

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Astronomia

Autor

**Ciclo Energético de Ciclones no Atlântico
Sul: Padrões, Modelagem e Interação
Oceano-Atmosfera**

São Paulo

2024

Autor

Ciclo Energético de Ciclones no Atlântico Sul: Padrões, Modelagem e Interação Oceano-Atmosfera

Tese apresentada ao Departamento de Meteorologia do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre/Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Meteorologia

Orientador: Prof. Dr. Pedro Leite da Silva
Dias

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo de Camargo

São Paulo

2024

sua dedicatoria aqui!

Agradecimentos

- Mulher;
- Família;
- Orientadores Pedro Dias e Ricardo de Camargo
- Ex-orientadores: Renato Ramos da Silva, Roberto Carelli Fontes e John Beardall;
- Pesquisadores e professores: Carolina Gramscianinov, Pedro Peixoto, Felipe Bragança Alves;
- Colegas: Matheus Bonjour, Renan Godoy, Maria Luiza Kovalski, e toda equipe do MASTER;
- Suporte técnico: Jean Peres, Djalma, Sebastião e Samuca;
- LNCC: rodadas com SDumont

“一、努力の精神を養うこと”
“*Primeiro, Criar o intuito do esforço*”

Kanga Sakukawa

Resumo

Resumo

Abstract

Abstract

Lista de Figuras

2.1	Massas de ar	23
2.2	Diagrama de fase - Hart	24
2.3	Modelo ciclônico - Bjerknes	25
2.4	Modelos ciclônicos	26
2.5	Efeitos do aquecimento e esfriamento na energia potencial	30
2.6	Energia potencial disponível	31
2.7	Ciclo Energético - Lorenz	34
2.8	Ciclo Energético - Muench	35
2.9	Ciclo Energético - Brennan	37
2.10	Ciclo Energético - Michaelides	39
2.11	LEC Euleriano - problemática	41

Lista de Tabelas

Sumário

1. <i>Introdução</i>	19
1.1 Objetivo e pergunta de pesquisa	19
1.2 Objetivos específicos	19
2. <i>Fundamentos Teóricos</i>	21
2.1 Ciclones extratropicais	21
2.1.1 Introdução e conceitualização	21
2.1.2 Causas materiais	22
2.1.3 Causas formais	24
2.1.4 Causas eficientes	28
2.1.5 Causas finais	28
2.2 Energética Atmosférica	29
2.2.1 Ciclo Energético de Lorenz: Perspectiva Histórica	29
2.2.2 Ciclo de Lorenz Aplicado a Sistemas Ciclônicos	42
2.2.3 Ciclo de Lorenz: Formulação Matemática e Interpretação Física	42
3. <i>Métodos</i>	43
3.1 Fluxograma de atividades	43
3.2 Bases de dados utilizadas	43
3.3 Cálculo do ciclo energético	43
3.4 Determinação dos padrões energéticos	43
3.5 Descrição do MPAS-A	44
3.6 Desenho experimental das simulações	44
3.6.1 Testes de sensibilidade: Furacão Catarina	44

3.6.2	Experimentos com SST	44
4.	<i>Energética dos Ciclones no Atlântico Sul</i>	45
4.1	Características gerais	45
4.2	Padrões energéticos	45
4.3	Limitações, aplicações e passos futuros	46
5.	<i>Modelagem numérica</i>	47
5.1	Testes de sensibilidade: estudo de caso com Furacão Catarina	47
5.1.1	Comparação da pressão mínima em superfície e posição do sistema	47
5.1.2	Precipitação acumulada	47
5.1.3	Ventos em superfície	47
5.1.4	Energética	47
5.2	Experimentos com perturbações no campo de SST	47
5.2.1	Interação oceano-atmosfera	47
5.2.2	Ciclo energético	47
6.	<i>Conclusões</i>	49
	<i>Referências</i>	51
	<i>Apêndice</i>	57
A.	<i>título do apêndice 01</i>	59
A.1	subtítulo 01	59
B.	<i>título do apêndice 02</i>	61

Introdução

1.1 Objetivo e pergunta de pesquisa

- Como a interação oceano-atmosfera afeta a energética de sistemas ciclônicos no Atlântico Sul?

1.2 Objetivos específicos

- Determinar padrões, através do Ciclo Energético de Lorenz, para os ciclones atuantes no Atlântico Sul dentre o período 1979-2020;
- Avaliar qual o conjunto de parametrizações microfísicas e de convecção propiciam que o modelo MPAS-A apresente simulações mais realistas do Furacão Catarina, em diferentes estágios de desenvolvimento do sistema;
- Determinar o impacto das diferentes configurações do modelo na energética do sistema;
- Avaliar o impacto da perturbação da temperatura da superfície do mar na energética de sistemas ciclônicos atuantes no Atlântico Sul, através do estudo de casos representativos

Fundamentos Teóricos

2.1 *Ciclones extratropicais*

2.1.1 *Introdução e conceitualização*

Para que um fenômeno seja propriamente analisado e estudado, é necessário que primeiro este seja definido apropriadamente. O Glossário de Meteorologia, da American Meteorological Society (2012) define o termo "ciclone" como (tradução livre): "Uma circulação ciclônica atmosférica, uma circulação fechada. A direção de rotação de um ciclone (anti-horária no Hemisfério Norte) é oposta à de um anticiclone. (...) Como a circulação ciclônica e a baixa pressão atmosférica relativa geralmente coexistem, na prática comum os termos ciclone e baixa são usados de forma intercambiável. Além disso, como os ciclones são quase sempre acompanhados por tempo inclemente (muitas vezes destrutivo), eles são frequentemente referidos simplesmente como tempestades." A partir desta definição, os ciclones são comumente separados em subtipos relacionados ao seu local de ocorrência, sendo agrupados em ciclones tropicais, extratropicais e subtropicais (Reboita et al., 2017, e.g.). Tal simplificação no processo de classificação dos sistemas é justificada através da assunção de que ao longo das mesmas faixas de latitudes os ambientes de gênese e processos dinâmicos de manutenção dos ciclones são similares.

Como podemos ver, a definição apresentada é relativamente vaga, carecendo de critérios objetivos. Desta forma, nas seguintes seções, será utilizada a abordagem aristotélica para a explicação de fenômenos físicos (Aristotle e Aristotle, 1933). As causas aristotélicas são um conceito fundamental na filosofia de Aristóteles, usadas para explicar a razão ou origem de ser de uma coisa. Aristóteles identificou quatro tipos de causas que, juntas, procuram fornecer uma explicação completa para a existência de um objeto ou fenômeno, são essas:

causa material, causa formal, causa eficiente e causa final. Nas próximas subseções, o conceito por trás de cada causa é explicado e aplicado com o objetivo de possibilitar uma melhor compreensão dos fenômenos associados. Ao final desta seção, os conceitos são recapitulados e uma definição, sintetizando os conceitos apresentados, é proposta.

2.1.2 Causas materiais

A causa material refere-se à substância ou material do qual algo é feito. É a matéria ou substância física que compõe um objeto, proporcionando a base ou o meio pelo qual algo pode existir. Por exemplo, a madeira é a causa material de uma mesa, e a água é a causa material de um rio. No contexto de sistemas ciclônicos, as causas materiais seriam as massas de ar que integram tais sistemas.

O termo massa de ar foi inicialmente proposto pelo meteorologista sueco Tor Bergeron, em 1928 (Stull, 2015). Bergeron define uma massa de ar como um corpo de ar com propriedades uniformes, entendendo-se sob uma área de 500 a 5000 km na atmosfera, preenchendo a troposfera em sua totalidade vertical. Estas podem ser diferenciadas por suas temperaturas, teor de umidade, estratificação e grau de turbidez.

Além disso, diferentes massas de ar possuem regiões fontes distintas, i.e., regiões onde as massas de ar são formadas. A superfície da região fonte afeta profundamente as características da massa de ar que se desenvolve sob ela, de modo que para tal, é necessário uma superfície plana, sob ação de ventos fracos (Donald Ahrens e Henson, 2015). Como a transferência de calor entre a superfície e o ar trata-se de um processo lento, é necessário que a massa de ar permanecia estacionária por períodos prolongados de tempo sob uma mesma superfície para que esta adquira suas características (Spiridonov e Čurić, 2021). Consequentemente, as latitudes médias não são boas regiões geradoras de massas de ar, visto que estas são regiões onde as variáveis meteorológicas variam consideravelmente e onde há notavelmente a presença de ventos fortes.

A classificação de Bergeron é o método mais aceito para a classificação de massas de ar distintas. Este envolve o uso de letras para descrever o teor de umidade das massas de ar e sua região fonte (Spiridonov e Čurić, 2021). A primeira letra indica se a massa de ar possui origem continental (seca) ou marítima (úmida), enquanto que a segunda indica se a região fonte é tropical (T), polar (P), ártica/antártica (A), equatorial (E) ou proveniente de monção (M). Uma representação da distribuição espacial das massas de ar

encontra-se na Figura 2.1. Quando duas massas de ar de características distintas encontram-se não há uma mistura imediata, mantendo uma descontinuidade na intersecção de ambas as massas por algum tempo (Spiridonov e Čurić, 2021; Donald Ahrens e Henson, 2015). Essas descontinuidades são chamadas de frentes.

