longitude ($m^2 \times 10^{10}$)

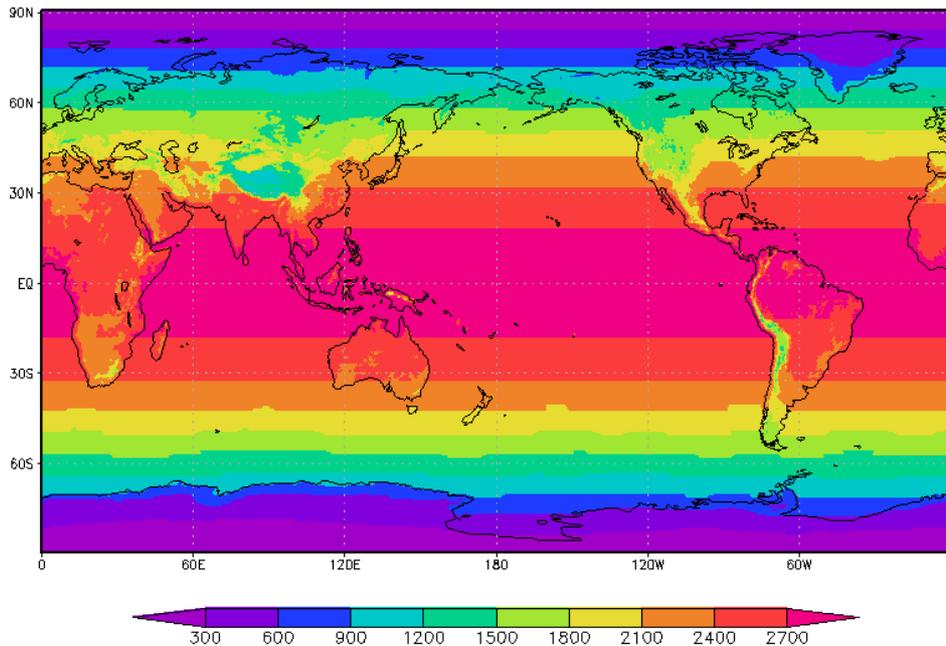


Figura 5.2 – Exemplo de resultado de massa da coluna vertical para uma grade regular de 0.5 graus de latitude e longitude e para integração da superfície a 100 hPa (Kg. 1010)

5.4 - Apresentação dos resultados

As Figuras de 5.3 a 5.5 apresentam resultados para 3 estágios de desenvolvimento de um sistema frontal que ocorreram entre o dia 25 e 27 de abril de 2017, que iniciou sobre o continente e se intensificou sobre o oceano Atlântico. Os 3 principais termos da equação da energética, além da energia cinética integrada são apresentadas nestas figuras. Estes termos são calculados dividindo-se cada um pela massa. Um script para Grads, similar ao do arquivo “**generate_maps.gs**”, foi aqui adaptado para rodar para um outro período mais extenso, não incluso nos dados de exemplo. De qualquer forma, para rodá-lo basta digitar o comando **grads -lc “run generate_maps.gs”**.

Neste é lido pelo menos 4 arquivos. O principal é o arquivo OUTFILE_E, que contem os termos integrados, mas algumas informações foram tiradas dos demais arquivos. Na figura 5.3.-a apresenta em cores o DSD, obtido pela plotagem da divisão de $DSDi/mass*1000$ resultado no termo DSD em $W.Kg^{-1}10^3$. Ambas as variáveis DSDI e mass vem do arquivo OUTFILE_E e correspondem aos valores integrados do nível “pbas” (nível mais próximo a superfície) ao “ptop” (topo em 100 hPa), Também apresenta o valor do fluxo ageostrófico no nível de 250 hPa, obtido pela plotagem $ulag$ e $vlag$, ambos vindos do arquivo OUTFILE_L (nível de 250 hPa), multiplicados pela altura geopotencial e pelo “qc”. Na Figura 5.3.b é apresentado o termo baroclínico, obtido por $BRCi/mass*1000$, também é plotado em linhas a altura geopotencial em 925 hPa. Como em OUTFILE_L possui apenas a altura geopotencial do distúrbio (z'), a altura geopotencial real (z) é obtida pela soma de z' com z_m (altura geopotencial do estado básico), disponível em OUTFILE_B. Processo análogo é feito em 5.3-c (termo barotrópico) e 5.3-d (energia cinética)

Antecipando ao que será apresentado no capítulo 6, a figura poligonal que aparece nestas figuras representam a máscara de integração utilizado para calcular e acompanhar a evolução dos termos de energia de um sistema meteorológico.

