

“TUDO O QUE VOCÊ QUERIA SABER SOBRE SONDAGENS ATMOSFÉRICAS E SUA APLICAÇÃO NO VOO À VELA, E TEVE MEDO DE PERGUNTAR...”

ou

“*SOUNDING DATA AND PLOTS FOR DUMMIES!*”

por **António José Sá Mota**
(revisado por Francisco Almeida)

Os diagramas obtidos por **Sondagem Atmosférica** são de fácil interpretação e permitem ao piloto do voo à vela prever, com bastante rigor, para um dado espaço e tempo, (i) o aparecimento de cúmulos versus existência de térmica azul, (ii) a altura à base das nuvens ou o tecto disponível nesse dia (térmica azul) e (iii) a possibilidade de sobre-desenvolvimento (aparecimento de cumulonimbus ou de estratocumulus passíveis de comprometer o voo). Na Figura 1 podemos observar um diagrama construído com dados obtidos por simulação computacional (previsão), para a zona de Évora (38,5° N / 7,9° W), dia 10 de Junho de 2001, às 15 horas.

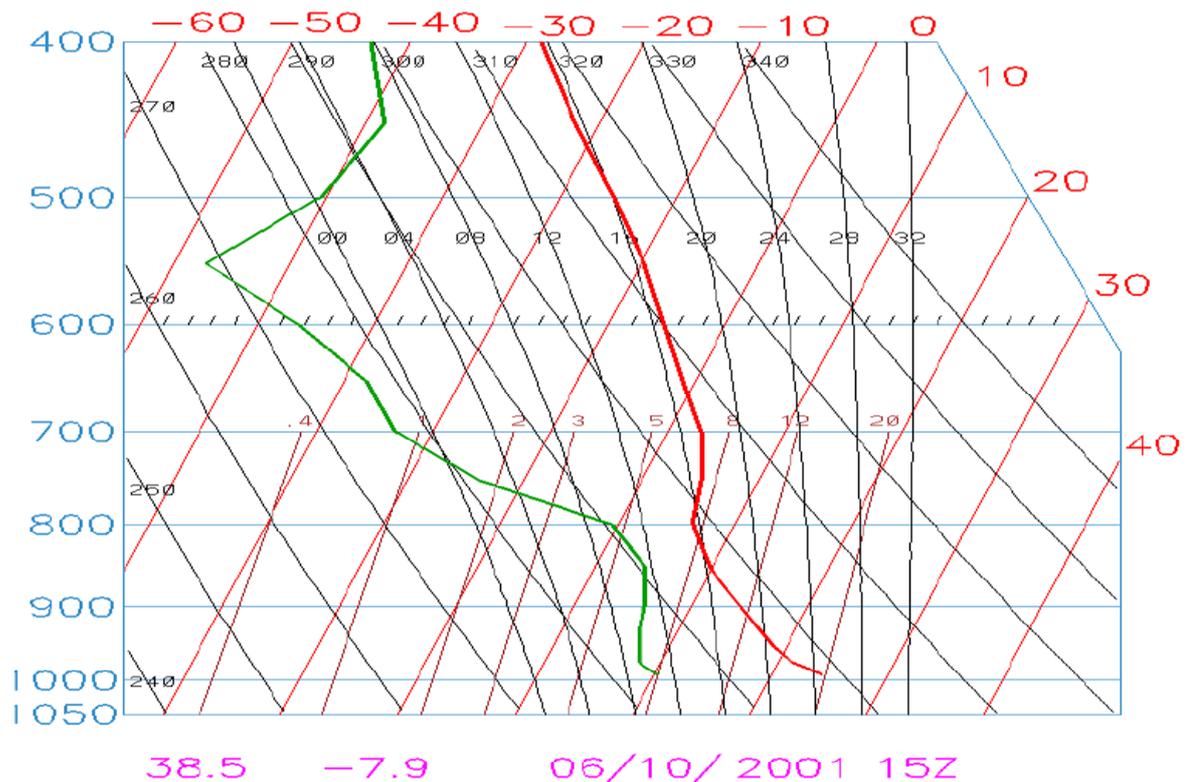


Figura 1: Exemplo de um Diagrama Skew-T / Log-P.