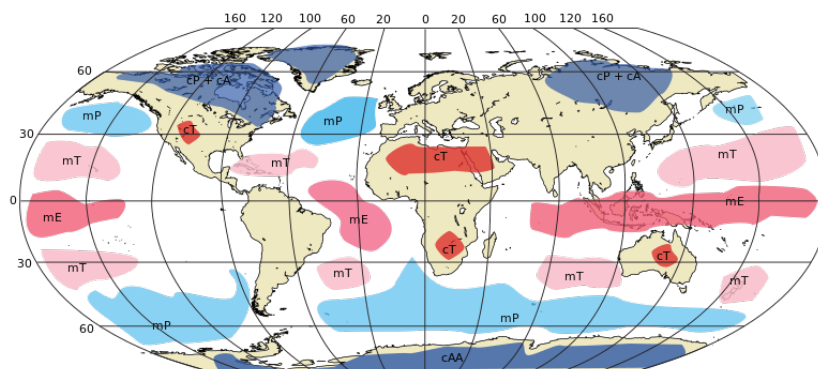


Figura 2.1: Distribuição espacial das massas de ar, de acordo com a classificação de Bergeron. Crédito: domínio público (<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=12526643>).

Desse modo, para que classificação comumente proposta para ciclones, separando-os em tropicais, extratropicais e subtropicais seja válida, temos que diferentes tipos de ciclones devem apresentar causas materiais distintas. Ou seja, os diferentes tipos de ciclones devem ser formados por massas de ar distintas. No caso de ciclones tropicais, estes são relacionados a núcleos quentes e úmidos, tendo sua gênese sob águas tropicais quentes (Gray, 1968; Frank, 1977; Ramage, 1959; Riehl, 1948). Enquanto isso, os ciclones extratropicais estão relacionados a zonas frontais, onde há intersecção entre duas massas de ar distintas (Bjerknes e Holmboe, 1944; Shapiro e Keyser, 1990), mas são comumente associados a núcleos frios (Hart, 2003). Entretanto, em casos de ciclones extratropicais marinhos intensos, pode ocorrer seclusão quente, de modo que no centro do sistema haja um núcleo quente (Hart, 2003; Shapiro e Keyser, 1990). Os ciclones subtropicais, por sua vez, apesar de apresentarem estruturas (ligadas às causas formais, discutidas na seção 2.1.3) híbridas entre os sistemas tropicais e extratropicais, apresentam núcleos quentes e úmidos, similar aos sistemas tropicais, porém menos pronunciados, i. e., menos profundos (Hart, 2003).

Essa relação entre a temperatura e profundidade do núcleo dos sistemas ciclônicos é elaborada no diagrama de fase proposto por Hart (2003), simplificado na Figura 2.2. Neste, as abscissas representam diferença entre o vento térmico em 900 hPa e 600 hPa ($-V_T^L$), de maneira a indicar a estrutura térmica do núcleo do sistema em baixos níveis. Enquanto

isso, as ordenadas representam a diferença entre o vento térmico em 600 hPa e 300 hPa ($-V_T^U$), indicando a estrutura térmica do núcleo em altos níveis. Combinando ambas informações, é possível identificar se o sistema possui núcleo quente ou frio e se este é raso ou profundo. Na Figura 2.2 também está representada a localização típica, representativa de diferentes tipos ciclônicos, dentro do diagrama de fase. Como Hart (2003) menciona, o mesmo sistema pode migrar de posição no diagrama durante sua evolução, de forma que a figura é apenas representativa para cada tipo de sistema. Além do mais, o autor propõe, em conjunto com o diagrama de fase apresentado, um diagrama indicativo da estrutura horizontal dos sistemas, ligado às causas formais dos sistemas ciclônicos, o que será discutido na seção 2.1.3.

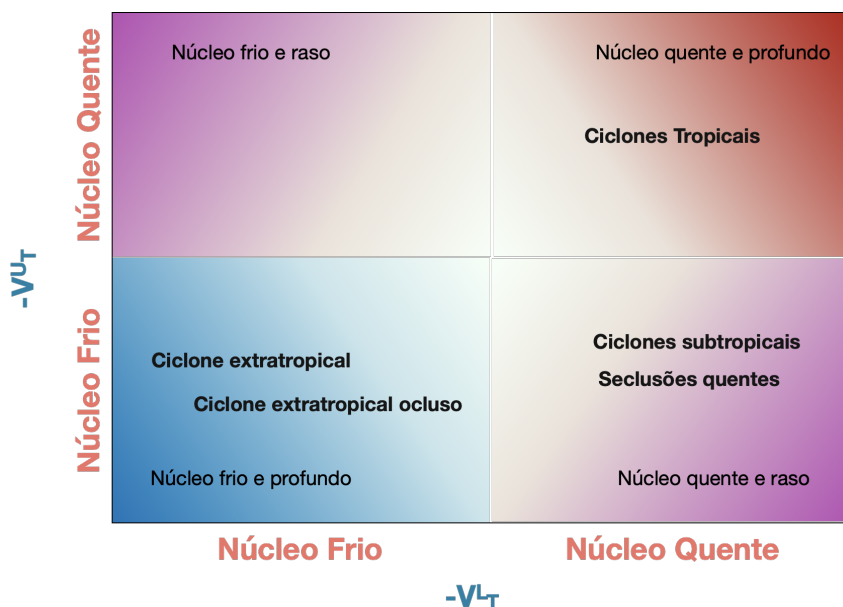


Figura 2.2: Diagrama de fase, demonstrando a relação da temperatura do núcleo dos sistemas ciclônicos e suas distintas classificações. Adaptado de (Hart, 2003).

2.1.3 Causas formais

A causa formal diz respeito à forma ou essência de uma coisa, o que determina sua identidade ou natureza. Esta causa é o design, estrutura ou conceito que define algo como sendo de um certo tipo. Voltando ao exemplo do caso de uma mesa, proposto na seção 2.1.2, sua forma é o design que a configura como mesa e não como cadeira. Para os ciclones, a causa formal seria a estrutura organizacional do sistema, incluindo a disposição de bandas de convecção e/ou frentes e o padrão de baixa pressão.

Os ciclones extratropicais são muitas vezes associados à latitudes médias e estruturas frontais. Estes possuem um diâmetro médio variando entre aproximadamente 1200 e 1800 km, que varia ao longo de seu ciclo de vida, de modo que o ciclone cresce em até 150% em diâmetro durante sua intensificação (Simmonds, 2000; Rudeva e Gulev, 2007). Entretanto, o fato destes sistemas apresentarem estruturas espaciais complexas e não coesas, variando inclusive ao longo de seu ciclo de vida, faz com que hajam dificuldades metodológicas para estabelecer tais estimativas realizar comparações entre estudos analisando esta métrica.

O primeiro modelo acerca do processo de formação de ciclones extratropicais e, respectivamente, sua estrutura horizontal, foi proposto por Bjerknes (1919) e está representado na Figura 2.3. Neste, temos o deslocamento do ciclone representado pela linha horizontal ao centro do sistema. A "linha de direção" (*steer line*) refere-se à fronteira que influencia a direção do movimento do ciclone, onde à sua esquerda encontra-se massas de ar quente. A "linha de rajada" (*squall line*) é uma zona de intensa atividade meteorológica com ventos fortes e, frequentemente, precipitação pesada, possuindo massas de ar frio à sua esquerda. O "precursor" (*fore runner*) está com uma região de difluência do escoamento.

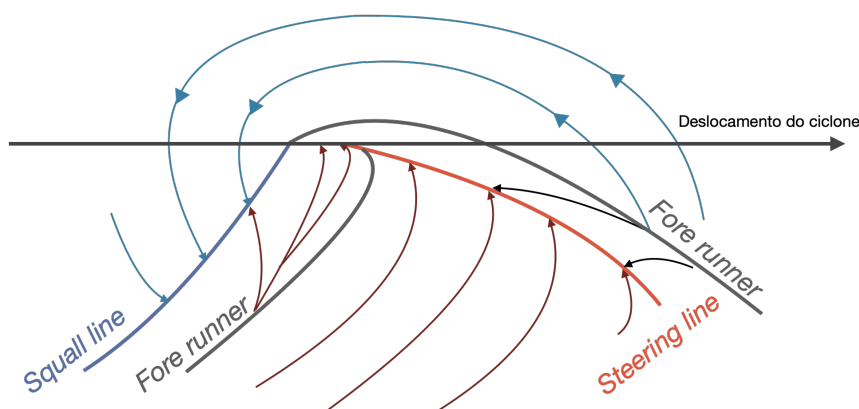


Figura 2.3: Modelo ciclônico proposto por Bjerknes (1919), mostrando as linhas de escoamento em um ciclone móvel. As linhas azuis estão relacionadas com ar frio, enquanto que as vermelhas, com ar quente. Adaptado de Bjerknes (1919).