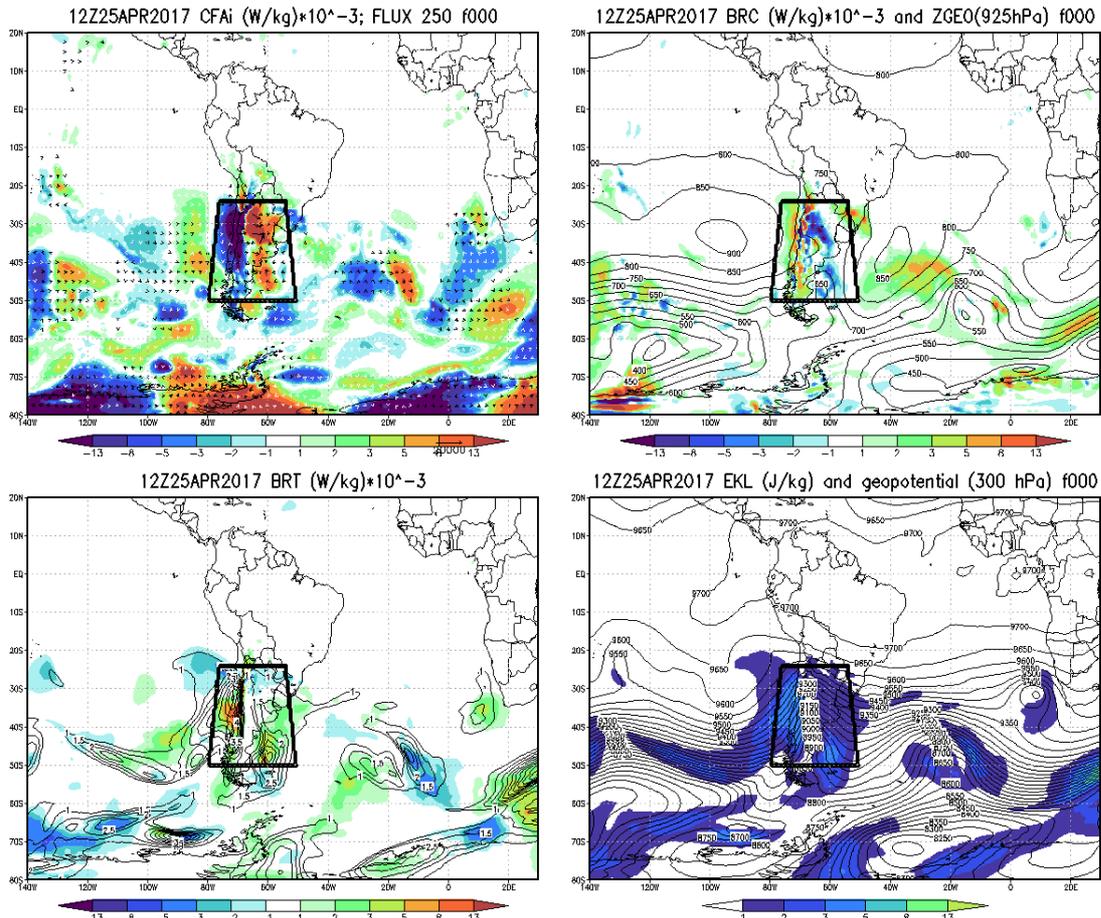


Figura 5.3 – Exemplo de resultado de energética verticalmente integrada para 2018-02-25 12UTC. Em (a), (b), (c) são apresentados em cores os termos DSD, BRC e BRT em W.Kg-1 x 10-3. Em (d) é apresentado a energia cinética do distúrbio em J.kg-1