A aquisição de dados faz-se normalmente através de um balão meteorológico (sonda), que está equipado de barómetro, termómetro e higrómetro, além de um emissor rádio. Os dados vão sendo transmitidos continuamente para a estação meteorológica terrestre à medida que a sonda ganha altitude. Em locais onde não se fazem sondagens, os dados e diagramas resultam não de

medições reais mas antes de interpolações de dados ou de **previsões**, usando modelos matemáticos bastante complexos, que exigem elevado esforço computacional.

Os diagramas mais comuns de se encontrar são os diagramas de Stüve e os diagramas Skew-T / Log-P. As diferenças entre ambos têm apenas a ver com a inclinação das várias curvas, assim como escalas e unidades, etc.. O diagrama **Skew-T / Log-P** tem este nome devido ao facto de no eixo dos XX' termos linhas isotérmicas inclinadas ("skew-T") e de no eixo dos YY' termos linhas isobáricas separadas logarithmicamente ("Log-P"). No diagrama Skew-T / Log-P encontramos as seguintes 5 referências gráficas (ver Figura 2): (i) linhas isotérmicas, (ii) linhas isobáricas, (iii) linhas relativas ao gradiente adiabático seco, (iv) linhas relativas ao gradiente adiabático saturado e (v) linhas de humidade absoluta constante (isopletas).

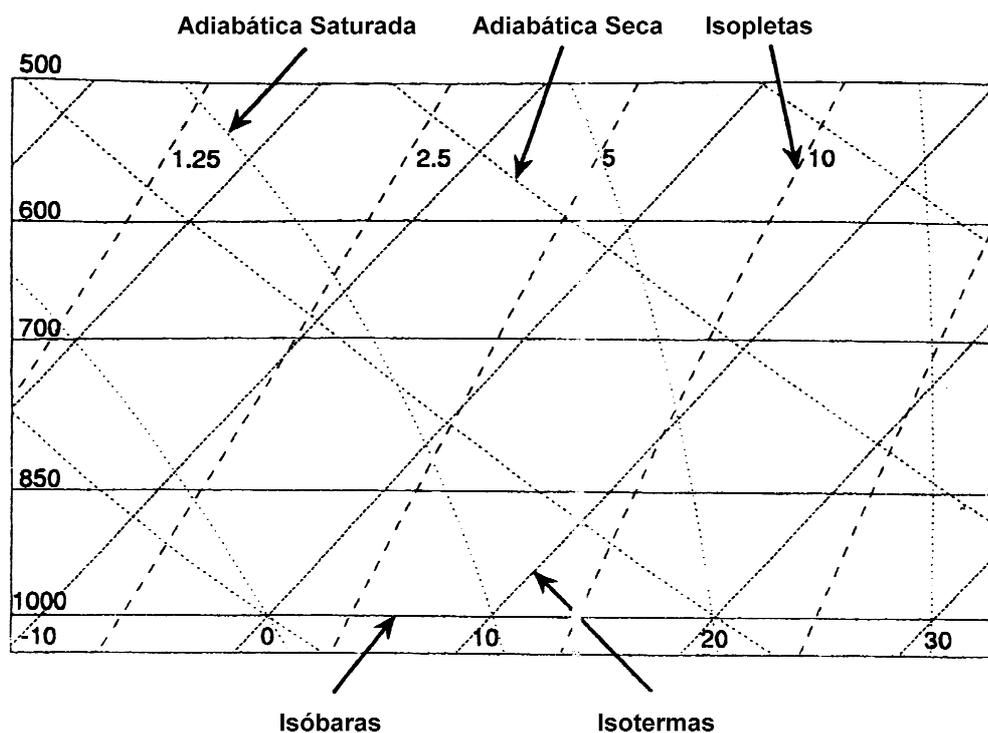


Figura 2: Referências de um Diagrama Skew-T / Log-P.

