

# A ionosfera como uma cavidade ressonante: Ressonâncias de Schumann

Leandro Viscardi

Instituto de Física de São Carlos

2018

## Resumo

Ressonância de Schumann (RS) é o nome dado a um conjunto de frequências de ondas eletromagnéticas na cavidade natural formada pela superfície de um planeta (Terra) e sua ionosfera, no intervalo de frequência extremamente baixo (extreme low frequency, ELF), causada pela atividade elétrica do planeta (por exemplo, relâmpagos) e/ou seu ambiente atmosférico. Atualmente RS é um ramo da ciência de rádio que pode ser usada por exemplo para o sensoriamento da atividade de tempestades, ionosfera inferior e da temperatura de massas de ar tropical.

## 1 Introdução

Em 1952, Winfried Otto Schumann, um professor em Technische Hochschule München, Alemanha, publicou vários artigos postulando as ressonâncias das ondas de frequência extremamente baixa (ELF) que se propagam na guia de onda formada entre a superfície da Terra, ar e a ionosfera, geradas por descargas elétricas como relâmpagos [1].

Muitas pesquisas foram realizadas a partir de 1960 relacionada a física da então denominada ressonância de Schumann (RS). Contudo, apesar de bem escassas, também existem referências antecedendo Schumann e que possuem uma importância no estudo de RS. No entanto, devido ao maior impacto causado pelas pesquisas a partir de Schumann, o conjunto de frequências de ondas eletromagnéticas na cavidade natural formada pela superfície de um planeta e sua ionosfera, no intervalo de frequência extremamente baixo (ELF), causada pela atividade elétrica do planeta e/ou seu ambiente atmosférico, é denominado de ressonância de Schumann.

Após se passarem mais de 50 anos da primeira publicação de Schumann, as ressonâncias de Schumann passou a ser reconhecida como um ramo da ciência de rádio que é usada no sensoriamento da atividade de tempestades e da ionosfera inferior na escala planetária [2]. Em 1993, E. R. Williams,

descobriu uma interessante correlação entre a ressonância de Schumann e as temperaturas do ar tropical<sup>1</sup> [3]. Assim, a RS passou a ser uma ferramenta eficiente para o estudo de dois objetos relevantes: o primeiro é o aquecimento global, no qual pode ser avaliado através do monitoramento da atividade de relâmpagos. O segundo objetivo foi a localização global dos “sprites vermelhos”<sup>2</sup>, em que estão associados com fortes rajadas de relâmpagos.

Assim, os dados observacionais de ressonância de Schumann podem ser usados como um instrumento natural para o monitoramento e sensoriamento remoto de muitos fenômenos interessante como atividades de tempestades, ionosfera inferior, “sprites vermelhos”, temperatura global e etc. Para coletar os dados de RS é feito uso de um ou poucos observatórios terrestres. A vantagem desse método é sua “passividade”: apenas o equipamento receptor é aplicado, enquanto os sinais de rádio são gerados por fontes naturais de radiação. Assim, esses estudos são ecologicamente limpos. Contudo, a desvantagem dessa abordagem está conectada com a mesma característica: devida à sua própria origem, a solução dos problemas eletromagnéticos se torna muito complicado porque não temos muito conhecimento sobre a fonte de radiação.

<sup>1</sup>Os trópicos são definidos pelas linhas que separam as regiões da superfície terrestre, em que devido a sua rotação, cruzam em algum momento o seu plano orbital. Nos trópicos o ar é caracterizado por alta temperatura e umidade.

<sup>2</sup>Sprites são descargas elétricas de grande escala que ocorrem acima das nuvens de tempestades, dando origem à um fenômeno ótico na mesosfera (camada da atmosfera entre 50 a 85 km de altitude).