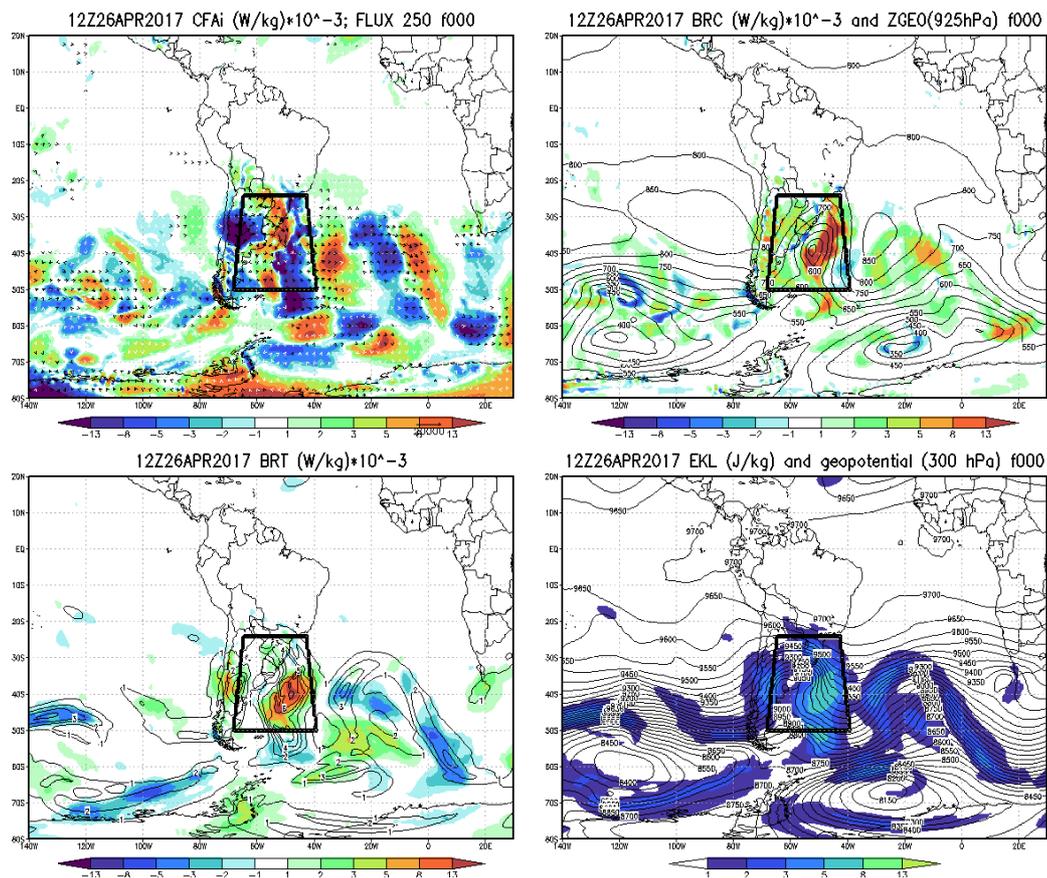


Figura 5.4 – Exemplo de resultado de energética verticalmente integrada para 2018-02-26 12UTC. Em (a), (b), (c) são apresentados em cores os termos DSD, BRC e BRT em $W.Kg^{-1} \times 10^{-3}$. Em (d) é apresentado a energia cinética do distúrbio em $J.kg^{-1}$