Bjerknes e Solberg (1922) perceberam que o modelo proposto em Bjerknes (1919) tratava-se apenas de uma fase do ciclo de vida dos ciclones, de modo que há vários estágios de desenvolvimento. Bjerknes e Solberg (1922) estabelece a Teoria da Frente Polar, que é a base da chamada escola norueguesa de ciclones. Schultz et al. (1998) sintetiza e descreve o desenvolvimento de ciclones extratropicais segundo essa teoria, de modo que uma representação visual da estrutura horizontal em superfície durante distintos estágios de

evolução dos ciclones encontra-se na Figura 2.4a. No primeiro estágio, o ciclone incipiente apresenta uma frente fria estreita e longa, e uma frente quente larga e curta (Figura 2.4aI). Após isso o ciclone aprofunda-se, ocorrendo um estreitamento da seção quente do ciclone através da rotação da frente fria em direção à frente quente (Figura 2.4aII). Como o ar frio é mais denso e, logo, propicia gradientes horizontais de pressão mais intensos, este move-se mais rápido que o ar quente. À medida que o ar frio na dianteira do ciclone se aproximado ar frio da retaguarda do sistema (Figura 2.4aIII), ocorre o aprisionamento do ar quente no centro do sistema, fenômeno chamado de seclusão quente. Conforme a frente fria continua deslocando-se, o ar quente em superfície é tomado pelo ar frio e é forçado a ascender para níveis superiores. Esse processo é denominado de oclusão, sendo responsável pelo aprisionamento do ar frio no núcleo do sistema (Figura 2.4aIV). Com a continuação da oclusão, a baroclinicidade ao longo da frente quente pode se tornar tão difusa que o ciclone aparenta não ter uma frente quente bem definida.

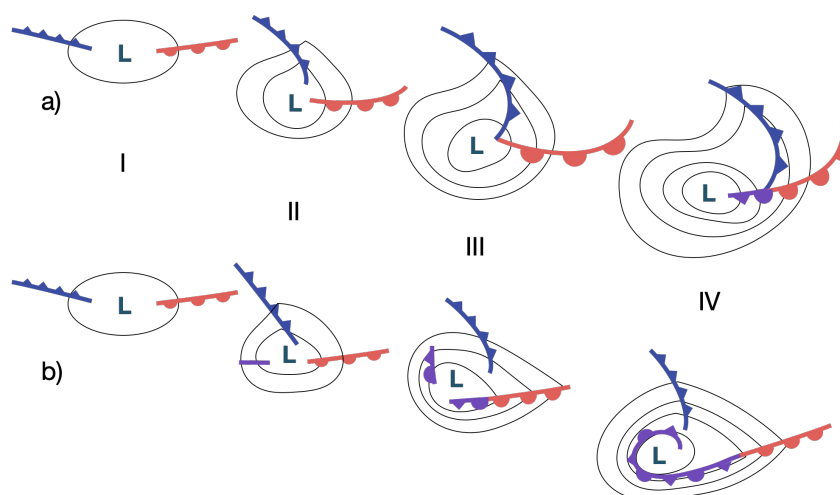


Figura 2.4: Modelos ciclônicos propostos por Bjerknes (1919) (a) e Shapiro e Keyser (1990) (b), mostrando a estrutura horizontal dos sistemas em diferentes estágios de desenvolvimento (I a IV). Adaptado de Schultz et al. (1998).

À luz de novas observações, muito mais abundantes após os avanços da era satelital, Shapiro e Keyser (1990) propuseram um novo modelo ciclônico, visto que nem todos os ciclones observados seguiam o modelo proposto pela escola norueguesa. Este modelo, chamado de Shapyro-Kayser, também é sintetizado e descrito por Schultz et al. (1998), de modo que sua representação visual encontra-se na (Figura 2.4b). Neste, o desenvolvimento inicial é igual ao proposto por Bjerknes e Solberg (1922) (Figura 2.4bI). Porém, neste

caso, a frente fria ao invés de circundar o sistema, corre perpendicularmente à frente quente (Figura 2.4bII). À medida que o sistema se intensifica, o lado polar da frente fria é enfraquecido, de modo que a frente quente começa a circundar setor oeste do sistema (Figura 2.4bIII). No momento de intensidade máxima do sistema, o ar frio circunda o ar quente próximo ao centro do ciclone, aprisionando o ar quente e formando uma seclusão quente (Figura 2.4bIV).

Schultz et al. (1998) deixa claro que ambos os modelos não são excludentes, mas sim complementares. O autor conclui que o modelo norueguês aplica-se tipicamente à sistemas com gênese sob escoamento difluente, onde o estado base possui escoamento de grande amplitude. Sistemas que apresentam esse tipo de desenvolvimento geralmente encontram-se na porção temrinal das *storm tracks*, na borda oeste dos continentes, apresentando um alongamento meridional do ciclone e frentes associadas. Por sua vez, o modelo Shapyyro-Kayser aplica-se tipicamente à sistemas com gênese sob escoamento confluyente de baixa amplitude do escoamento base. No geral, estes sistemas apresentam um alongamento no sentido da frente quente (leste-oeste). Entretanto, apenas esses dois modelos não explica a totalidade das causas formais apresentadas pelos ciclones extratropicais, de modo que há um continuum, onde diferentes sistemas podem apresentar características mais próximas de um modelo ou de outro (Schultz et al., 1998).

Por sua vez, os ciclones tropicais são baixas que não apresentam estruturas frontais, possuindo uma circulação organizada e simétrica próxima à superfície (Frank, 1977; Gray, 1968). Estes sistemas formam-se sob águas quentes tropicais ou subtropicais, possuindo ventos intensos sob a superfície (Ramage, 1959; Riehl, 1948). Assim como os ciclones extratropicais, seu tamanho diâmetro varia, podendo atingir de 100 a 1000 km no estágio maduro e até 2000 km durante sua intensificação (Spiridonov e Čurić, 2021). Entretanto, a região de intensa convecção e ventos mais intensos possui uma extensão horizontal mais restringida, se entendendo geralmente por um raio de 100 km (Holton, 1973).

Os ciclones tropicais são constituídos por uma circulação ciclônica central na baixa troposfera, e anticiclônica na alta troposfera, associados a intensa precipitação e gradientes horizontais de pressão, causando ventos espiralados próximos à superfície terrestre, que tornam-se circulares mais próximos ao centro (olho) do sistema (Frank, 1977; Terry, 2007). Os gradientes de pressão (e, conseqüentemente, os ventos) também costumam ser mais intensos do que nos ciclones extratropicais (Spiridonov e Čurić, 2021). Dependendo

da velocidade do vento, os ciclones tropicais são classificados em: depressões tropicais (cujas velocidades máximas do vento são inferiores a 60 km/h), tempestades tropicais (quando a velocidade máxima do vento varia entre 60 e 110 km/h) e ciclones tropicais (quando a velocidade máxima do vento excede 110 km/h) (Spiridonov e Ćurić, 2021). Além disso, esses sistemas possuem variabilidade em sua nomenclatura: na região Norte e no Pacífico Norte, os ciclones tropicais são chamados de "furacões"; na região do Pacífico Norte Ocidental, são denominados "tufões", enquanto na região do Oceano Índico, são conhecidos como "ciclones" (Donald Ahrens e Henson, 2015).

- Estrutura horizontal e vertical de furacões
- Ciclones subtropicais: híbridos entre extratropicais e tropicais
- Relação com o diagrama de fase do Hart: simetria como indicador objetivo da causa formal dos ciclones.

2.1.4 *Causas eficientes*

A causa eficiente é o agente ou processo que produz algo ou dá origem a uma mudança. É o "como" ou "por que" algo acontece, abrangendo os processos ou ações que resultam na existência de algo. No exemplo da mesa, o carpinteiro seria a causa eficiente. No caso de ciclones, a causa eficiente abrange os processos físicos e dinâmicos que levam à formação e manutenção dos mesmos. Em uma última análise, esses processos podem ser entendidos como os mecanismos de instabilização que levam ao surgimento das perturbações e, conseqüentemente, da configuração ciclônica.

2.1.5 *Causas finais*

Refere-se ao propósito ou objetivo para o qual algo existe, a razão de ser de uma coisa. A causa final é o "para quê" de algo, o objetivo ou função que cumpre. Para uma mesa, a causa final é fornecer uma superfície para atividades como escrever, comer ou trabalhar. No caso dos ciclones, a causa final poderia ser interpretada como a redistribuição de calor e umidade na atmosfera, contribuindo para o equilíbrio climático global, ou mecanismos de dissipação de excesso de calor.

2.2 Energética Atmosférica

A radiação solar é a fonte primária de energia no sistema terrestre. Ao mesmo tempo, ao redor de todo o globo, a atmosfera perde calor por emissão de radiação infravermelha para o espaço. Devido à inclinação do eixo de Terra, há uma diferença na incidência radiativa entre as regiões tropicais e polares: nas regiões equatoriais, a superfície terrestre recebe mais energia solar do que perde para o espaço, resultando em um excedente de energia, enquanto que, nas regiões polares, ocorre o contrário; a superfície perde mais energia para o espaço do que recebe, levando a um déficit de energia. Isso faz com que haja um aquecimento diferencial e, levando em conta a transmissão de calor da superfície para a atmosfera, há a formação de massas de ar quentes nas regiões tropicais e massas de ar frias na região equatorial. Esse desbalanço de calor é responsável pela manutenção da circulação atmosférica, que surge como um mecanismo para obtenção do equilíbrio, que nunca é atingido devido ao contínuo aquecimento diferencial entre as regiões tropicais e polares Stull (2015).

