

1 BOLHAS DE PLASMA EQUATORIAIS

Este capítulo faz uma revisão sobre irregularidades ionosféricas na região equatorial, as principais características das EPBs.

1.1 Breve histórico sobre irregularidades ionosféricas

O espalhamento equatorial (ESF, do inglês “Equatorial Spread F”) é o termo designado aos traços/ecos difusos que estão presentes em ionogramas obtidos e estão associados às irregularidades em altitudes da região F equatorial. A primeira documentação sobre o ESF data da década de 30 em Huancayo, Peru (BOOKER; WELLS, 1938) e podem ser observados em um amplo intervalo de frequências e/ou alturas além de serem são majoritariamente observados durante o período noturno.

A interpretação de Booker e Wells (1938), foi que a natureza difusa dos ecos espalhados seriam devidos flutuações na densidade eletrônica da região F. Além disso, eles sugeriram uma possível associação com “nuvens eletrônicas”. O ESF em altura apresenta pouca difusão em frequência, o que caracteriza por ser quase horizontal.

Nesse tipo de irregularidade que se originam na base da região F, e muitas vezes, se estendem até o lado superior da ionosfera. Por outro lado, o ESF em frequência possui poucos traços difusos em altura, chegando próximos a frequência crítica da região ionosférica, aqui se originam irregularidades na altura de pico da camada (BATISTA, 1985). O ESF é um fenômeno tipicamente noturno, pós o por do sol, quando a ionosfera ambiente (de fundo) são favoráveis ao seu desenvolvimento.

O espalhamento nos ionogramas de

O ESF pode ser observado tanto em baixas (ESF equatorial) quanto em altas latitudes (ESF não-equatorial). Além de serem relativamente raros em médias latitudes geomagnética (entre 20 e 40° de latitude). Essas duas classes de ESF possuem mecanismos de geração distintos, contudo caracterizados por irregularidades na densidade eletrônica da região F e alinhamento com as linhas de campo magnético. As interações do vento solar com a magnetosfera ser mais pronunciado em altas latitudes, fazendo com que o ESF não-equatorial (equatorial) correlacionado (anti-correlacionado) com a atividade geomagnética. (FARLEY et al., 1970; HUDSON; KENNEL, 1975)

Dungey (1956) sugeriu que as irregularidades na ionosfera equatorial, poderia ser resultado de uma instabilidade gravitacional originada no lado inferior da região

F. Durante o período noturno o gradiente de densidade costuma ser bastante íngreme (acentuado), fazendo com que a camada ionosférica se assemelha a uma placa de plasma sustentada contra a gravidade na presença do campo magnético, configurando uma situação de instabilidade. Esse cenário, foi uma das primeiras interpretações do mecanismo de instabilidade Rayleigh-Taylor.

Alguns anos depois, [Martyn \(1959\)](#) sugeriu que o fenômeno de ESF, era devido às turbulências, de grande escala locais, que ocorriam de regiões mais baixas da ionosfera (região E). Em outras palavras, qualquer turbulência gerada em uma região da atmosfera, produzirá uma instabilidade local que, conseqüentemente, poderá resultar em uma deriva ascendente sendo mapeado ao longo das linhas de campo magnético altamente condutoras, e se propagavam na forma de uma “onda hidromagnética”, ao longo das linhas de campo magnético para regiões mais altas da ionosfera (região F).

As teorias de [Martyn \(1959\)](#) e [Dungey \(1956\)](#) forneceram a sua contribuição para explicar os fenômenos de ESF observados experimentalmente no lado inferior da ionosfera, vale ressaltar que essas teorias podem complementar uma a outra. Contudo, não explicam como as irregularidades ocorriam no lado superior da região F, caracterizada por uma configuração de estabilidade ([FARLEY et al., 1970](#)).

1.2 Definição de irregularidades

Como já foi mencionado anteriormente, o fenômeno do ESF foi estabelecido a partir de observações de ionossondas na região equatorial noturna ([BOOKER; WELLS, 1938](#)).

Existem diferentes critérios que podem ser usados para definir a ocorrência de irregularidades do ESF. Duas definições quantitativas são baseadas em medidas de satélites. Uma definição é desvio padrão das variações da densidade iônica (N) dividida pela média da densidade iônica (N_0), ambas quantidades expressas na escala logarítmica, dada por:

$$\sigma(\%) = 100 \times \frac{\left[\frac{1}{10} \sum_{i=10}^{10} (\log N_i - \log N_{0i})^2 \right]^{1/2}}{\frac{1}{10} \sum_{i=10}^{10} \log N_{0i}}. \quad (1.1)$$

Nos estudos de [Su et al. \(2006\)](#), [Su et al. \(2008\)](#) com medições do satélite ROCSAT-1, foram usados os dados médios da densidade iônica em 1-s. Foi extraído a tendência em um segmento de 10 pontos de dados ou 10 segundos (correspondendo a ~ 70 km

ao longo da trajetória do satélite). N_i e N_{0i} na [Equação 1.1](#) são a densidade iônica medida e o valor de densidade iônica linearmente ajustada no i th ponto de dado, respectivamente.

[Huang et al. \(2014\)](#) utilizou dados de densidade iônica do satélite C/NOFS. A média da densidade iônica média sobre 60 segundo representa a média o valor sobre ~ 420 km em longitude uma vez que o C/NOFS sobrevoa ao longo do equador com velocidade de ~ 7 km s $^{-1}$.

mostraram que apenas a probabilidade de ocorrência de EPBs baseada em perturbações na densidade iônica possuem uma boa concordância com a ocorrência de cintilação ionosférica.