1. **Isotermas**: eixo XX'; rectas inclinadas, a subir para a direita (a **vermelho** na Figura 1); notar a presença de legendas, relativas à graduação em graus Celsius;
2. **Isóbaras**: eixo YY'; rectas horizontais (a **azul** na Figura 1), separadas logarithmicamente e graduadas em hectopascal (hPa) - a unidade recomendada na Europa continental - ou em milibares (mBar) - corrente nos países de língua inglesa; estas linhas traduzem pressões na atmosfera-padrão (*standard atmosphere*), a que correspondem determinadas altitudes (em números redondos: 1013 hPa => altitude de 0 m (referência: nível médio das águas do mar), 500 hPa => altitude de 5500 m); a disposição logarithmica (invertida) no diagrama permite ler altitudes de forma aproximadamente linear (por exemplo, se entre 1000 hPa e 500 hPa distanciar no diagrama x cm, então 1 cm na vertical = 5500/x metros de altitude); para trabalhar com o diagrama devemos conhecer a pressão correspondente à altitude do aeródromo em causa;
3. **Gradiente adiabático seco**: curvas inclinadas, a subir para a esquerda (a **preto** na Figura 1);
4. **Gradiente adiabático saturado**: curvas inclinadas, a subir para a esquerda (a **preto** na Figura 1); a saturada distingue-se da seca porque é mais curvilínea e vertical; mais correctamente, estas curvas dever-se-iam chamar pseudo-adiabáticas;
5. **Isopletas**: rectas inclinadas (a **castanho** na Figura 1), a subir para direita, graduadas em gramas de vapor de água por kg de massa de ar seco; as isopletas indicam qual a quantidade máxima de vapor de água que pode estar presente na atmosfera para cada combinação de temperatura e altitude de pressão, i.e. a saturação; o vapor de água de saturação aumenta com a temperatura e a altitude de pressão.

O **gradiente adiabático** é a taxa de variação de temperatura de uma parcela de ar que ascende ou desce na atmosfera sem ganhar ou perder calor com o meio envolvente. A parcela de ar sofre uma transformação termodinâmica com a variação de altitude (devido à acção da pressão exterior) que provoca mudanças na sua densidade e temperatura. Quando este processo ocorre sem trocas de energia com o exterior, recebe o nome de adiabático (e isentrópico, quando é reversível). Ora a massa de ar que ascende sob a forma de uma térmica "funciona" adiabaticamente, pois praticamente não se mistura com o ar circundante, excepto na sua parte superior.

No caso de ar não saturado (i.e. ar com humidade mas cuja temperatura não é suficientemente baixa para provocar condensação de água) o gradiente adiabático é de aproximadamente 10°C por cada 1000 metros (**gradiente adiabático seco**). Se o ar estiver saturado (já não puder conter mais vapor de água à temperatura em causa) o gradiente é menor, cerca de $5^{\circ}\text{C} / 1000\text{ m}$ (**gradiente adiabático saturado**), ao nível do mar, na atmosfera-padrão. Este facto tem a ver com o **calor latente**. Quando se dá a condensação de água, é libertada energia (e vice-versa no caso da evaporação, é preciso fornecer calor para se dar a passagem do estado líquido para o gasoso). Assim, a taxa a que o ar arrefece à medida que sobe é menor (o ar ao subir arrefece e vai libertando água, libertando também calor, que "suaviza" a perda de temperatura do ar).

Os dados medidos pela sonda atmosférica são usados para, sobre o diagrama Skew-T / Log-P com estas 5 referências, construir duas curvas, uma relativa ao (i) **perfil da temperatura** e outra relativa ao (ii) **perfil do ponto de orvalho**, como ilustra a Figura 3.