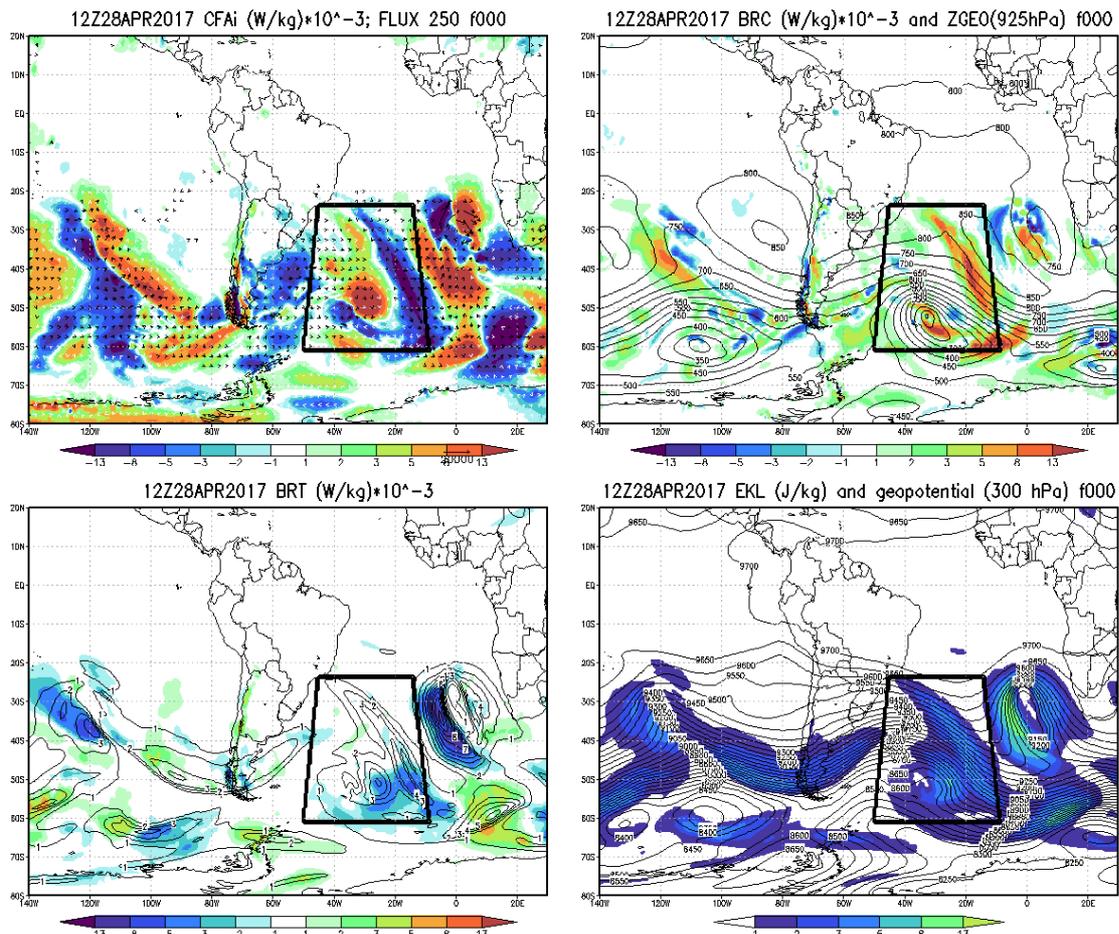


Figura 5.5 – Exemplo de resultado de energética verticalmente integrada para 2018-02-28 12UTC. Em (a), (b), (c) são apresentados em cores os termos DSD, BRC e BRT em W.Kg-1 x 10⁻³. Em (d) é apresentado a energia cinética do distúrbio em J.kg-1

6 - ENERGÉTICA INTEGRADA NO VOLUME E RESÍDUO

Uma abordagem utilizada em muitos estudos de caso é analisar a evolução no tempo dos termos da equação da energia cinética de um sistema meteorológico, durante sua formação, evolução e dissipação. Uma vez que o programa energética já produz os valores integrados verticalmente para cada ponto de grade do domínio do modelo, o que precisa ser feito é definir uma área em torno desde sistema meteorológico de interesse. Integrando-se horizontalmente os termos previamente integrados verticalmente obtém-se a integração completa no volume desejado.

Neste sentido, este capítulo aborda a configurações e execução dos passos 3 e 4 do programa energética, O passo 3 é a definição e geração da máscara para área em torno do sistema que é aplicada no passo 4, que corresponde a evolução no tempo dos termos integrados volumetricamente. Através das análises destes termos pode-se verificar, por exemplo a contribuição de cada termo da energética no desenvolvimento ou dissipação do sistema meteorológico.

Iniciamos assim este capítulo com a configuração da máscara de integração, detalhando passo-a passo os procedimentos. Posteriormente abordados a obtenção dos termos integrados propriamente dito no passo 4 do programa e também a estimativa do resíduo de cálculo.

6.1 - Configuração da Máscara para Integração

Após identificado, nas cartas meteorológicas, o sistema meteorológico que se deseja estudar, pode-se definir as bordas da máscara que envolve o sistema de interesse. As bordas precisam ser introduzidas manualmente, uma vez que o programa não possui uma forma automática para fazê-lo. Contudo permite

definir qualquer polígono para representar melhor o sistema meteorológico, assim como permite transladar, rotacionar ou deformar o polígono para acompanhar a evolução do mesmo.

Voltando ao namelist, observe o trecho relativo a seção &maskgen, conforme listagem da Tabela 6.1

Tabela 6.1 - Listagem parcial de um namelist do programa Energética (definição da máscara)

```
&maskgen  
  
  masknml='example_mask_definition.mask',  
  maskout='./dataout/example_mask%y4%m2%d2%h2',  
  /
```

Nesta, em masknml fornece-se o nome do arquivo que contem as instruções para geração da máscara. Em maskout é o nome do arquivo de resultados da máscara, que é gravado no formato do Grads (BIN/CTL), onde o campo de máscara é basicamente um campo de valores entre 0 e 1. Onde 0 corresponde ao ponto de grade fora na máscara, 1 representa o ponto dentro da máscara. Nas botadas da máscara é apresentado o valor 0.5.