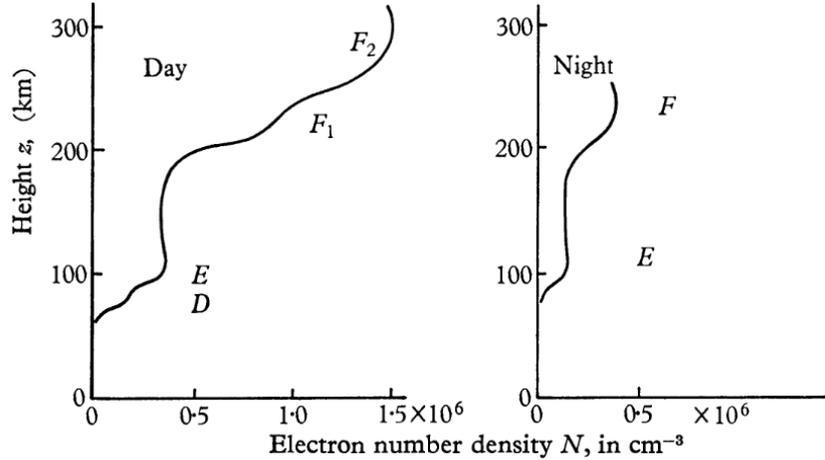


Figura 1: A curva mostra grosseiramente como é esperado a densidade eletrônica  $N$  depender com a altura  $z$ . As curvas de densidade eletrônica variam sobre um amplo intervalo e dependem notavelmente sobre o horário do dia, estação, número de manchas solares e se a ionosfera está perturbada ou não (*Budden 1961*).

## 2 Objetivo

Neste trabalho será descrita a estrutura da cavidade formada entre a superfície da Terra, ar e a ionosfera, em que se comportam como uma guia de onda de esferas concêntricas. O conjunto de frequências na banda ELF de ondas eletromagnéticas geradas pelas atividades de relâmpagos e que podem se propagar na cavidade Terra-

ionosfera é denominado de ressonância de Schumann. Assim, como uma aplicação de grande interesse dessas tais ressonâncias, será mostrado como as medidas de RS estão relacionadas com a temperatura global, deste modo, podendo ser usadas como um termômetro global.

## 3 Ionosfera da Terra

A ionosfera é por definição ionizada e, portanto, um plasma. A ionosfera corresponde à atmosfera superior terrestre, cerca de 60 km até 1000 km de altitude, sendo preenchida por elétrons, átomos carregados e moléculas. A ionização da ionosfera ocorre principalmente devida a radiação ultravioleta solar. Como a quantidade de radiação solar pode variar de acordo com o horário do dia, estação do tempo e localização geográfica, então a quantidade de ionização na ionosfera pode variar bastante, de 3 a 4 ordens, de acordo com a atividade solar [4].

### 3.1 Camadas da Ionosfera

A estrutura da ionosfera não é homogênea, assim, é conveniente dividir a ionosfera em certas camadas. As duas principais regiões são as camadas E e F [5].

A camada-E tem sua densidade eletrônica máxima na altura de 110 km e ela varia com o

horário do dia e estação do ano. Medidas de radio mostram que durante o dia a densidade eletrônica é da ordem de  $2,8 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ . Durante a noite a densidade eletrônica é da ordem de  $3 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ .

A camada-F é ionizada mais fortemente, com seu máximo de densidade eletrônica no intervalo de 200-400 km. Suas variações durante o dia e com as mudanças de estações são mais complexas que aquelas da camada-E. Durante a luz do dia a curva da densidade eletrônica com a altura, para a camada-F, frequentemente mostra uma protuberância subsidiária abaixo do máximo da densidade eletrônica (veja figura 1). Essa região é conhecida por camada-F<sub>1</sub> e ela pode ocasionalmente atingir um máximo. O principal máximo acima é conhecido por camada-F<sub>2</sub>. Em dias de verão a densidade eletrônica da camada-F varia no intervalo de  $5 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$  a  $8 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ . Ela é muito mais larga e também mais fortemente ionizada que a camada-E.

Existem algumas evidências que durante o dia pode haver uma outra camada inferior abaixo da camada-E com seu máximo de densidade eletrônica em torno de 80 km. Essa região é conhecida por camada-D. Normalmente o termo região-D é usado para se referir a parte da ionosfera abaixo de cerca de 90 km.

## 4 A Cavidade Terra-Ionosfera

Nosso planeta é uma esfera condutora coberta por um dielétrico, a atmosfera [2]. A espessura da camada de ar é pequena em comparação com o raio terrestre  $a \approx 6400$  km. A massa de ar até 30 km de altitude corresponde à cerca de 99% da massa atmosférica. Contudo, a pequena porção de ar restante ainda desempenha um papel importante em fenômenos eletromagnéticos. A condutividade do ar se torna perceptível em altitudes da ordem de poucas centenas de quilômetros, e pode aumentar até 6 ordens de magnitude ou mais a medida que se entra na ionosfera.