Outra definição de irregularidades de ESF é a perturbação absoluta na densidade iônica, defina como:

$$\Delta N = \left[\frac{1}{2} \sum_{i=10}^{10} (N_i - N_{0i})^2 \right]^{1/2}. \quad (1.2)$$

Cada valor de densidade perturbada (ΔN) é calculado sobre 10 pontos de dados. Em dois estudos anteriores ([Kil e Heelis \(1998\)](#) e [McClure et al. \(1998\)](#)), usaram $\sigma = \Delta N_i / \overline{N_{0i}}$ para definir o ESF mas eles não usaram a média de 10 pontos. A ocorrência do ESF é identificada com $\sigma > 0,3$ ou $\sigma > 1$ %.

1.3 Evolução altitudinal

[Sahai et al. \(1994\)](#) observaram que as EPBs (referidas no trabalho como “depleções no airglow”) se estendem até a borda sul do campo de visão do instrumento. A maioria das EPBs observadas alcançaram alturas de Apex¹ acima de 1500 km e, provavelmente acima de 2500 km do equador geomagnético. Essa extensão vertical é relacionada com as condições de crescimento da EPB, que por sua vez, são determinadas pelos processos de instabilidade e condições ambientes.

Existem intensas perturbações de pequena escala devido ao campo elétrico e da densidade eletrônica ao longo das paredes internas de EPBs (região exaurida). Essas perturbações causam os efeitos generalizados de ESF equatorial, que às vezes chegam aos 20° de latitude da região de geração no equador magnético em direção aos polos

¹O termo “Apex”, refere-se a altitude máxima que as linhas de campo magnético alcança sobre a superfície terrestre.

(MAKELA et al., 2009).

1.4 Velocidade de deriva zonal

A velocidade de deriva zonal das EPBs é um dos parâmetros das EPBs mais explorados e pesquisas científicos. Como foi discutido na ?? a deriva dos plasma é controlada pelos campos elétricos (para oeste à noite), que, portanto, provoca uma deriva (positiva para leste), a qual é o próprio movimento das EPBs.

Os ventos neutros nas regiões E e F produzem campos elétricos que conduzem a deriva do plasma na ionosfera. Durante o período noturno, o dínamo da região E é praticamente desprezado, pois a ionosfera decai rapidamente e apenas o dínamo da região F contribui particularmente após o pôr do sol local. Portanto, o dínamo da região F desenvolve papel chave na deriva do plasma para leste pela ação da componente zonal dos ventos neutros durante a noite (CHAPAGAIN, 2015). Outro resultado interessante é o decréscimo da movimento do vento zonal para latitudes mais baixas.

A deriva zonal de EPBs é estudada a partir da evolução temporal ao longo de uma determinada área (região territorial). A técnica de keogramas, por exemplo, é construída a partir da extração linhas horizontais de um eixo geográfico (zonal, meridional ou ambos), agrupados em sequência formando um padrão de mosaico da latitude (ou longitude) em função do tempo.

Barros et al. (2018) calcularam a velocidade de deriva zonal de EPBs utilizando receptores GNSS sobre a América do Sul. As velocidades zonais variaram de $\sim 123 \text{ ms}^{-1}$ no Equador para $\sim 65 \text{ ms}^{-1}$ em 35°S de latitude, ou seja, as velocidades de deriva das bolhas decrescem com o aumento da latitude. Os autores utilizaram a técnica de keogramas com mapas de TEC para extrair os valores de deriva zonal.

Um estudo similar ao de Barros et al. (2018), foi performado por Vargas et al. (2020). Nesse caso, os autores usando imagens de da emissão do OI 630,0 nm nos sítios de São João do Cariri e Cachoeira Paulista. Os resultados mostraram que velocidades de deriva zonal encontradas variaram, em média, de $\sim 150 \text{ ms}^{-1}$ (nas primeiras horas de observação) a $\sim 60 \text{ ms}^{-1}$ (no fim do período de observação), além disso eles observaram uma taxa decréscimo de $\sim 10 \text{ ms}^{-1}/\text{h}$.

Sobral et al. (1999) correlacionou a velocidade de deriva de EPBs com a atividade solar (máximo e mínimo solares) e geomagnética (calmos e perturbados). O estudo consistiu em separar as velocidades de deriva zonal (SOBRAL; ABDU, 1991) em quatro

grupos, correspondentes aos meses de março e outubro no período de 1980 a 1992 nos mínimos e máximos solares, correspondentes. Os resultados de [Sobral et al. \(1999\)](#) podem ser resumidos da seguinte maneira: Os valores de deriva zonal foram maiores durante os períodos mínimo solar (e geomagneticamente calmos) do que os períodos de máximo solar (e geomagneticamente perturbados). Observou-se que as velocidades de deriva zonal decrescem mais rapidamente nos períodos de mínimo solar do que no máximo, o mesmo não pode ser dito para as condições geomagnéticas calmas e perturbadas onde tal tendência não foi observada.