A parte trabalhosa é a preparação do arquivo de instruções da máscara (masknml). Requer uma certa habilidade e paciência para ser produzida corretamente. Para iniciar pode-se pegar como exemplo o arquivo example_mask_definition.mask que está no diretório example do programa. Recomenda-se mudar o nome do arquivo antes de editá-lo e adaptá-lo. Editando-se o arquivo encontrará as configurações da tabela 6.2, verifica-se que este arquivo possui duas seções: \$mask e \$trans.

Tabela 6.2 - Listagem do namelist de definição de máscara de integração

```
&mask
  clat= -28.5,      ! Latitude do centro do poligono
  clon= -115.0,    ! Longitude do centro do poligono

  nvert=4,         ! Numero de vertices que compoe o poligono
  vert=   0.0,   1.0,
          1.0,   0.0,
          0.0,  -1.0,
          -1.0,   0.0,
/

&trans
  ntimes=3,
  !tempo
  !-----
  tab=  1,      0 , 10.0, 10.0,  360.0,  0,
        2,      0 ,  1.0,  1.0,   0.0,  0,
        3,      0 ,  1.0,  1.0,   1.0,  0,
/
```

Em \$mask defin-se os atributos iniciais da máscara que são:

- CLAT = latitude do centro do polígono em graus e décimos
- CLON = longitude do centro do polígono em graus e décimos
- nvert = Número de vértices do polígono;
- vert = posição relativa de cada um dos vértices do polígono em graus.

Assim no caso do exemplo, está sendo definido um polígono de 4 lados com centro nas coordenadas 28.5S/115.0W. Os vértices de V de 1 a 4 do polígono terão coordenadas relativas conforme a figura 6.1

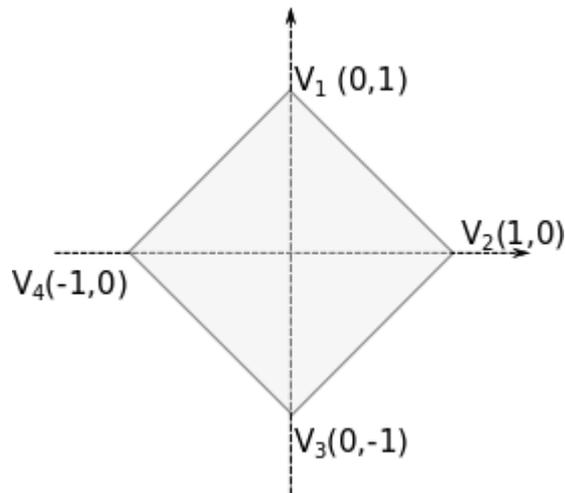


Figura 6.1 – Exemplo de polígono definido para utilização de máscara

O algoritmo implementado no módulo mmask foi escrito com base no conhecido algoritmo Bresenham (1962) para gerar o contorno da máscara e no conceito de integral de linha para preenchimento do contorno. Este pode traçar qualquer polígono, fechado, com qualquer número de lados, desde que os vértices sejam introduzidos em uma única sequência, por exemplo, sempre no sentido horário, ou sempre no sentido horário. Não se pode, por exemplo, introduzir o vértice V1 em seguida o V3 e depois volta ao V2. Isto poderá gerar um polígono diferente do esperado.

Na seção \$trans é definido a evolução deste polígono, de forma a acompanhar o sistema meteorológico de interesse. Os parâmetros permitem transladar, rotacionar ou deformar o polígono de forma a acompanhar todos os movimentos do sistema que se deseja acompanhar. São definidos para cada tempo do modelo $t=1,2,3,\dots$, etc. Caso os campos do modelo tenham mais tempos que o definido na máscara, o programa completará os tempos faltantes utilizando a última informação da posição da máscara. Como exemplo da figura 5.2 estão definido 3 tempos ($n_{times}=3$), na sequência vem os 3 tempos propriamente dito onde cada coluna representa: **tempo** - Índice que representa o passo de tempo; **alfa** - ângulo em graus de rotação do polígono; **Si** e **Sj** são fatores de escala na direção zonal (i) e direção meridional (j), utilizado para deformar o polígono (aumentá-lo ou

diminuí-lo). Se estes valores forem $S_i=1$, $S_j=1$, nenhuma deformação é aplicada. No caso, do exemplo, no primeiro tempo $s_i=10$, $s_j=10$, faz com que o polígono seja expandido em 10 vezes em ambas as direções, mantendo assim sua forma, mas abrangendo uma área bem maior. D_i e D_j são as translações na direção zonal e meridional. No primeiro tempo $D_i=360$ e $D_j=0$, equivale a dar uma volta ao mundo e voltar na mesma posição, ou seja, não muda a posição do polígono. Contudo, como no caso do exemplo o modelo foi gravando com a convenção de longitudes entre 0 a 360 graus e CLON foi informado com valor negativo (entre -180 a 180). O efeito de $D_i=360$ é converter o CLON para o seu correspondente valor positivo, adequando assim o polígono a convenção de longitude adotada. No tempo $t=3$ o polígono é deslocado 1 grau para leste, conforme pode ser visto na listagem.