Devido ao aumento rápido da condutividade atmosférica é adequado tratar a massa de ar como uma camada dielétrica posicionada entre dois condutores relativamente bons, a Terra e a ionosfera. Deste modo, é formado uma cavidade onde as ondas de rádio se propagam em diferentes bandas de frequência. A densidade do plasma ionosférico controla a frequência superior das ondas de rádio que podem se propagar na guia de onda sem atravessarem a camada superior da ionosfera. Para ondas que excedem 10-20 MHz, a ionosfera se torna transparente.

### 4.1 Oscilações Eletromagnéticas entre Esferas Concêntricas Condutores

Em 1952 Schumann calculou as frequências de ressonância das ondas que podem se propagar na guia de onda formada entre a superfície da Terra, ar e ionosfera [1]. Para isso, ele usou um modelo muito simples que pode servir apenas como uma aproximação bruta da realidade. Primeiro, nem o contorno inferior (Terra) ou o contorno superior (ionosfera) são condutores perfeitos; segundo, a condutividade elétrica do ar é uma função crescente com a altura; e terceiro, o campo magnético da Terra e seus efeitos na propagação não são leva-

A camada inferior é a única em que possivelmente deve possuir contribuições de raios cósmicos na sua formação. As regiões ionizadas na atmosfera superior devem sua existência essencialmente a radiação solar. Quando essa radiação penetra na Terra ela produz elétrons e íons.

dos em consideração. Como uma consequência, os resultados do cálculo de uma “cavidade perfeita” diferem em vários aspectos daqueles de um modelo mais realístico e que também não possuem solução analítica.

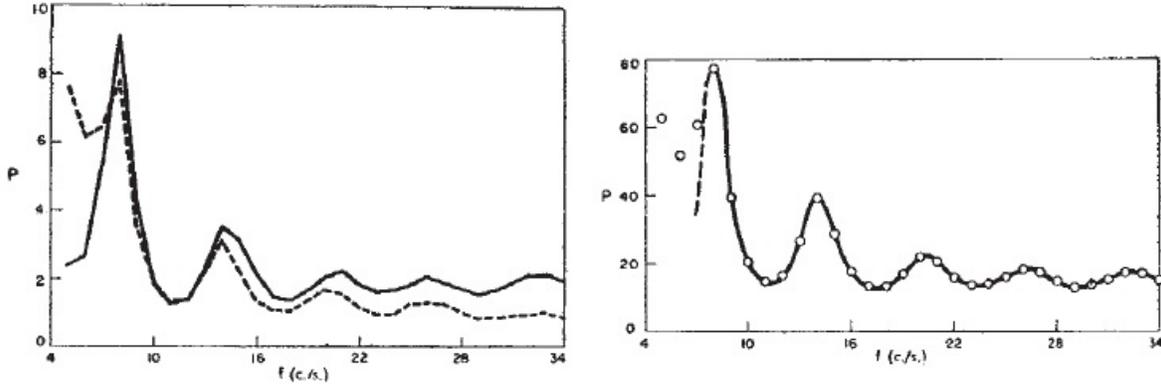
A regra para a frequência de ressonância derivado por Schumann para o modelo simplificado da cavidade Terra-ionosfera é dada por

$$f_n = \frac{c}{2\pi a} \sqrt{n(n+1)},$$

onde  $a$  é o raio da Terra,  $c$  é a velocidade da luz, e  $n$  é um número inteiro. Note que o produto  $n(n+1)$  é a então denominada constante de separação dos polinômios de Legendre, em que prova a forma esférica da cavidade. Podemos obter a sucessão de frequências de ressonância substituindo o valor de  $n$  por 1, 2, 3, ..., assim, temos  $f_1 = 10,6$ ,  $f_2 = 18,3$ ,  $f_3 = 26,0$  Hz, etc.