1.4.1 Comparação da deriva zonal com o vento neutro

Estudos comparativos entre o vento neutro termosférico com a deriva de EPBs ([CHAPAGAIN et al., 2012](#); [CHAPAGAIN, 2015](#)), exemplificando o acoplamento entre a atmosfera neutra com a ionizada. componente zonal dos ventos termosféricos e a deriva das EPBs mostraram uma concordância de $\sim 80\%$ especialmente após às 23:00 LT. Durante as primeiras horas da noite ($\sim 18:30$ a $21:30$ LT) ambas velocidades atingiram seus valores máximos, $\sim 100 - 175 \text{ ms}^{-1}$. As velocidades atingem valores próximos de zero até as primeiras horas da manhã.

A partir da análise do gradiente latitudinal na deriva de EPBs (observadas na região tropical) e dos ventos zonais neutros (fornecido pelo modelo HWM-90), [Pimenta et al. \(2003\)](#) concluíram que o arraste iônico² desempenha um papel fundamental nas velocidades de deriva. Fato que é justificado pelo aumento da densidade eletrônica nas cristas da anomalia de ionização ([PIMENTA et al., 2003](#)).

O resultado de [Pimenta et al. \(2003\)](#) mostraram que derivas médias das EPBs apresentaram um pico de $\sim 160 \text{ ms}^{-1}$ próximo do equador magnético, entre 21:00 e 22:00 LT. Um segundo pico é localizado em aproximadamente 19°S de latitude ($\sim 150 \text{ ms}^{-1}$), ocorrendo entre 20:00 e 22:00 LT, e o vale nas variações latitudinais é localizado próximo 10°S ($\sim 120 \text{ ms}^{-1}$), e essa redução na deriva zonal das EPBs pode ser atribuída aos ventos termosféricos reduzidos ao longo da noite ([PIMENTA et al., 2003](#)).

O gradiente longitudinal, usado no cálculo da deriva das EPBs, indica que o vento termosférico zonal para leste controla a deriva noturna do plasma na região F. A magnitude dos ventos são maiores na base da bolha em relação a parte superior. Adicionalmente, observa-se uma tendência negativa da velocidade zonal, após pôr

²É definido pelo efeito das forças de atrito devido à viscosidade do ar e a colisão entre íons e neutros.

do sol, ao longo da hora local é devido ao enfraquecimento do campo elétrico vertical da região F, que por sua vez, é devido aos processos de recombinação do oxigênio atômico (SOBRAL *et al.*, 1999).

1.5 Variabilidade

A ocorrência de EPBs/ESF pode apresentar grandes variações temporais. A variabilidade de longo prazo está associado com o ciclo de atividade solar. A variabilidade de médio prazo depende da sazonalidade e assim como a atividade solar, já são bem compreendidas pela comunidade científica. Além desses dois tipos, existem variações de ocorrência diárias que caracterizam a variabilidade de curto prazo de EPBs/ESF, que ainda para os dias atuais apresentam muitas incógnitas para a comunidade científica (ABDU, 2019). As características desses graus de variabilidade serão apresentados nas subseções seguintes.

1.5.1 Variabilidade sazonal

A variabilidade sazonal (isto é, taxa de ocorrência dentro do período de um ano) foi investigada por diversos pesquisadores, por exemplo Sobral *et al.* (1980) (Figura 1.1 (a)) observou que a maior frequência de ocorrência das EPBs foi durante o período entre setembro e março (meses de primavera e verão no hemisfério sul). Os seis meses restantes, centrados em torno do solstício de inverno, a ocorrência é muito rara, considerando que o número de noites observáveis neste período foi muito maior do que na outra metade do ano

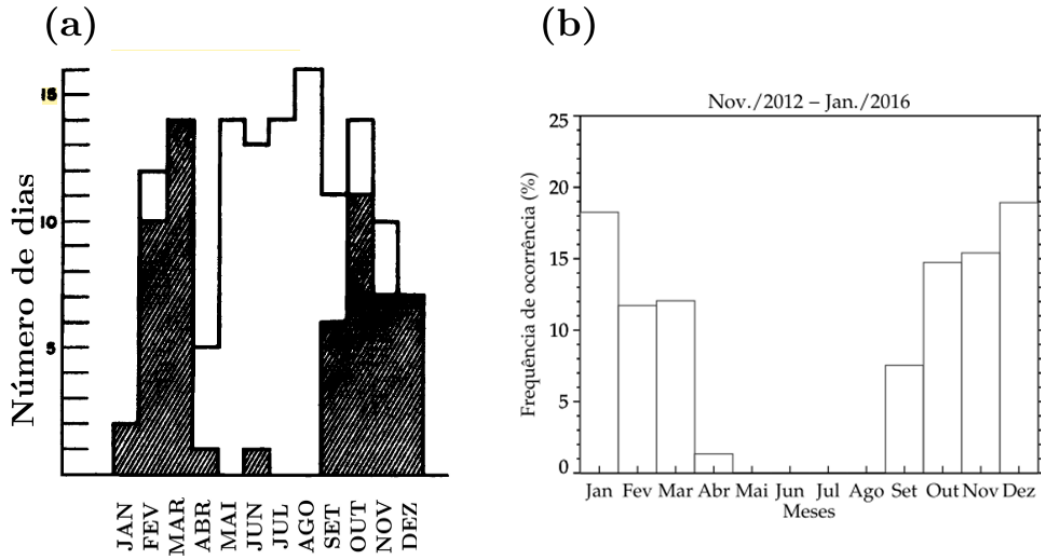
Barros *et al.* (2018) corroboraram os resultados de Sobral *et al.* (1980) através da observação de EPBs com mapas de TEC sobre o território brasileiro. Os resultados apresentaram uma frequência de ocorrência foi muito baixa nos períodos de abril a agosto a maior frequência de ocorrência ocorreu no período compreendido entre de setembro a março, conforme é mostrado na Figura 1.1 (b).