Após completado os pontos basta rodar a energética para o passo 3 e o programa processará os arquivos de máscara. Utilizando-se um script do grads pode-se visualizar os campos de energética junto com a máscara, tal como mostrando na Figura 2.1. Assim, pode-se conferir se a máscara gerada está ajustada adequadamente ao sistema meteorológico em estudo. Caso precise de correções será necessário fazer os ajustes no namelist da máscara e rodar novamente o passo 3, repetindo-se o processo para melhor ajustar a máscara tantas vezes quantas forem necessário. O script de visualização utilizado na Figura 2.1 pode-se encontrado no diretório example do programa, e adaptado conforme a necessidade.

6.2 - Obtenção da evolução temporal dos termos

Uma vez que a máscara esteja bem ajustada ao sistema meteorológico de interesse, pode-se rodar o passo 4 do programa, que permite a integração dos termos na área da máscara. Conforme introduzido no capítulo 3, (Figura 3.1), o

programa acessa os resultados da integração vertical contidos no (OUTFILE_E), assim como os arquivos da máscara para realizar a integração volumétrica, obtendo-se assim a evolução temporal dos termos de energética. Neste passo, quase todas as informações necessárias já estão configuradas, exceto duas: O nome do arquivo de saída, que conterà os resultados da evolução temporal e a configuração de unidade dos resultados. Isto é feito na seção &vol do MyNamelist.nml, conforme ilustra a Tabela 6.3

Tabela 6.3 - Listagem parcial de um namelist do programa Energética (Configuração das saídas dos resultados da integração volumétrica)

```
&vol
  outfile_v='./dataout/IntegralVolume',
  unit=2,
!}
/
```

Nesta parte do namelist, complete outfile_v com o nome do arquivo que conterà os resultados da integração volumétrica e em unit a unidade que os resultados serão apresentados, que são:

- unit=1 para resultados em unidades de energia por unidade de área;
- unit=2 para resultados em unidades de energia por unidade de massa.

6.3 - Cálculo do resíduo

O cálculo do resíduo é feito conforme a equação 6.1

$$Res = \underbrace{\frac{(K'_{(t+2)} - K'_{(t-1)})}{2\Delta T}}_1 - \underbrace{\frac{DK'_{(t)}}{Dt}}_2 \quad (6.1)$$

Onde o primeiro termo chamamos de Tendência Calculada (TC) e o segundo termo tendência observada (TO). A “TC” é obtida pela diferença en-

tre a tendência da energia cinética integrada no volume em um tempo final ($t+1$) e um tempo inicial ($t-1$). Já “TC” é calculada pela soma dos termos da equação 4.12 integrada dentro do volume no tempo central (t).

Note que o volume considerado poderá estar se deslocando no tempo para acompanhar o sistema meteorológico, assim o cálculo da TO é feito pela diferença da tendência de energia que não necessariamente correspondem à mesma região geográfica, enquanto TC é feito em uma mesma região geográfica de intermédio entre as posições iniciais e finais do volume. A Figura 6.2 ilustra o processamento deste cálculo.