2.2.1 Ciclo Energético de Lorenz: Perspectiva Histórica

O Ciclo Energético de Lorenz (Lorenz, 1955) é um conceito fundamental para entender a distribuição e transformação de energia na atmosfera, fornecendo uma perspectiva da circulação geral onde esta é responsável por modular a estrutura dinâmica e termodinâmica da atmosfera e os fluxos e transportes atmosféricos de calor, umidade e momento angular. Em seu trabalho, Lorenz propôs um método para estudar a energética da atmosfera baseado nas duas principais formas que a energia pode assumir no sistema terrestre: energia cinética (*Kinetic Energy* - K) e energia potencial disponível (*Available Potential Energy* - APE), sendo estas particionadas em suas formas zonais e turbulentas. Nos próximos parágrafos serão abordados os conceitos por trás dessas formas de energia e como estas relacionam-se entre si.

Lorenz (1955) discute que a energia potencial total (*Total Potential Energy* - P) não é uma medida adequada da quantidade de energia que estaria disponível para a conversão em K na atmosfera e, então, alimentar a circulação global. Ele propõe o seguinte experimento mental para exemplificar essa questão: Digamos que a atmosfera esteja horizontalmente estratificada globalmente; neste caso, apesar de haver P, por conta da ausência de gra-

dientes horizontais não há movimento das massas de ar e, conseqüentemente, não há K (Figura 2.5a). Caso haja aquecimento de alguma área na atmosfera, ocorrem movimentos verticais ascendentes, criando gradientes de pressão e, conseqüentemente, a estratificação horizontal se desfaz (Figura 2.5b). Entretanto, caso haja algum resfriamento em alguma região, ocorre o mesmo processo descrito anteriormente, porém, neste caso, os movimentos verticais são descendentes (Figura 2.5c). Em ambos os casos, há alteração em P do sistema, que é convertido em K. Porém, no primeiro caso P aumenta, enquanto que no segundo, diminui, ou seja, tanto adição quanto remoção de P são responsáveis por fazer com que energia fique disponível para a circulação atmosférica.

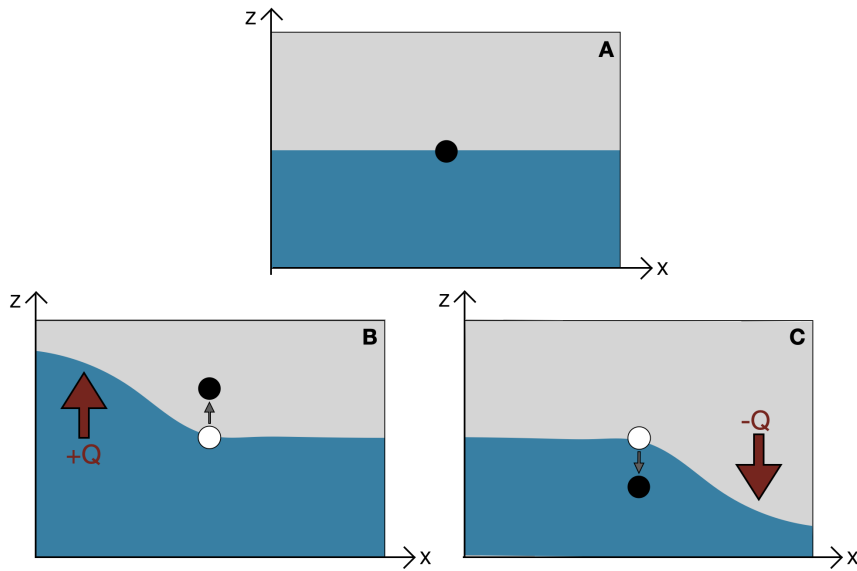


Figura 2.5: Experimento mental proposto por Lorenz (1955) para demonstrar a relação entre P total e K, onde temos a representação de uma atmosfera com duas camadas. A) atmosfera horizontalmente estratificada. B) Perturbação na estratificação horizontal causada por aquecimento (+Q) em uma determinada região, causando movimentos verticais ascendentes. C) Mesmo que B), mas causada por esfriamento (-Q) e causando movimentos verticais descendentes. Os círculos pretos representam o centro de massa da atmosfera, enquanto que os círculos brancos representam o centro de massa anterior à perturbação.

O conceito de APE foi inicialmente proposto por Margules (1903), que estava interessado nos processos que geram K em tempestades (Marquet, 2017). Para entendermos esse conceito, podemos partir da mesma situação proposta por Lorenz (1955), onde há um aquecimento diferencial, resultando em movimentos ascendentes e uma distribuição heterogênea de massa na atmosfera (Figura 2.6a). Nesse caso, os gradientes de pressão resultantes dessa distribuição fazem com que haja aceleração do campo de vento (Figura

2.6b), redistribuindo a massa na atmosfera. Assumindo que esse fluxo seja adiabático, o resultado final é uma atmosfera horizontalmente estratificada (Figura 2.6c). No primeiro passo, ambas formas de energia potencial (total e disponível) são máximas. Com a redistribuição de massa, ocorre aumento da K , enquanto que as energias potencial total e disponível sofrem diminuições. No estágio final, P é mínimo, porém não nula, enquanto que a APE é nula. Desse modo, APE pode ser definida como a quantidade de energia potencial disponível para a conversão em K sob uma distribuição adiabática de massa.

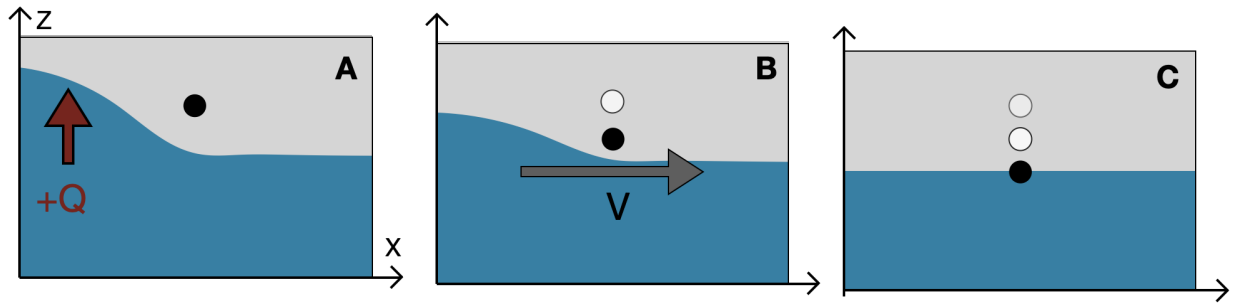


Figura 2.6: Esquema representando o conceito de energia potencial disponível (APE). A) Estado da atmosfera, onde aquecimento diferencial causa uma distribuição heterogênea de massa na atmosfera. B) Redistribuição e homogeneização da massa pelo campo de vento. C) Estado final, onde há estratificação horizontal da atmosfera. Os círculos pretos representam o centro de massa da atmosfera no momento indicado, enquanto que os círculos brancos representam o centro de massa em instante de tempo anteriores.

Deste modo, Lorenz (1955) postula que a APE é a fonte fundamental de K na atmosfera, e, conseqüentemente, a circulação geral da atmosfera pode ser em grande parte explicada pelos processos que envolvem a geração, dissipação e conversão destas formas de energia. O termo 'em grande parte' é utilizado pois processos não-adiabáticos e a fricção também influenciam a circulação atmosférica. Entretanto, tais processos não são detalhadamente abordados em seu trabalho, devido à complexidade envolvida e à dificuldade de estimar e mensurar esses fenômenos. Assim, em seu estudo, Lorenz (1955) utiliza um modelo idealizado da atmosfera para desenvolver a formulação matemática que descreve os processos pelos quais a APE é transformada em K e, conseqüentemente, impulsiona a circulação atmosférica. É importante notar que nesta formulação a atmosfera é tratada como um sistema fechado, e que, tanto a APE quanto a K são particionadas em suas componentes zonais e *eddies* (turbulentas). Isso é feito por diversas razões. Na década anterior, Starr (1953) já havia demonstrado a importância dos turbilhões para a manutenção da circulação atmosférica, em especial, na transferência de K destes para o fluxo zonal, ao contrário do

que se acreditava anteriormente. Starr (1953) ainda comenta que qualquer teoria geral da circulação atmosférica que desconsidere a ação dos turbilhões seria deficiente e desconexa da realidade. Além disso, a Lorenz (1955) faz essa separação para possibilitar o entendimento dos processos relacionados à formação e manutenção de sistemas meteorológicos (por exemplo, sistemas ciclônicos) e como estes influenciam a circulação atmosférica. Posteriormente, Wiin-Nielsen et al. (1963), demonstrou a importância dos turbilhões para o transporte de calor e momento globais, mostrando as contribuições diferentes de cada número de onda para os balanços globais.