Pimenta *et al.* (2001) observou que a frequência de ocorrência das EPBs é muito baixa durante o período de maio-agosto (inverno no hemisfério sul) e máxima durante outubro-março tanto para diferentes níveis de atividade solar.

1.5.1.1 Alinhamento do terminadouro solar com o meridiano magnético

As velocidades verticais máximas na região F depende diretamente da variação da condutividade das regiões E conjugadas ao longo do mesmo meridiano magnético. O período do pôr do sol em cada uma das regiões E conjugadas tem uma variação

Figura 1.1 - Frequência de ocorrência em função dos meses do ano. As barras brancas no painel (a) representam o número de noite observáveis.



Fonte: Adaptado de (a) Sobral et al. (1980) (b) Barros et al. (2018).

sazonal particular, controlado pela declinação magnética (δ). Então se uma das regiões E conjugadas permanece iluminada pelo Sol durante o período do pôr do sol um curto circuito parcial através das regiões E e F será mantido.

O desenvolvimento de EPBs é favorecido próximos dos equinócios, na longitudes em que $\delta \approx 0^\circ$. Nas regiões de oeste (leste) δ , o ângulo entre os tubos de fluxo e o terminadouro do pôr do sol é minimizado próximo ao solstício de junho (dezembro).

Tsunoda (1985) sugeriu que as variações sazonais da deriva vertical durante o terminadouro solar e a ocorrência do ESF, em uma determinada longitude, são controladas pela declinação magnética, e a alta ocorrência é esperada durante os meses que as camadas E conjugadas escurecem ao mesmo tempo, resultando em um decréscimo simultâneo da condutividade Pedersen integrada enquanto a ionosfera equatorial ainda está elevada em altitude, criando um ambiente favorável para o rápido crescimento de instabilidades.

Tsunoda (1985) formulou um modelo que explicada o padrão sazonal da ocorrência cintilação equatorial, em uma determinada longitude. Os principais resultados foram:

- a) Os picos da atividade de cintilação (maior ocorrência de EPBs), em uma determinada longitude, ocorrem nos meses que terminadouro solar e os tubo de fluxo magnéticos nas regiões E conjugadas estão alinhados (simultâneos). No entanto, [Tsunoda \(1985\)](#) afirmar que essa relação não é exata, ou seja, pode ocorrer sutis deslocamentos (± 1 mês) entre os pontos de máxima ocorrência;
- b) Os picos na atividade de cintilação coincidem com os momentos em que o gradiente longitudinal na condutividade de Pedersen integrada na região E é íngreme (curto). Por outro lado, há ausência de atividade de cintilação quando o gradiente longitudinal é gradual (longo). A variação primária no valor do gradiente longitudinal é produzida durante o pôr do sol em uma das regiões E;
- c) Pico mais íngremes da atividade de cintilação não é o resultado de uma simples descarga do dínamo da região F pela redução das densidades do plasma da região E conjugada. Ou seja, a produção de irregularidades equatoriais não foi considerada mais provável durante as épocas do ano quando região E se encontrava em total escuridão ocorria mais cedo na hora local;
- d) [Abdu et al. \(1981\)](#) sugerem que a declinação magnética desempenha papel significativo na amplitude e duração do movimento do plasma vertical da região F durante o PRE. Devido a correlação do ESF “range-type” com as altas velocidades verticais e alturas da camada F. Portanto, [Abdu et al. \(1981\)](#) conclui que os efeitos da declinação magnética desempenha para primário na dependência do ESF/EPBs;
- e) A variação longitudinal (e sazonal) está provavelmente ligada à taxa de crescimento da EPB. Isso é explicado pela melhor eficiência da IRT coincide com as épocas do ano em que o terminadouro solar está mais alinhado com as linhas do campo geomagnético.

A diferença geral na ocorrência de EPB entre os setores de longitude americanos e asiáticos ao longo de um ciclo solar completo é uma tendência longitudinal que não é explicada pelo modelo de [Tsunoda \(1985\)](#).

1.5.2 Variabilidade de longo prazo (atividade solar)

Estudos da deriva vertical da região F equatorial pós pôr do sol mostraram que entre o período de alta e baixa atividade solar a velocidade de deriva chega a duplicar, o que é devido à variação imposta pela atividade solar ao padrão de ventos termosféricos e as condutividades longitudinais integradas da camada E, que afeta o dínamo da região F.

Pimenta et al. (2001) reportaram a variabilidade sazonal e noturna das EPBs sob diferentes condições de atividade solar. Os principais resultados foram:

- a) O verão no hemisfério sul (novembro-fevereiro), durante o alta atividade solar, a porcentagem de ocorrência aumentou gradualmente após o pôr do sol, atingindo um máximo às ~23:00 LT e, então decresce gradualmente;
- b) Durante períodos de baixa atividade solar, a porcentagem de ocorrência aumenta gradualmente após o pôr do Sol, atingindo seu máximo em torno das 24:00 LT e, então decresce rapidamente;
- c) Os equinócios (março-abril e setembro-outubro), durante alta atividade solar, a frequência de ocorrência aumenta rapidamente após o pôr do sol, alcançando o máximo dentro de um curto tempo (em torno de 21:30 LT) e então decresce gradualmente;
- d) Durante a baixa atividade solar, a frequência de ocorrência também aumenta rapidamente, mas com um atraso de 1 hora, e se mantém numa situação máximo para várias horas e, então decresce rapidamente.