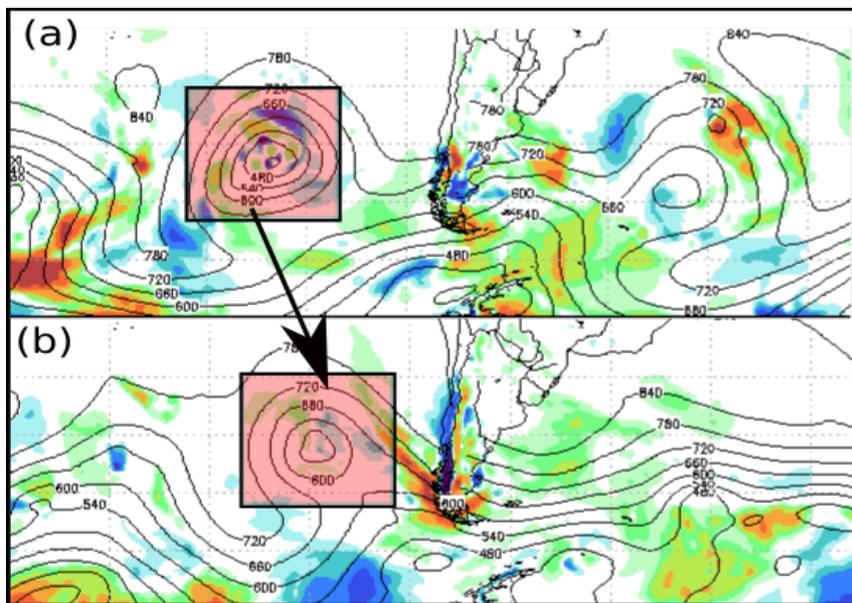


Figura 6.2 - Cálculo da Tendência Observada (TO) em um volume em movimento. Em (a) observa-se o volume sobre o ciclone no instante ($t-1$); em (b) o volume no instante ($t+1$) quando o ciclone se deslocou para leste. TO é calculado pela variação de energia nestes volumes em suas respectivas posições

Este é um dos fatores que poderá interferir no processo de cálculo do resíduo, que será tanto menor quanto menor o intervalo de tempo considerado, além dos erros de aproximação de cálculo. Uma vez que o termo 6 da equação 4.12 também não foi contabilizado, o valor residual, além de conter os erros de aproximação de cálculo, representa também as forças dissipativas.

Os resultados do OUTFILE_V, assim como o valor do resíduo, são apresentadas na forma de tabelas gravadas no formato texto conforme Tabela 6.4

Tabela 6.4 - Exemplo de resultado da evolução temporal da energética integrada volumetricamente

#1-Date;	2-Ekli Joules/m2 * 10 ⁵ ;	3-dkdt;	4-CEC;	5-BRC;	6-BRT;	7-CVE;
1.25	12.066360	-6.496559	-0.449895	-0.569640	-5.569918	
1.50	11.030277	-0.657873	2.252389	2.080912	-5.761106	
1.75	11.037329	-0.607382	2.719878	3.129732	-6.332231	

Neste arquivo, a coluna 1 (Date) corresponde ao dia do mês em dias e fração de dia, a coluna 2 é a evolução da energia cinética integrada no volume. Da terceira coluna em diante seguem os termos de energética. As siglas são as mesmas apresentadas na Tabela 4.2. As unidades dependem da configuração do namelist, que neste caso foi unit=2, ou seja W. Kg⁻¹. A partir deste arquivo pode-se plotar as curvas de tendência dos termos desejados, o que pode ser feito com aplicativo gráfico de sua preferência. No caso acima foi utilizado o **Evolutiongraf.py** fornecido junto com o programa. O resultado é mostrado na Figura 6.3