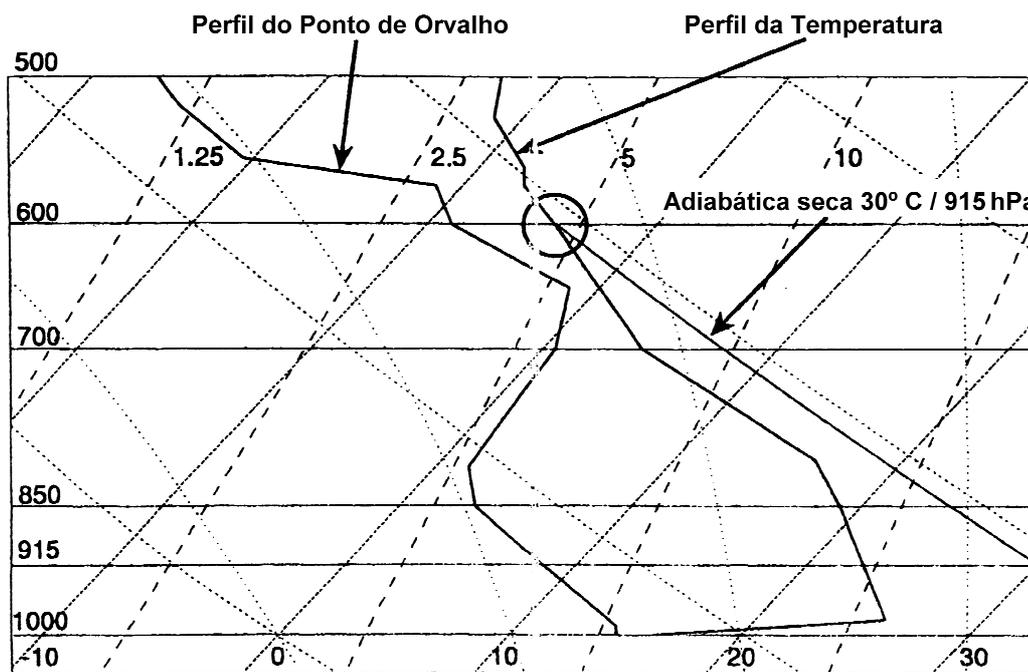


Figura 3: Diagrama Skew-T / Log-P com dados de sondagem (perfis).

Temos então que estes perfis resultam de medições reais (ou previsões/interpolações da dados). O **perfil de temperatura** (curva de aspecto irregular, a **vermelho** na Figura 1) dá-nos a forma como nesse dia e nesse local a temperatura do ar varia em altitude. O **perfil do ponto de orvalho** (curva a **verde** na Figura 1) indica-nos, para cada altitude de pressão, a temperatura que o ar teria de descer para começar a orvalhar (condensar), ficando, pois, saturado. Este perfil encontra-se sempre à esquerda do perfil da temperatura seca.

O perfil da temperatura obtido por uma sondagem atmosférica recente é em geral representativo das condições atmosféricas nas horas seguintes numa zona geográfica relativamente extensa em

redor do ponto de medida, pois o efeito de aquecimento do ar ao longo do dia afecta apenas as camadas atmosféricas mais próximas do solo (em geral poucas centenas de metros). A níveis mais elevados, o perfil atmosférico é lentamente modificado por acção da subsidência associada aos anticiclones. Alterações bruscas dão-se quando frentes quentes ou frias trazem novas massas de ar.

Um aspecto muito importante é a existência de **inversões** na atmosfera, i.e., segmentos do perfil em que o **ar aumenta de temperatura com a altitude**. As inversões são sinónimas de estabilidade e estratificação ao impossibilitarem o desenvolvimento da convecção (mas não implica imobilidade - o *wind shear* está quase sempre associado a inversões). Na Figura 3 há inversões à altitude de 520 hPa e de 1000 hPa. Esta última é típica do início do dia, e é causada pelo arrefecimento do solo durante a noite por radiação para o espaço (**inversão nocturna**). O despreendimento de térmicas aproveitáveis para o voo à vela só se dá após a temperatura do solo alcançar um valor suficiente para romper a camada de inversão nocturna - é a chamada **temperatura de disparo**.

O uso da sondagem para prever condições para o voo à vela baseia-se em comparar a evolução da temperatura de uma parcela hipotética de ar que ascende adiabaticamente desde o solo com o perfil de temperatura da atmosfera medidos para esse dia e local.