A existência das ressonâncias de Schumann foi provada nos experimentos realizados por Balser e Wagner [6–8], em que analisaram o espectro de potência do ruído de rádio natural na banda de frequência a partir de uns poucos Hz até algumas dezenas de Hz. As RS foi observada como uma série de picos no espectro nas frequências em torno de 8, 14, 20, 26 Hz, etc (veja figura 2).

Após a detecção de ressonância eletromagnética global devido a Balser e Wagner, o número de publicações sobre RS aumentou rapidamente. Similar a muitos outros fenômenos físicos, as aplicações militares direcionaram esses estudos. Nos anos 1960s–1980s, o interesse nessas ondas de longo comprimento estavam condicionados por possíveis aplicações em comunicações globais com submarinos [9]. Deste modo, o interesse por essas ondas desapareceu após o término da Guerra Fria. Ele reapareceu novamente apenas nos anos 1990s quando E. R. Williams demonstrou uma conexão das amplitudes RS com a temperatura global [3].



(a) Espectro típico de ruído ( $P$  é uma escala linear e  $f$  é dado por ciclos por segundo ou simplesmente Hertz). Linha cheia, registro durante o dia. Linha tracejada, registro durante a noite.

(b) Espectro composto de 10 registros diferentes. Cada registro tem um período de 12 minutos e eles são obtidos de diferentes partes do dia.

Figura 2: Espectro das Ressonâncias de Schumann (*Balsler* 1960).

## 5 Ressonância de Schumann e a Temperatura Global

Recentemente tem ocorrido considerável interesse sobre as flutuações de temperatura na atmosfera da Terra. A variabilidade da temperatura global, baseada em séculos de registros da temperatura do ar atmosférico, equivale a vários décimos de  $1^{\circ}\text{C}$ . Os relatórios sobre o aquecimento global reporta apenas uns poucos centésimos de 1% da temperatura absoluta. Assim, é valioso identificar parâmetros físicos mensuráveis que dependem não linearmente com as flutuações na temperatura atmosférica de modo que algum ganho na detecção desses parâmetros gerem uma mudança sutil na temperatura atmosférica. Atualmente se tem evidências bem convincentes que um desses parâmetros é a ressonância de Schumann [3].

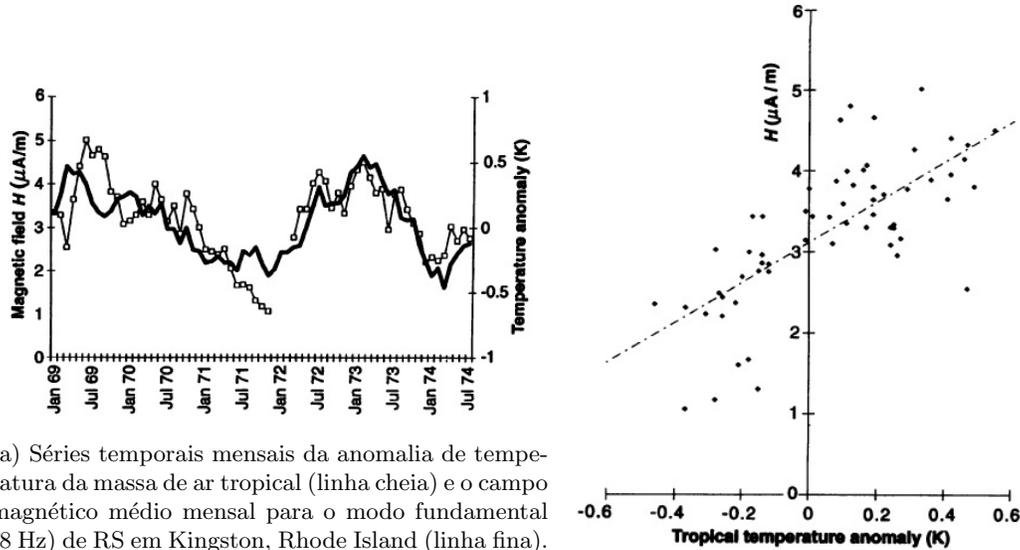
A partir de uma série de dados da magnitude do campo magnético RS no decorrer de cinco anos, E. R. Williams observou que as RS deveriam se comportar como um termômetro sensível tropical global. Os dados foram obtidos em Kingston, Rhode Island ( $71^{\circ}\text{O}$ ,  $41^{\circ}\text{N}$ ). Os valores médios do campo magnético  $H$  (para o modo ressonante fundamental  $\sim 8$  Hz) obtidos de registros diários são plotados na figura 3 junto com as flutuações médias mensais de temperatura  $\Delta T$  da massa de ar tropical.