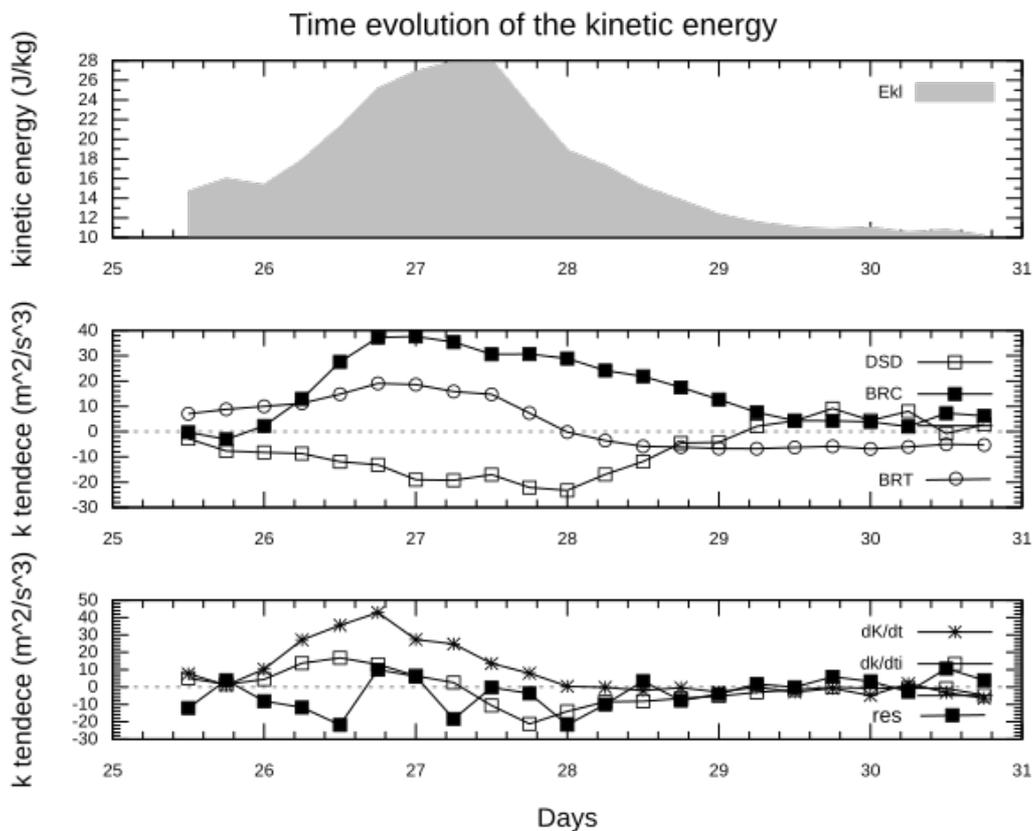


Figura 6.3 - Evolução Temporal tendência da energia cinética para um sistema frontal, formado no litoral da América do Sul em 26-abr-2017. O volume de integração é sinalizado pelo polígono nas figuras 5.4, 5.4, 5.5 para 3 tempos distintos. Os termos apresentados são em (a) :EKL – Energia Cinética do Distúrbio; em (b), DSD: Desenvolvimento corrente abaixo, BRC: termo baroclínico, BRTM termo barotrópico. (c) dkdt – Tendência da Energia Cinética, dkdti – Tendência da energia cinética pela derivada no tempo, res = resíduo.

Através deste figura pode-se notar, a forte participação do termo BRC, havendo também contribuição do termo BRT. O DSD negativo, mostra que o sistema exporta energia corrente abaixo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRESENHAM, J. Algorithm for computer control of a digital plotter. IBM, **Systems Journal**, 4(1):25-30, 1965.

CHANG, E.K.M.; The Role of Wave Packets in Wave-Mean Flow Interactions during Southern Hemisphere Summer. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.62, p.2467-2483, 2005

FERREIRA, S. H. S. **Energética de eventos de jato em baixos níveis durante o SALLJEX**. 2013. 222 p. IBI: <8JMKD3MGP7W/3E2SL38>. (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/04.30.13.22-TDI). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2013. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3E2SL38>>.

GAN, M. A.; RAO, V. B. Energetics of the high frequency disturbances over south America, *Brazilian Journal of Geophysics*, v.17,n.1 p21-27,1999.

GAN, M. A.; DAL PIVA, E. Energetics of a Southeastern Pacific cut-off low. **Atmospheric Science Letters**, v. 14, n. 4, p. 272-280, 2013. DOI: <10.1002/asl2.451>. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/asl2.451>>.

LORENZ, E. N. Available Potential Energy and the Maintenance of the General Circulation, *Tellus*, vol. 7, p. 157-167,1955.

MUENCH, H. S. On the Dynamics of the Wintertime Stratosphere Circulation, *Journal of the Atmospheric Sciences*, V.22, p.340-360, 1965

ORLANSKI, I.; KATZFEY, J. The life cycle of a cyclone wave in the southern hemisphere. part I: eddy energy budget. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.48, n.17 p.1972-1998, 1991..

PIVA, E.D.; GAN, A. M.; RAO, V. B. Energetics of Winter Troughs Entering South America. **Monthly Weather Review**, v. 138, p. 1084-1103, 2010.

APÊNDICE A – PROCEDIMENTO DE INSTALAÇÃO DE DEPENDÊNCIAS

O programa energética depende basicamente de um compilador fortran para permitir sua compilação e execução e alguns programas de visualização, necessários para visualizar os resultados. São estes os programas: Grads e a linguagem Python com as bibliotecas Numpy e Matplotlib. Todos estes aplicativos são bastante comuns e possivelmente o usuário já os tenha instalados em seu computador. Caso ainda não tenha instalado, e deseja-se instalar em sistema Linux Ubuntu pode seguir os procedimentos descritos aqui para uso em terminal de comando, ou se preferir, os procedimentos disponíveis na internet para o seu respectivo sistema operacional.

a) Instalação do gfortran

```
sudo apt-get install gfortran
```

b) Instalação do Grads

```
sudo apt-get install grads
```

c) Instalação do Python e bibliotecas

```
sudo apt-get install python  
sudo apt install python-pip  
sudo pip install --upgrade pip  
sudo python -mpip install matplotlib  
sudo python -mpip install numpy
```