A ocorrência de bifurcação de EPBs é maior durante períodos de alta atividade solar. Possivelmente, devido ao aumento da densidade eletrônica, que possui forte efeitos da eletrodinâmica ionosférica equatorial. Como resultado, existem um aumento na ocorrência de depleções no plasma, bem como na suas bifurcações (PIMENTA et al., 2001).

1.5.3 Variabilidade diária

Um problema antigo, e ainda não resolvido, é a variabilidade diária da ocorrência do ESF/EPBs.

1.5.4 Variabilidade com atividade magnética

O comportamento de EPBs é um tanto complexo durante períodos geomagneticamente perturbados. Neste tipo de cenário, dependendo da interação dos campos elétricos perturbados com origem de altas latitudes com os campos elétricos equatoriais, as EPBs podem ser suprimidas, semeadas ou, até mesmo, sofrerem um crescimento/aprimoramento. Por exemplo, os campos elétricos de penetração direta PPEF

Os campos PPEF, por exemplo, podem apresentar polaridades diferentes dependendo do horário em que os campos elétricos penetraram a região equatorial: (a) pode ter polaridade para leste (“under-shielding”) ou (b) com polaridade para oeste (“over-shielding”).

A deriva do plasma zonal noturna, embora seja impulsionada principalmente pelo campo elétrico do dínamo do vento termosférico da região F que é desacoplado da região E, suas respostas sob condições perturbadas podem ser condicionadas pelo vento termosférico perturbado, bem como pelos campos elétricos perturbados imposto externamente possivelmente acoplado com condutividade aumentada/modificada da região E noturna. Portanto, alta atividade magnética pode ser semeadora de ESF e, conseqüentemente, levando a formação de EPBs (ABDU et al., 2003).

Durante os meses que as depleções geralmente não ocorrem, perturbações geomagnéticas podem induzir derivas verticais que facilitam a iniciação de EPBs, normalmente durante as horas pós meia noite. No entanto, observou que nem todas as noites perturbadas levaram ao desenvolvimento de irregularidades (SAHAI et al., 1994).

Em um recente trabalho, Huang et al. (2021) estudaram a ocorrência de EPBs no setor leste da Ásia durante a tempestade geomagnética de outubro de 2016. Os resultados mostraram que as EPBs próximas do amanhecer (consideradas raras) ocorreram no final da fase principal da tempestade, isto é, quando o FMI Bz permaneceu para o sul. O PPEF pode ser acionado no início da excursão Bz do FMI para o sul e dura dezenas de minutos a várias horas durante a fase principal (BLANC; RICHMOND, 1980); geralmente é para leste e tem valores maiores ao amanhecer. O maior PPEF para leste pode produzir a corrente ascendente $\vec{E} \times \vec{B}$ mais forte que poderia elevar a altura ionosférica, e resultando em uma maior taxa de crescimento da IRT estimulando o desenvolvimento de EPB.

O DDEF para leste também pode produzir derivas ascendentes para aumentar a altura ionosférica em torno do amanhecer (FEJER; SCHERLIESS, 1997), o que poderia

contribuir para a geração de EPBs ao amanhecer. Além disso, o vento meridional do equador também pode afetar os EPBs que foram acionados ao nascer do sol.

Já durante a fase de recuperação, os autores observaram uma ausência de EPBs, indicando uma supressão devido as campos da tempestade. É bem conhecido que EPBs pré-meia-noite podem ocorrer facilmente quando o lado inferior da camada F ionosférica permanece em altitudes mais altas em torno do pôr do sol, o que pode ser significativamente afetado por campos elétricos zonais equatoriais, como PRE. Os efeitos do DDEF podem tornar-se dominantes na fase de recuperação e existir persistentemente durante este período. Como sugerido por [Abdu et al. \(1997\)](#), ambos os ventos perturbados zonal e meridional parecem inibir o desenvolvimento de EPB por afetar DDEF durante a tempestade. O DDEF se encontra na direção oeste e tem valores maiores em torno do pôr do sol ([FEJER et al., 2008](#)) que empurrariam o plasma ionosférico para altitudes mais baixas.

Os autores concluíram esses resultados, através de comparações da altura virtual da camada F mínima (h'F) antes e depois da tempestade. Observaram, que durante a fase principal os valores de h'f aumentaram e reduziram na fase de recuperação.

O efeito do PPEF e DDEF têm sido bastante estudado como a possível explicação para o ocorrência de ESF/EPBs pós meia noite. Essas irregularidades, pós meia noite, não são correlacionadas com a atividade solar e com as cintilações de GPS, ao contrário das EPBs observadas após o pôr do sol ([OTSUKA, 2018](#)).