Dessa forma, o ciclo energético pode ser representado pelas seguintes equações, representando o balanço energético para cada componente do ciclo:

$$\frac{\partial A_Z}{\partial t} = -C_Z - C_A + G_Z \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial A_E}{\partial t} = -C_E + C_A + G_E \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial K_Z}{\partial t} = C_Z - C_K - D_Z \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial K_E}{\partial t} = C_E + C_K - D_E \quad (2.4)$$

Neste conjunto de equações, APE está particionada em sua forma zonal (A_Z) e turbulenta (A_E), tal como K (K_Z e K_E , respectivamente) e ambos estão representados pelas tendências temporais ao invés dos termos explícitos de energia, de modo a fechar um balanço completo. Os processos de conversão entre as quatro formas de energia são indicados pela letra C, com os sobrescritos Z e E indicando a conversão entre as formas zonais e turbulentas de energia, enquanto que A e K indicam conversões entre as componentes zonais e turbulentas de APE e K. Ou seja, a conversão entre A_Z e A_E é dada por C_A , a conversão entre A_E e K_E é dada por C_E , a conversão entre K_E e K_Z é dada por C_K e, por fim, a conversão entre A_Z e K_Z é dada por C_Z . Similarmente, os termos de geração de APE e dissipação de K, que são indicados pela letra G e D. Desse modo, G_Z e G_E indicam geração de A_Z e A_E , respectivamente, enquanto que D_Z e D_E indicam a dissipação de D_Z e D_E , respectivamente. As formulações matemáticas completas para cada expressão são apresentadas e discutidas na seção 2.2.3.

Após o trabalho de Lorenz (1955), diversos trabalhos surgiram com a finalidade de realizar estimativas do ciclo energético global - ou pelo menos, do hemisfério norte, dada

as limitações observacionais da época (Starr, 1959; Saltzman e Fleisher, 1961; Holopainen, 1964; Jensen, 1961; Brown Jr, 1964; Wiin-Nielsen, 1959, e.g.). Oort (1964) compilou resultados das estimativas disponíveis, com o objetivo de estabelecer uma representação do ciclo energético anual do Hemisfério Norte. Ele também dividiu a análise energética em 'domínios' distintos. O primeiro é o domínio espacial, onde as variáveis são analisadas a partir de médias espaciais, relacionadas com a manutenção e comportamento de estados zonais médios e perturbações zonais. Esse domínio permite o entendimento de padrões zonais de larga escala, como jatos e ventos de oeste. O segundo é o domínio temporal, onde são realizadas médias e desvios temporais, relacionados com a manutenção de estados temporais médios e perturbações passageiras, permitindo o entendimento de tendências de longo prazo e fenômenos de baixa frequência. Por último, o domínio misto espaço-tempo permite uma análise integrada dos fenômenos atmosféricos, fornecendo uma perspectiva sobre como os estados médios espaço-temporais e a soma das perturbações, tanto passageiras quanto estacionárias, são mantidos. Entretanto, o autor ressalta que, em sua época, a maioria dos estudos se concentrava em estimativas energéticas para o domínio espacial, com poucos estudos abordando o domínio misto, enquanto havia uma carência de estudos considerando o domínio temporal.

A partir dessas estimativas, Oort (1964) estabelece um diagrama que fornece uma representação visual do ciclo energético encontrado (Figura 2.7). O diagrama demonstra visualmente como as diferentes formas de energia são geradas, convertidas e dissipadas, sintetizando os processos dinâmicos em formato gráfico e didático. Além disso, tal representação permite uma fácil comparação de diferentes resultados. É importante ressaltar que, como mencionado pelo autor, os termos de fricção não podem ser diretamente computados e portanto são obtidos como resíduos, através do balanço para os termos zonais e turbulentos de K .

Como mencionado anteriormente, a formulação proposta por Lorenz (1955) estima a energética da atmosfera assumindo um sistema fechado, isto é, sem trocas de energia nas fronteiras. O primeiro estudo a considerar a energética para um sistema aberto foi feito por Reed et al. (1963), onde um evento de aquecimento estratosférico repentino no Hemisfério Norte foi analisado. Neste estudo, a estratosfera foi considerada como um sistema aberto, permitindo trocas de energia com outras camadas atmosféricas, como a troposfera. A partir deste estudo, Muench (1965), interessado na dinâmica estratosférica, progrediu na

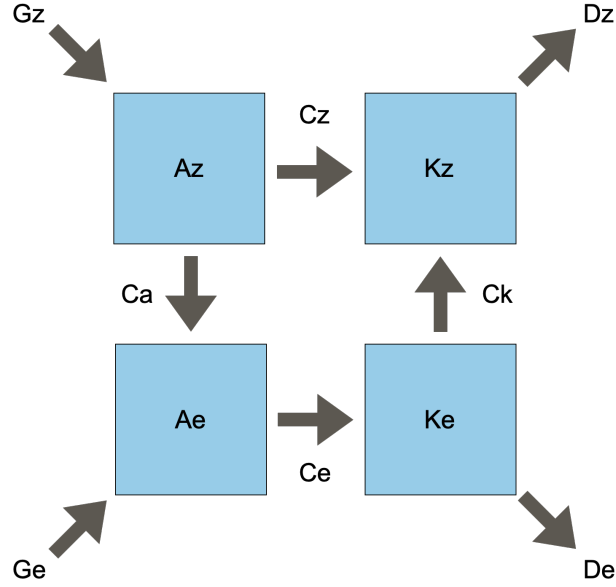


Figura 2.7: Ciclo Energético tal como formulado por Lorenz (1955) e esquematizado por Oort (1964). Nele, temos as quatro formas distintas de energia, representadas pelos termos zonais e turbulentos de K e APE, tal como as conversões dentre as respectivas formas de energia, e seus termos de geração e dissipação.

teoria formulada por Lorenz (1955) e propôs uma nova representação do ciclo energético.

A Figura 2.8 contém a representação do ciclo energético, tal como apresentado por Muench (1965). A principal diferença desta figura para a Figura 2.7 está no fato do autor apresentar os termos que representam o fluxo de energia através das fronteiras, representados pela letra B. Desse modo, as equações para o balanço energético podem ser atualizadas para:

$$\frac{\partial A_Z}{\partial t} = BA_Z - C_Z - C_A + G_Z \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial A_E}{\partial t} = BA_E - C_E + C_A + G_E \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial K_Z}{\partial t} = BK_Z + C_Z - C_K + B\Phi_Z - D_Z \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial K_E}{\partial t} = BK_E + C_E + C_K + B\Phi_E - D_E \quad (2.8)$$

Onde BA_Z , BA_E , BK_Z e BK_E representam, respectivamente, os fluxos de APE e K zonal e turbulento, através das fronteiras. Os termos $B\Phi_Z$ e $B\Phi_E$ aparecem representados em conjunto com os termos C_Z e C_E , respectivamente, pois ambos surgem do mesmo processo de derivação dos balanços de K_Z e K_E . Muench (1965) reconhece a dificuldade

na interpretação dos termos $B\Phi_Z$ e $B\Phi_E$, indicando que estes estão relacionados ao fluxo de energia cinética em direção a altitudes menores, representando o aparecimento de energia cinética nas fronteiras do domínio computacional.

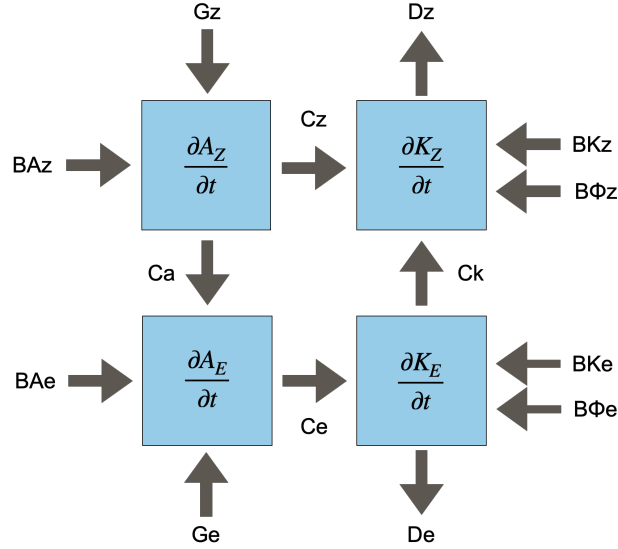


Figura 2.8: Ciclo Energético tal como formulado por Lorenz (1955), após os avanços de Muench (1965). Além das formas de energia contidas na 2.7, temos as derivadas locais das partições zonais e turbulentas de APE e K, além dos termos relacionados a fluxos de energia nas fronteiras.

Apesar de considerar os fluxos de energia através das fronteiras, o domínio adotado por Muench (1965) era apenas parcialmente aberto, visto que se estendia até a região polar e longitudinalmente englobava todo o hemisfério norte. Deste modo, a única fronteira estava na porção sul do domínio, em 30°N . Uma derivação do ciclo energético para regiões limitadas foi apenas apresentada em Smith (1969). Porém, neste trabalho, o autor deixa claro que seu objetivo é apresentar uma formulação que permitisse avaliar contribuição de uma região limitada para a energética global, sendo que uma forma exata de computar a energética local estaria além do escopo de seu trabalho. Além disso, o autor não particiona as formas de APE e K em suas componentes zonais e turbulentas.