As amplitudes RS seguem muito proximamente a variação de temperatura (Figura 3a), particularmente para um longo período de variação. Períodos de aquecimento estão associados com o aumento da

intensidade do campo  $H$  e os períodos de resfriamento com a diminuição de  $H$ . O longo período ( $\sim 40$  meses) de anomalia de temperatura envolve um aquecimento (ou resfriamento) do cinturão tropical e estão associados com o fenômeno de oscilação El Niño-Sul.

O coeficiente angular do ajuste linear dos dados na Figura 3b fornece a sensibilidade do termômetro global. Os dados mostram que a amplitude do campo magnético quase dobra para um aumento de  $1^{\circ}\text{C}$  na temperatura. As atividades instantâneas globais de relâmpagos é proporcional a densidade de energia na cavidade ressonante e, portanto, é proporcional ao quadrado da amplitude  $H$  [10]. A quadruplicação de relâmpagos por  $1^{\circ}\text{C}$  é consistente com a sensibilidade determinada por medidas locais das atividades de relâmpagos em estações tropicais (veja [3]) e, portanto, reforça a relação entre RS e temperatura; e como consequência também mostra a conexão entre um fenômeno local (atividade de relâmpago numa determinada região) e um global (temperatura da massa de ar).

Assim, as ressonâncias de Schumann fornecem uma integração natural das atividades globais de relâmpagos, e as observações mostram que RS aumenta com a temperatura em uma escala tropical global. Esta associação entre RS e temperatura fornece, portanto, um “termômetro” sensível tropical global.



(a) Séries temporais mensais da anomalia de temperatura da massa de ar tropical (linha cheia) e o campo magnético médio mensal para o modo fundamental (8 Hz) de RS em Kingston, Rhode Island (linha fina).

(b) Correlação entre a amplitude RS mensal e a anomalia de temperatura tropical mensal.

Figura 3: Foram utilizados os mesmos dados nesses gráficos (*Williams* 1992).

## Referências

- [1] Besser, B. P. “Synopsis of the historical development of Schumann resonances.” *Radio Science* 42.2 (2007).
- [2] Nickolaenko, Alexander, and Masashi Hayakawa. “Schumann Resonance for Tyros: Essentials of Global Electromagnetic Resonance in the Earth-Ionospheric Cavity.” *Springer Japan*. DOI 10 (2014): 978-4.
- [3] Williams, Earle R. “The Schumann resonance: A global tropical thermometer.” *Science* 256.5060 (1992): 1184-1187.
- [4] Colgate, S. A. “Space Plasma Physics: The Study of Solar-System Plasmas.” *Space Science Board (AGW Cameron, Chairman), National Academy of Sciences, Washington, DC Google Scholar* (1978).
- [5] Budden, Kenneth George. “The wave-guide mode theory of wave propagation.” *Logos Press* (1961).
- [6] Balser, M., and C. A. Wagner. “Observations of Earth-ionosphere cavity resonances.” *Nature* 188.4751 (1960): 638-641.
- [7] Balser, M., and C. A. Wagner. “Diurnal power variations of the Earth-ionosphere cavity modes and their relationship to worldwide thunderstorm activity.” *Journal of Geophysical Research* 67.2 (1962): 619-625.
- [8] Balser, M., and C. A. Wagner. “Diurnal power variations of the Earth-ionosphere cavity modes and their relationship to worldwide thunderstorm activity.” *Journal of Geophysical Research* 67.10 (1962): 4081-4083.
- [9] “Special issue of the ‘Sanguine’ project.” *IEEE Trans Com-22*, No.4 (1974).
- [10] Dolezalek, Hans, Reinhold Reiter, and Helmut E. Landsberg. “Electrical processes in atmospheres.” *Proceedings of the Fifth International Conference on Atmospheric Electricity held at Garmisch-Partenkirchen (Germany)* Vol. 2. (1974).