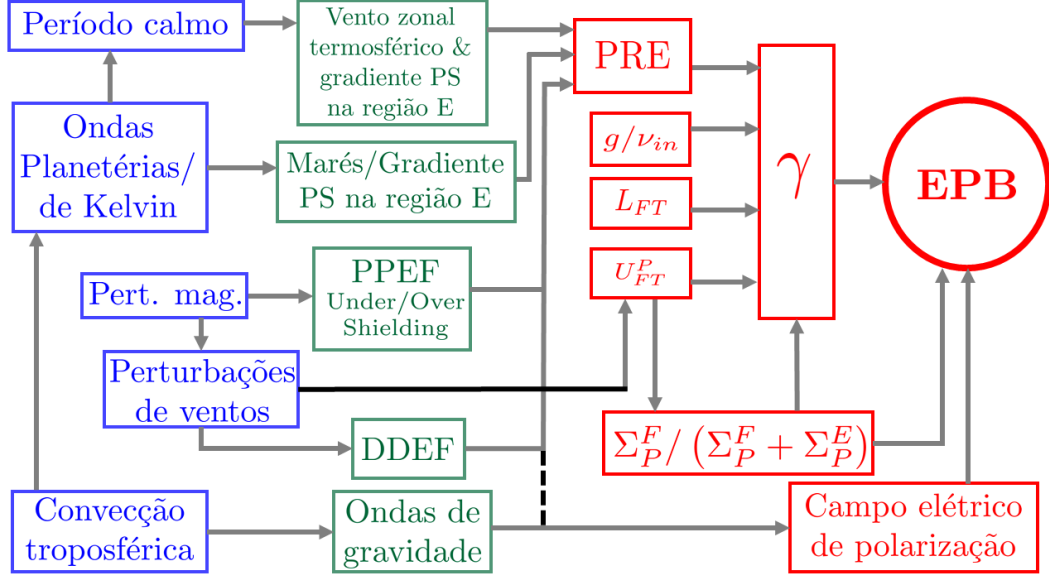
1.6 Sumário de efeitos

Os mecanismos de geração das EPBs e as diferentes fontes das forçantes que pode modificar o processos de acoplamento que conduzem na variabilidade de curto prazo das EPBs, é apresentado esquematicamente na [Figura 1.2](#). Os retângulos vermelhos representam os parâmetros que desempenham papel direto nos processos que conduzem a geração de EPB.

O principal mecanismo de geração das EPBs é a taxa de crescimento da IRT generalizada (γ_{RT}) que pode ser expressa em termos dos parâmetros integrados às linhas de campos (ou fluxo de tubo magnéticos), como é descrito pela seguinte expressão ([SULTAN, 1996](#)):

$$\gamma_{RT} = \frac{\Sigma_P^F}{\Sigma_P^E + \Sigma_P^F} \left(V_p - U_L^P - \frac{g_L}{\nu_{in}^{eff}} \right) K^F - R_T, \quad (1.3)$$

Figura 1.2 - Representação esquemática dos processos de acoplamento do desenvolvimento das EPBs/ESF e variabilidades de curto prazo. Os retângulos vermelhos mostram a conexão entre os parâmetros específicos de fundo (explicados no texto) que determinam a evolução de uma EPB, por meio da taxa de crescimento da IRT. Os retângulos verdes ilustram os parâmetros que modificam/controlam os parâmetros básicos responsáveis para a geração de EPB. Os retângulos azuis especificam as fontes das forçantes que operam em diferentes tipos da variabilidade de curto prazo.



Fonte: Adaptado de Abdu (2019).

onde g_L indica a aceleração local devido a gravidade no equador magnético, $V_p = \vec{E} \times \vec{B}/B^2$ é a componente vertical da deriva do plasma (positiva para cima) devido ao campo elétrico para leste (\vec{E}) no equador magnético, e U_n^P é a componente do vento neutro perpendicular à \vec{B} (positiva para baixo) ponderado por Σ_P . ν_{in}^{eff} é a frequência de colisão íons-neutros efetiva (ponderada pela densidade numérica integradas no fluxo de tubo na região F). L_n é o comprimento de escala do fluxo de tubo integrado na densidade do plasma, da região F, medido no equador. R_T é a taxa de recombinação integradas ao longo do fluxo de tubo. Σ_P^E e Σ_P^F são as contribuições para σ_P das regiões E e F, respectivamente.

Como pode ser visto na Equação 1.3, a deriva vertical do plasma contribui para a taxa de crescimento da IRT e através de diferentes processos. Além da contribuição direta de V_p , uma deriva do plasma ascendente move a camada F para altitudes mais elevadas e aumenta a taxa de crescimento devido a diminuição ν_{eff}^F e em R_T .

Outros dois fatores, o vento neutro e a frequência de colisão íon-neutro, também afetam a taxa de crescimento da instabilidade.

Na [Equação 1.3](#), o termo $(-g_e/\nu_{eff}^F)$ é positivo por causa da gravidade direcionada para baixo. K_F é positivo no lado inferior na região F e negativo no lado superior da região F. Se não considerar a velocidade de deriva do plasma, vento neutro, e recombinação, a taxa de crescimento linear da IRT é positiva no lado inferior da região F e negativo no lado superior da região F.

1.7 Bolhas de plasma pós meia noite

Muitos trabalhos tem associado o desenvolvimento explosivos do ESF ao anoitecer com EPBs. Além disso, existem relativamente poucos trabalhos que abordam o ESF pós meia noite/pré amanhecer ([MACDOUGALL et al., 1998](#)).