Paralelamente ao trabalho apresentado por Smith (1969), Johnson (1970), a partir da formulação proposta por Dutton e Johnson (1967), apresenta uma derivação para o ciclo energético de áreas limitadas a partir de um referencial semi-Lagrangiano. Ou seja, a área delimitada para que sejam realizados os cálculos da energética não é fixa, seguindo o sistema meteorológico de interesse através de N áreas fixas que se deslocam no espaço. Essa análise demonstra que a APE global é o resultado do somatório de todas as regiões abertas

possíveis na atmosfera, mais uma componente representando o contraste termodinâmico de tais regiões. Além disso, é importante ressaltar que Smith (1969); Dutton e Johnson (1967) discutem que ao analisar a APE de uma região limitada, esta deve ser interpretada como a contribuição da região para a energética global e não como a APE contida dentro da região em si. Isso se deve ao fato da dificuldade que há em definir a APE para um região em específico ou tempestade individual em isolamento da APE global: dado que a atmosfera está interconectada, a energética global afeta as regiões/sistemas individuais (i.e., estes não estão isolados) e vice-versa.

O trabalho de Dutton e Johnson (1967) oferece uma crítica à uma formulação de Lorenz (1955), demonstrando que, em uma escala global, sua formulação subestima APE, principalmente no inverno. Entretanto, o conjunto de equações proposto por Johnson (1970) é desenvolvido para um sistema de coordenadas isentrópicas e, como notado por Vincent e Chang (1973), esse fator acaba acarretando em uma série de simplificações indesejadas (como assumir que a contribuição de aquecimento diabático é negligenciável), de modo a inviabilizar o uso desta formulação como diagnóstico para o balanço de energia.

Vincent e Chang (1973), então, a partir das contribuições apresentadas por Smith (1969), desenvolve um sistema de equações, em coordenadas isobáricas, para os balanços de APE e K , para um sistema aberto na atmosfera a partir de um referencial semi-Lagrangiano. Neste trabalho, a APE é particionada na APE do estado de referência para esta determinada região e duas componentes representando as contribuições barotrópicas e baroclínicas para a APE da região delimitada. Não obstante, no balanço de APE, surge um termo relacionado com o movimento das fronteiras no referencial semi-Lagrangiano e a respectiva advecção de massas de ar com diferentes propriedades através das fronteiras.

A formulação apresentada por Vincent e Chang (1973) foi utilizada por Edmon e Vincent (1979) para analisar o ciclo energético do Furacão Carmen (1974). Porém, somente em Brennan e Vincent (1980), também interessados na energética do Furacão Carmen, que a análise do ciclo de energia proposta por Vincent e Chang (1973) foi apresentada utilizando uma formulação particionada em componentes zonais e turbulentas. O trabalho de Brennan e Vincent (1980) é, então, o primeiro oferecer um conjunto de equações regais, aplicáveis a uma área limitada na troposfera, onde APE e K são particionadas em suas componentes zonais e turbulentas. Entretanto, Brennan e Vincent (1980) optam pelo uso da tradicional abordagem euleriana para a análise energética.

Não obstante, Brennan e Vincent (1980) oferecem uma nova interpretação para os termos $B\Phi_Z$ e $B\Phi_E$. Menciona-se que estes são resultado do trabalho exercido pelas componentes zonais e meridionais do vento contra a pressão atmosférica, nas fronteiras do domínio computacional. Assim como em Oort (1964), os termos de fricção não são calculados diretamente, mas sim estimados à partir do balanço energético. Além disso, Brennan e Vincent (1980) mencionam que os resultados obtidos para $B\Phi_Z$ e $B\Phi_E$ são excepcionalmente grandes e irreais. Isso é devido ao fato de que pequenos erros no campo de altura geopotencial podem resultar em grandes erros nestes termos. Sendo assim esses termos foram combinados junto com os termos de dissipação (D_Z e D_E) e calculados como resíduos do balanço de K_Z e K_E , formando assim os termos RK_Z e RK_E . O ciclo energético revisado a partir deste avanço pode ser encontrado na Figura 2.9.

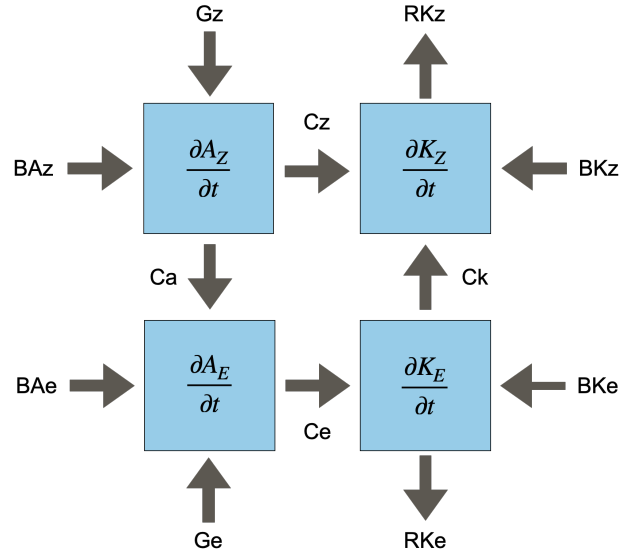


Figura 2.9: Ciclo Energético tal como formulado por Lorenz (1955), após os avanços de Brennan e Vincent (1980). Neste, os termos de fronteira $B\Phi_Z$ e $B\Phi_E$ são unidos com os termos de dissipação D_Z e D_E , de modo a compor os termos residuais K_Z e K_E .

A nova formulação apresentada, então, é a seguinte:

$$\frac{\partial A_Z}{\partial t} = -C_A - C_Z + G_Z + BA_Z \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial A_E}{\partial t} = C_A - C_E + G_E + BA_E \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial K_Z}{\partial t} = C_K + C_Z + BK_Z + RK_Z \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial K_E}{\partial t} = -C_K + C_E + BK_E + RK_E \quad (2.12)$$

de modo que:

$$RK_Z = B\Phi_Z + D_Z \quad (2.13)$$

$$RK_E = B\Phi_E + D_E \quad (2.14)$$

Robertson e Smith (1983) utiliza a formulação apresentada por Brennan e Vincent (1980) para domínios de área limitada, desenvolvendo uma nova formulação apenas para o termo A_E . Para isso, o autor parte da formulação de APE para um domínio limitado apresentada por Smith et al. (1977), combinando-a com a primeira lei da termodinâmica para as derivativas eulerianas das formulações de APE e A_Z . Dese modo, a formulação final do balanço de A_E acaba por ser substancialmente diferente dos trabalhos apresentados, com o surgimento de um novo termo associado a mudanças no campo de pressão referencial e resultando em diferenças na formulação do termo C_A . Tal linha de raciocínio se deve ao fato dos autores estarem interessados em avaliar, através do uso de modelagem numérica, o impacto de processos úmidos no desenvolvimento - e, conseqüentemente, na energética - de ciclones extratropicais. Entretanto, tal desenvolvimento faz o que certos termos do balanço energético acabem sendo dependentes de integrais em coordenadas isentrópicas, resultando em dificuldades computacionais.

Interessado no estudo da energética de um evento de ciclogênese no Golfo de Genoa, no Mar Mediterrâneo, Michaelides (1987) propõe mais um avanço na formulação do ciclo energético. Neste trabalho, o autor, tal como Brennan e Vincent (1980), mencionam a questão de os termos $B\Phi_Z$ e $B\Phi_E$ apresentarem resultados irreais. Sendo assim, os autores optam por considerar além dos termos de resíduo RK_Z e RK_E (conjunto de equações 2.9 e 2.13), um termo (ϵ) representando erros numéricos resultantes das estimativas dos termos em 2.13. O mesmo é feito para os termos de geração G_Z e G_E . A representação esquemática proposta encontra-se na Figura 2.10. Desse modo, o autor utiliza o conjunto de equações dado por:

$$\frac{\partial A_Z}{\partial t} = C_K - C_A + BA_Z + \Delta G_Z \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial A_E}{\partial t} = C_A - C_E + BA_E + \Delta G_E \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial K_Z}{\partial t} = C_K - C_Z + BK_Z - \Delta R_Z \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial K_E}{\partial t} = C_E - C_K + BK_E - \Delta R_E \quad (2.18)$$

Onde:

$$\Delta R_Z = B\Phi_Z - D_Z + \epsilon_{KZ} \quad (2.19)$$

$$\Delta R_E = B\Phi_E - D_E + \epsilon_{KE} \quad (2.20)$$

$$\Delta G_Z = G_Z + \epsilon_{GZ} \quad (2.21)$$

$$\Delta G_E = G_E + \epsilon_{GE} \quad (2.22)$$

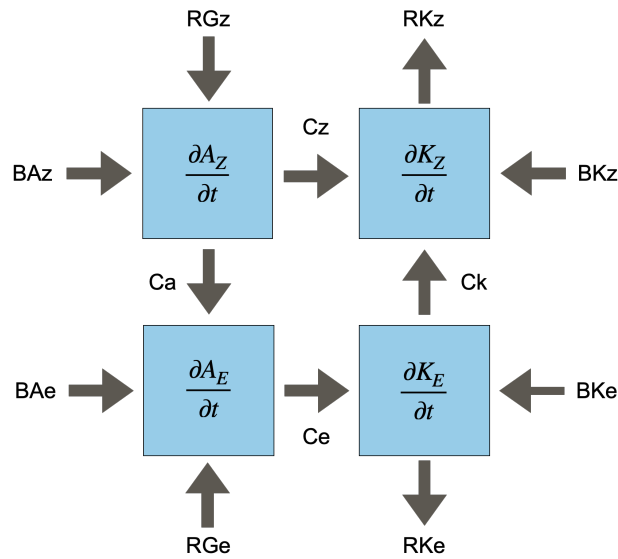


Figura 2.10: Ciclo Energético tal como formulado por Lorenz (1955), após os avanços de Michaelides (1987). Neste, erros numéricos resultantes das estimativas dos balanços são incluídos dentro dos termos de resíduo.