O interesse nas variações da altitude ionosféricas é devido ao gradiente íngreme no lado inferior e ao movimento para cima (devido ao campo elétrico para leste) que tende a ser instável. Ademais, uma camada de maior altitude reduz o amortecimento de instabilidades pela recombinação e, pela redução da frequência de colisão íon-neutro ν_{in} , aumenta o termo de crescimento da gravidade para IRT.

(1) O movimento vertical, combinado com um gradiente vertical, pode ser instável. (Examinamos essa possibilidade em detalhes, mas não conseguimos mostrar que as irregularidades foram vistas nos momentos de altos gradientes verticais e grandes movimentos ascendentes. Na verdade, as irregularidades foram comumente vistas em momentos de movimento descendente, o que não é a direção esperada para instabilidade.)

(2) O movimento vertical, por ser uma variação transitória, pode ter comprimentos de onda verticais finitos ou atrasos de tempo que aumentariam a instabilidade aumentando os gradientes verticais. (Mais tarde, descontamos esse efeito porque fomos capazes de estudar o movimento em diferentes alturas usando nossas várias frequências fixas e muitas vezes encontramos diferenças de velocidade insignificantes nas diferentes alturas.)

(3) A perturbação da velocidade vertical vista sobre Fortaleza pode não ser a mesma que quando o ESF se formou ou intensificou em um momento anterior, então a associação é irrelevante

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDU, M. A. Day-to-day and short-term variabilities in the equatorial plasma bubble/spread f irregularity seeding and development. **Progress in Earth and Planetary Science**, v. 6, n. 11, 2019. 6, 12
- ABDU, M. A.; BITTENCOURT, J. A.; BATISTA, I. S. Magnetic declination control of the equatorial f region dynamo electric field development and spread f. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 86, n. A13, p. 11443–11446, 1981. 8
- ABDU, M. A.; MACDOUGALL, J. W.; BATISTA, I. S.; SOBRAL, J. H. A.; JAYACHANDRAN, P. T. Equatorial evening prereversal electric field enhancement and sporadic e layer disruption: A manifestation of e and f region coupling. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 108, n. A6, 2003. 10
- ABDU, M. A.; SASTRI, J. H.; MACDOUGALL, J.; BATISTA, I. S.; SOBRAL, J. H. A. Equatorial disturbance dynamo electric field longitudinal structure and spread f: A case study from guar/eits campaigns. **Journal of Geophysical Research**, v. 24, n. 13, p. 1707–1710, jan. 1997. 11
- BARROS, D.; TAKAHASHI, H.; WRASSE, C. M.; FIGUEIREDO, C. A. O. Characteristics of equatorial plasma bubbles observed by tec map based on ground-based gnss receivers over south america. **Annales Geophysicae**, v. 36, n. 1, p. 91–100, 2018. ISSN 14320576. 4, 6, 7
- BATISTA, I. S. **DÍNAMO DA REGIÃO F EQUATORIAL: ASSIMETRIAS SAZONAIS E LONGITUDINAIS NO SETOR AMERICANO**. 169 p. Tese (Tese de doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1985. 1
- BLANC, M.; RICHMOND, A. The ionospheric disturbance dynamo. **Journal of Geophysical Research**, v. 85, p. 1669–1686, 01 1980. 10
- BOOKER, H. G.; WELLS, H. W. Scattering of radio waves by the f-region of the ionosphere. **Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity**, v. 43, n. 3, p. 249–256, 1938. 1, 2
- CHAPAGAIN, N. P. Electrodynamics of the low-latitude thermosphere by comparison of zonal neutral winds and equatorial plasma bubble velocity. v. 9062, n. 2, p. 84–89, 2015. 4, 5

- CHAPAGAIN, N. P.; MAKELA, J. J.; MERIWETHER, J. W.; FISHER, D. J.; BURITI, R. A.; MEDEIROS, A. F. Comparison of nighttime zonal neutral winds and equatorial plasma bubble drift velocities over Brazil. **J. Geophys. Res.**, v. 117, p. 6309, 2012. [5](#)
- DAVIES, K. **Ionospheric Radio Propagation**. [S.l.: s.n.], 1965. 498 p.
- DUNGEY, J. W. Convective diffusion in the equatorial f region. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 9, n. 5, p. 304–310, 1956. [1](#), [2](#)
- FARLEY, D. T.; BALSEY, B. B.; WOODMAN, R. F.; MCCLURE, J. P. Equatorial spread F: Implications of VHF radar observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 75, n. 34, p. 7199–7216, 1970. [1](#), [2](#)
- FEJER, B. G.; JENSEN, J. W.; SU, S.-Y. Seasonal and longitudinal dependence of equatorial disturbance vertical plasma drifts. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 20, 2008. [11](#)
- FEJER, B. G.; SCHERLISS, L. Empirical models of storm time equatorial zonal electric fields. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 102, n. A11, p. 24047–24056, 1997. [10](#)
- GALKIN, I. A.; KHMYROV, G. M.; KOZLOV, A. V.; REINISCH, B. W.; HUANG, X.; PAZNUKHOV, V. V. The artist 5. **AIP Conference Proceedings**, v. 974, n. 1, p. 150–159, 2008.
- HARGREAVES, J. K. **The solar-terrestrial environment**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1992. (Atmospheric and space science series).
- HUANG, C.-S.; BEAUJARDIERE, O. de L.; RODDY, P. A.; HUNTON, D. E.; LIU, J. Y.; CHEN, S. P. Occurrence probability and amplitude of equatorial ionospheric irregularities associated with plasma bubbles during low and moderate solar activities (2008–2012). **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 119, n. 2, p. 1186–1199, 2014. [3](#)
- HUANG, F.; LEI, J.; XIONG, C.; ZHONG, J.; LI, G. Observations of equatorial plasma bubbles during the geomagnetic storm of October 2016. **Earth and Planetary Physics**, v. 5, p. 416, 2021. [10](#)
- HUDSON, M. K.; KENNEL, C. F. The electromagnetic interchange mode in a partly-ionized collisional plasma. **Journal of Plasma Physics**, v. 14, n. 1, p. 121–134, 1975. [1](#)