Em Michaelides et al. (1999) o autor apresenta um avanço na teoria proposta em Michaelides (1987), onde a formulação para o cálculo da energética é explorada para áreas limitadas usando tanto um referencial euleriano, quanto um semi-Lagrangiano. Neste caso, é avaliado o ciclo energético no desenvolvimento de um caso de ciclogênese no mediterrâneo

a partir dos dois referenciais distintos. O autor ainda apresenta uma discussão detalhada do processo de derivação realizado em Michaelides (1987) e das implicações em utilizar referenciais distintos. É mencionado que a maioria dos estudos opta pelo uso da abordagem euleriana para a análise energética em áreas limitadas na atmosfera. Nesta abordagem, o domínio espacial selecionado para a realização dos cálculos deve ser grande o suficiente para acomodar todos os estágios de desenvolvimento do sistema, levando em conta seu deslocamento espacial e as mudanças de tamanho envolvidas. Entretanto, a opção pelo uso dessa metodologia resulta em limitações na interpretação dos resultados. Isso se dá ao fato de que, ao determinar uma área de tais dimensões, o cálculo da energética inevitavelmente acaba por agregar circulações sinóticas adjacentes, não refletindo assim apenas a energética da circulação de interesse.

Uma representação desta problemática é demonstrada na Figura 2.11. Nesta está representada o domínio computacional selecionado para o estudo da energética de um ciclone com gênese em uma região costeira, próxima à uma região de topografia elevada. Esta é uma situação análoga à ciclogênese na região costeira do Sudeste do Brasil, por exemplo (Reboita et al., 2010; Gramscianinov et al., 2019, e.g). Neste caso, o domínio computacional deve abranger tanto a região costeira (fase de vida inicial do ciclone), quanto a região oceânica adjacente (fase final da vida do sistema). Após o ciclone avançar sobre o oceano, em seus estágio de desenvolvimento finais, circulações de mesoescala estabelecem-se próximas às regiões costeiras, como por exemplo, movimentos ascendentes relacionados ao aquecimento da superfície e convecção relacionada a interação da brisa marítima com a topografia local. Ou seja, a interpretação da energética do domínio de área limitada acaba por ser comprometida, dado que há processos dentro do domínio que influenciam nos valores de APE e K - e consequentemente, nos termos de conversão, fronteira, dissipação e geração - computados para o domínio.

Apesar das limitações do método euleriano, Michaelides et al. (1999) discute que o uso de um referencial puramente lagrangiano para estudar ciclones extratropicais acarretaria em grandes dificuldades metodológicas. Isso pois, para tal, o sistema de interesse teria de ser rastreado em um espaço tridimensional isolado de outras circulações, utilizando variáveis conservativas específicas para as massas de ar contidas nele. Porém, ciclones extratropicais envolvem massas de ar de origens distintas (polar e tropical), e esse fator influencia em suas características conservativas. Além disso, para que o sistema seja isolado

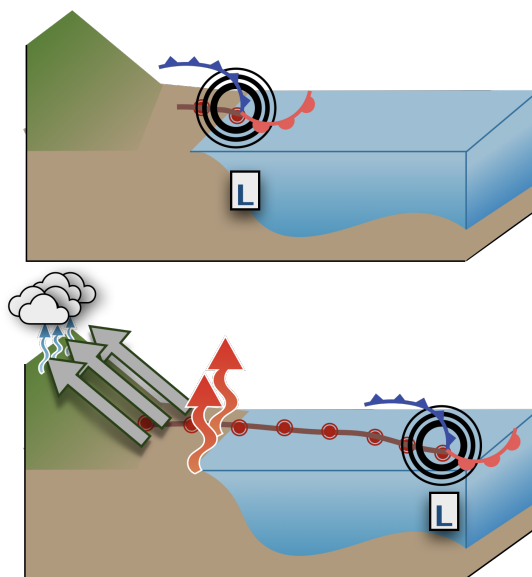


Figura 2.11: Ilustração representativa dos problemas relacionados à análise do ciclo energético utilizando um referencial euleriano. A imagem de cima representa um ciclone em formação próximo ao continente, enquanto que a figura debaixo representa o mesmo sistema em estágios tardios de desenvolvimento.

de circulações espúrias.

Desse modo, Michaelides et al. (1999) argumenta que a solução que balanceia uma aplicabilidade prática do método, mas que minimiza o efeito de circulações adjacentes na energética, é a abordagem quase-Lagrangiana. Nesta, similarmente ao que foi proposto por Vincent e Chang (1973), são utilizados múltiplos domínios fixos para diferentes instantes de tempo, de modo a seguir o sistema de interesse. Porém, diferentemente de Vincent e Chang (1973), nas formulações de Michaelides et al. (1999) não aparecem termos relacionados com o deslocamento das fronteiras do domínio computacional. Por fim, os autores comparam os resultados de ambas as metodologias (euleriana e quase-lagrangiana) e demonstram ambas podem apresentar resultados bastante diferentes, a depender dos termos analisados, discutindo que o uso do método euleriano, inclusive, dificulta comparações entre diferentes estudos, dada as contribuições dos sistemas adjacentes na energética. Assim, o mesmo conclui que o método semi-lagrangiano constitui uma metodologia mais robusta para a análise energética de sistemas ciclônicos. O autor ainda comenta que, devido ao fato da abordagem semi-Lagrangiana não utilizar um volume computacional fixo, não é possível realizar as derivadas locais dos termos de energia em relação ao tempo. Logo, o uso desta abordagem não possibilita fechar o balanço de energia de forma completa. Entretanto, não

é apresentada uma argumentação completa a respeito desse tema.

O presente trabalho baseia-se nesta formulação apresentada por Michaelides et al. (1999). A formulação completa é apresentada na Seção 2.2.3, acompanhada da interpretação física de cada termo do ciclo energético. Enquanto isso, a descrição dos métodos computacionais empregados para o cálculo do LEC encontra-se na Seção 3.3.

2.2.2 Ciclo de Lorenz Aplicado a Sistemas Ciclônicos

- Mostrar exemplos de estudos que empregam o LEC para ciclones e os resultados obtidos, e.g.: Veiga et al. (2008); Dias Pinto e Rocha (2011); Michaelides (1987); Michaelides et al. (1999); Muench (1965); Brennan e Vincent (1980).
- Ao final, oferecer uma síntese dos resultados obtidos, já indicando possíveis padrões possíveis na energética de ciclones

2.2.3 Ciclo de Lorenz: Formulação Matemática e Interpretação Física

- Mostrar as formulações matemáticas utilizadas, baseadas em Michaelides (1987); Michaelides et al. (1999), oferecendo uma interpretação física e dinâmicas de cada termo e, inclusive, através de diagramas didáticos, quando possível.

Métodos

3.1 *Fluxograma de atividades*

- Fluxograma demonstrando os passos metodológicos e como se encaixam em cada pergunta de pesquisa

3.2 *Bases de dados utilizadas*

- ERA5
- Tracks do Atlântico Sul (base de dados da Carolina)
- CHIRPS
- QUICKSCAT
- OISST

3.3 *Cálculo do ciclo energético*

- Programa de calculo do LEC (Github) e procedimentos adotados para os cálculos

3.4 *Determinação dos padrões energéticos*

- Padronização da duração dos sistemas através do ciclo de vida
 - Cyclophaser
- Diagrama de fase (Lorenz Phase Space)

- Cálculo da PCA dos termos
- Método K-means

3.5 *Descrição do MPAS-A*

- Visão geral do modelo
- Descrição do núcleo dinâmico e discretizações numéricas
- Malha adotada e estrutura de grade (horizontal e vertical)
- Opções disponíveis de parametrizações físicas

3.6 *Desenho experimental das simulações*

3.6.1 *Testes de sensibilidade: Furacão Catarina*

- Desenho dos experimentos
 - Combinações de parametrizações físicas e de cumulus
 - Duração de cada set de experimentos (3 períodos de 48h cada)
- Inicialização do modelo
- Estrutura de grade adotada (horizontal e vertical)

3.6.2 *Experimentos com SST*

- Casos escolhidos
- Perturbações adotadas

Energética dos Ciclones no Atlântico Sul

- Aqui, estou na dúvida se não seria bom criar um capítulo (ou uma seção?) para falar do ciclo de vida dos ciclones, visto que os sistemas serão normalizados a partir disso, havendo diferentes configurações de ciclos de vidas, por exemplo.
- No caso, pensei em criar um capítulo para o ciclo de vida, apresentando os mapas espaciais de modo a indicar que a metodologia utilizada é válida e corresponde ao esperado pela literatura de climatologia de ciclones (ao mesmo tempo em que adiciona novas informações). Entretanto poderia acabar ficando desconexo com os objetivos da tese.
- A alternativa seria apenas incluir como uma seção neste capítulo aqui, de modo que eu indique apenas as configurações de ciclones detectadas pelo programa e mostre alguns exemplos para aferir confiabilidade aos resultados, mas poderia acabar ficando desconexa das outras seções.