- KIL, H.; HEELIS, R. A. Global distribution of density irregularities in the equatorial ionosphere. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 103, n. A1, p. 407–417, 1998. [3](#)
- KOMJATHY, A. Ionospheric effects on the propagation of electromagnetic waves. In: _____. **Encyclopedia of Remote Sensing**. [S.l.]: Springer New York, 2014. p. 286–291.
- MACDOUGALL, J. W.; ABDU, M. A.; JAYACHANDRAN, P. T.; CECILE, J. F.; BATISTA, I. S. Presunrise spread f at fortaleza. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. A10, p. 23415–23426, 1998. [13](#)
- MAKELA, J. J.; MERIWETHER, J. W.; LIMA, J. P.; MILLER, E. S.; ARMSTRONG, S. J. The remote equatorial nighttime observatory of ionospheric regions project and the international heliospherical year. **Earth Moon Planet**, p. 211–226, 2009. [4](#)
- MARTYN, D. F. Large-scale movements of ionization in the ionosphere. **Journal of Geophysical Research (1896-1977)**, v. 64, n. 12, p. 2178–2179, 1959. [2](#)
- MCCLURE, J. P.; SINGH, S.; BAMGBOYE, D. K.; JOHNSON, F. S.; KIL, H. Occurrence of equatorial f region irregularities: Evidence for tropospheric seeding. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, p. 29119–29135, 1998. [3](#)
- OTSUKA, Y. Review of the generation mechanisms of post-midnight irregularities in the equatorial and low-latitude ionosphere. **Progress in Earth and Planetary Science**, v. 5, 2018. [11](#)
- PIMENTA, A.; FAGUNDES, P.; BITTENCOURT, J.; SAHAI, Y. Relevant aspects of equatorial plasma bubbles under different solar activity conditions. **Advances in Space Research**, v. 27, n. 6, p. 1213–1218, 2001. ISSN 0273-1177. [6](#), [9](#)
- PIMENTA, A. A.; BITTENCOURT, J.; FAGUNDES, P.; SAHAI, Y.; BURITI, R. A.; TAKAHASHI, H.; TAYLOR, M. J. Ionospheric plasma bubble zonal drifts over the tropical region: a study using oi 630nm emission all-sky images. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 65, n. 10, p. 1117–1126, 2003. [5](#)
- SAHAI, Y.; AARONS, J.; MENDILLO, M.; BAUMGARDNER, J.; BITTENCOURT, J.; TAKAHASHI, H. Oi 630 nm imaging observations of equatorial plasma depletions at 16°s dip latitude. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 56, p. 1461–1475, 07 1994. [3](#), [10](#)

SOBRAL, J.; ABDU, M. Solar activity effects on equatorial plasma bubble zonal velocity and its latitude gradient as measured by airglow scanning photometers. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 53, n. 8, p. 729–742, 1991. [4](#)

SOBRAL, J.; ABDU, M.; TAKAHASHI, H.; SAWANT, H.; ZAMLUTTI, C.; BORBA, G. Solar and geomagnetic activity effects on nocturnal zonal velocities of ionospheric plasma depletions. **Advances in Space Research**, v. 24, n. 11, p. 1507–1510, 1999. [4](#), [5](#), [6](#)

SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A.; Batista, I. S. Airglow studies on the ionosphere dynamics over low latitude in brazil. **Annales de Geophysique**, v. 36, p. 199–204, jun. 1980. [6](#), [7](#)

SU, S.-Y.; CHAO, C. K.; LIU, C. H. On monthly/seasonal/longitudinal variations of equatorial irregularity occurrences and their relationship with the postsunset vertical drift velocities. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 113, n. A5, 2008. [2](#)

SU, S.-Y.; LIU, C. H.; HO, H. H.; CHAO, C. K. Distribution characteristics of topside ionospheric density irregularities: Equatorial versus midlatitude regions. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 111, n. A6, 2006. [2](#)

SULTAN, P. J. Linear theory and modeling of the rayleigh-taylor instability leading to the occurrence of equatorial spread f. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 101, n. A12, p. 26875–26891, 1996. [11](#)

TSUNODA, R. T. Control of the seasonal and longitudinal occurrence of equatorial scintillations by the longitudinal gradient in integrated e region pedersen conductivity. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 90, n. A1, p. 447–456, 1985. [7](#), [8](#)

VARGAS, F.; BRUM, C.; TERRA, P.; GOBBI, D. Mean zonal drift velocities of plasma bubbles estimated from keograms of nightglow all-sky images from the brazilian sector. **Atmosphere**, v. 11, n. 1, 2020. [4](#)