4.1 *Características gerais*

- Estatísticas gerais da energética dos sistemas
- Compósitos para alguns termos, para diferentes fases do ciclo de vida
- Mostrar diagrama de fase para todos os casos

4.2 *Padrões energéticos*

- Resultados das componentes principais

- Clusters identificados pelo K-means
- Resultados dos padrões energéticos

4.3 *Limitações, aplicações e passos futuros*

- Limitações: metodologia semi-lagrangiana deve ser interpretada como snapshots (relacionando com Muench (1965))
- A formulação adotada apenas permite a seguinte interpretação: contribuição para energética global e não a energética individual de cada sistema
- Contextualizar a energética como ferramenta para determinação objetiva das causas eficientes e finais dos ciclones (diagramas do Hart estão relacionados com causas formais e materiais - os trabalhos complementam-se)
- Estudos de caso? (e.g. ciclones extratropicais clássicos formados no sul da ARG, ciclones bomba formados em LA-PLATA, ciclones subtropicais formados em SE-BR e, ciclones tropicais Anita, Iba, 01Q).

Modelagem numérica

5.1 Testes de sensibilidade: estudo de caso com Furacão Catarina

- Objetivos: 1) determinar qual conjunto de parametrizações de microfísica e cumulus apresentam os melhores resultados para o Catarina 2) determinar o impacto de diferentes escolhas na energética dos sistemas

5.1.1 Comparação da pressão mínima em superfície e posição do sistema

5.1.2 Precipitação acumulada

5.1.3 Ventos em superfície

5.1.4 Energética

5.2 Experimentos com perturbações no campo de SST

5.2.1 Interação oceano-atmosfera

5.2.2 Ciclo energético

Capítulo 6 ---

Conclusões

Conclusões do trabalho e/ou perspectivas

Referências Bibliográficas

- American Meteorological Society, 2012 Cyclone <https://glossary.ametsoc.org/wiki/Cyclone>
- Aristotle A., Aristotle Metaphysics. vol. 1, Harvard University Press Cambridge, MA, 1933
- Bjerknes J., On the structure of moving cyclones, Monthly Weather Review, 1919, vol. 47, p. 95
- Bjerknes J., Holmboe J., On the theory of cyclones, Journal of Atmospheric Sciences, 1944, vol. 1, p. 1
- Bjerknes J., Solberg H., Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation. Grondahl, 1922
- Brennan F. E., Vincent D. G., Zonal and eddy components of the synoptic-scale energy budget during intensification of hurricane Carmen (1974), Monthly Weather Review, 1980, vol. 108, p. 954
- Brown Jr J. A., A diagnostic study of tropospheric diabatic heating and the generation of available potential energy, Tellus, 1964, vol. 16, p. 371
- Dias Pinto J. R., Rocha R. P., The energy cycle and structural evolution of cyclones over southeastern South America in three case studies, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011, vol. 116
- Donald Ahrens C., Henson R., Meteorology Today: An introduction to weather, climate and the environment. Brooks/Cole, 2015

- Dutton J. A., Johnson D. R., The theory of available potential energy and a variational approach to atmospheric energetics, *Advances in geophysics*, 1967, vol. 12, p. 333
- Edmon H. J., Vincent D. G., Large-scale atmospheric conditions during the intensification of Hurricane Carmen (1974) II. Diabatic heating rates and energy budgets, *Monthly Weather Review*, 1979, vol. 107, p. 295
- Frank W. M., The structure and energetics of the tropical cyclone I. Storm structure, *Monthly Weather Review*, 1977, vol. 105, p. 1119
- Gramscianinov C., Hodges K., Camargo R. d., The properties and genesis environments of South Atlantic cyclones, *Climate Dynamics*, 2019, vol. 53, p. 4115
- Gray W. M., Global view of the origin of tropical disturbances and storms, *Monthly Weather Review*, 1968, vol. 96, p. 669
- Hart R. E., A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry, *Monthly weather review*, 2003, vol. 131, p. 585
- Holopainen E. O., Investigation of friction and diabatic processes in the atmosphere. vol. 29, na, 1964
- Holton J. R., An introduction to dynamic meteorology, *American Journal of Physics*, 1973, vol. 41, p. 752
- Jensen C. E., Energy transformation and vertical flux processes over the northern hemisphere, *Journal of Geophysical Research*, 1961, vol. 66, p. 1145
- Johnson D. R., The available potential energy of storms, *Journal of Atmospheric Sciences*, 1970, vol. 27, p. 727
- Lorenz E. N., Available Potential Energy and the Maintenance of the General Circulation, *Tellus*, 1955, vol. 7, p. 157
- Margules M., *Über die Energie der Stürme*, *Jahrb. k. k. u. k. Zentr. Anst. f. Meteor. u. phys. H. d. k. u. k. Reichsanst.*, 1903
- Marquet P., The last paper "On the theory of storm" (Zur Sturmtheorie) published by Max Margules in 1906, *arXiv preprint arXiv:1704.06128*, 2017

- Michaelides S. C., Limited area energetics of Genoa cyclogenesis, *Monthly Weather Review*, 1987, vol. 115, p. 13
- Michaelides S. C., Prezerakos N. G., Flocas H. A., Quasi-Lagrangian energetics of an intense Mediterranean cyclone, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1999, vol. 125, p. 139
- Muench H. S., On the dynamics of the wintertime stratosphere circulation, *Journal of Atmospheric Sciences*, 1965, vol. 22, p. 349
- Oort A. H., On estimates of the atmospheric energy cycle, *Monthly Weather Review*, 1964, vol. 92
- Ramage C. S., Hurricane development, *Journal of Atmospheric Sciences*, 1959, vol. 16, p. 227
- Reboita M. S., Da Rocha R. P., Ambrizzi T., Sugahara S., South Atlantic Ocean cyclogenesis climatology simulated by regional climate model (RegCM3), *Climate Dynamics*, 2010, vol. 35, p. 1331
- Reboita M. S., Gan M. A., Rocha R. P. d., Custódio I. S., Ciclones em superfície nas latitudes austrais: Parte I-revisão bibliográfica, *Revista Brasileira de Meteorologia*, 2017, vol. 32, p. 171
- Reed R. J., Wolfe J. L., Nishimoto H., A spectral analysis of the energetics of the stratospheric sudden warming of early 1957, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1963, vol. 20, p. 256
- Riehl H., On the formation of typhoons, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1948, vol. 5, p. 247
- Robertson F., Smith P., The impact of model moist processes on the energetics of extratropical cyclones, *Monthly Weather Review*, 1983, vol. 111, p. 723
- Rudeva I., Gulev S. K., Climatology of cyclone size characteristics and their changes during the cyclone life cycle, *Monthly Weather Review*, 2007, vol. 135, p. 2568
- Saltzman B., Fleisher A., Further statistics on the modes of release of available potential energy, *Journal of Geophysical Research*, 1961, vol. 66, p. 2271

- Schultz D. M., Keyser D., Bosart L. F., The effect of large-scale flow on low-level frontal structure and evolution in midlatitude cyclones, *Monthly weather review*, 1998, vol. 126, p. 1767
- Shapiro M. A., Keyser D., *Fronts, jet streams and the tropopause*. Springer, 1990
- Simmonds I., Size changes over the life of sea level cyclones in the NCEP reanalysis, *Monthly Weather Review*, 2000, vol. 128, p. 4118
- Smith P. J., On the contribution of a limited region to the global energy budget, *Tellus*, 1969, vol. 21, p. 202
- Smith P. J., Vincent D. G., Edmond Jr H. J., The time dependence of reference pressure in limited region available potential energy budget equations, *Tellus*, 1977, vol. 29, p. 476
- Spiridonov V., Ćurić M., *Fundamentals of meteorology*. Springer, 2021
- Starr V. P., Note concerning the nature of the large-scale eddies in the atmosphere, *Tellus*, 1953, vol. 5, p. 494
- Starr V. P., Further statistics concerning the general circulation, *Tellus*, 1959, vol. 11, p. 481
- Stull R. B., *Practical meteorology: an algebra-based survey of atmospheric science*. University of British Columbia, 2015
- Terry J. P., *Tropical cyclones: climatology and impacts in the South Pacific*. Springer Science & Business Media, 2007
- Veiga J. A. P., Pezza A. B., Simmonds I., Silva Dias P. L., An analysis of the environmental energetics associated with the transition of the first South Atlantic hurricane, *Geophysical Research Letters*, 2008, vol. 35
- Vincent D., Chang L., Some further considerations concerning energy budgets of moving systems, *Tellus*, 1973, vol. 25, p. 224
- Wiin-Nielsen A., A study of energy conversion and meridional circulation for the large-scale motion in the atmosphere, *Monthly Weather Review*, 1959, vol. 87, p. 319

Wiin-Nielsen A., Brown J. A., Drake M., On atmospheric energy conversions between the zonal flow and the eddies, *Tellus*, 1963, vol. 15, p. 261

Apêndice

Apêndice A ---

título do apêndice 01

A.1 subtítulo 01

Apêndice B

título do apêndice 02