Passando finalmente aos procedimentos de manipulação e interpretação dos diagramas Skew-T / Log-P, o primeiro passo a dar é supor uma **situação de térmica azul**. Tomando o exemplo genérico da Figura 3, temos:

- o aeródromo encontra-se a uma altitude de pressão de 915 hPa e a temperatura máxima no solo prevista para o dia é de 30° C; a partir do prolongamento da isotérmica de 30° C até 915 hPa, traça-se uma recta de gradiente adiabático seco, até que esta intercepte o perfil da temperatura do ar exterior; nesta situação, a temperatura do ar da térmica que se elevou desde o solo (915 hPa) iguala a do ar ambiente, igualando-se também as densidades; consequentemente, o ar não pode continuar a subir; neste ponto obtemos então o **tecto** previsto, que é de 600 hPa (cerca de 4000 metros).

Mas temos de considerar a possibilidade de se formarem cúmulos! Recorre-se então a curvas e dados para o ar húmido. Considere-se a Figura 4 (perfis idênticos à Figura 3).

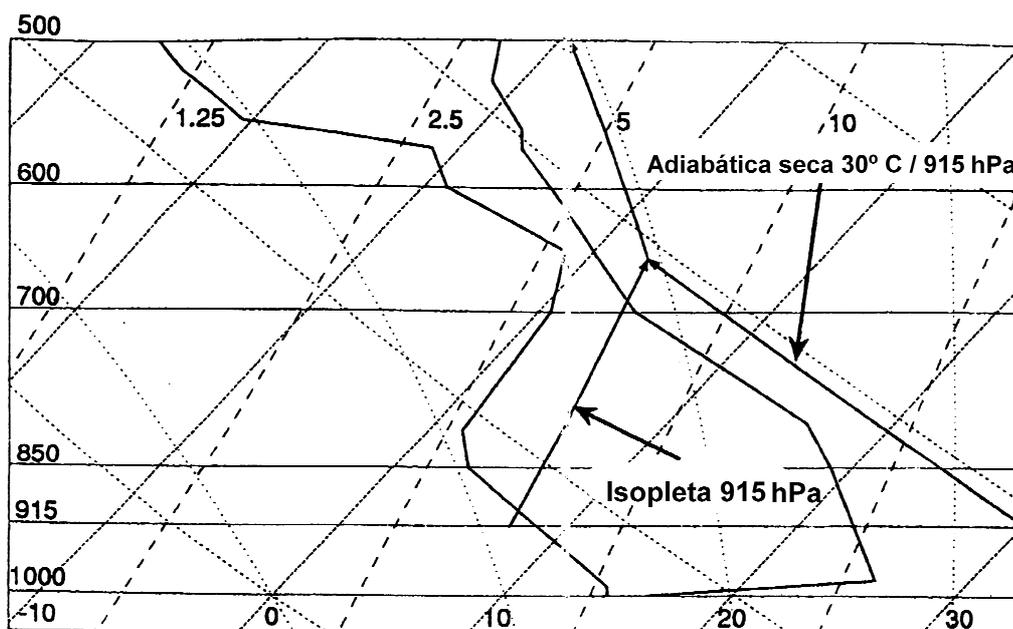


Figura 4: Diagrama Skew-T / Log-P com dados de sondagem (perfis).

O algoritmo patente nesta Figura 4 que permite determinar se se vão formar cúmulos é o seguinte:

- traça-se uma isopleta a partir do ponto de orvalho à superfície (intercepção do perfil do ponto de orvalho com a altitude de pressão de 915 hPa, correspondente à altitude do aeródromo – notar que na figura esse ponto está ligeiramente deslocado, por equívoco) até que esta intercepte a curva do gradiente adiabático seco (30° C / 915 hPa); neste ponto o ar ascendente desde o solo encontra-se completamente saturado, pelo que qualquer subida adicional leva à condensação e formação de nuvens; assim sendo, temos neste ponto a **altura à base das nuvens**: 675 hPa (a que correspondem cerca de 3000 metros).

Temos, pois, que na situação das Figuras 3/4 iriam aparecer cúmulos, pois as “contas” supondo térmica azul deram um tecto de 4000 metros, enquanto que as “contas” supondo cúmulos revelaram uma altura à base das nuvens de 3000 metros (3000 < 4000).

Portanto, obtemos 3000 m de altura à base das nuvens, que é o **tecto prático** usado pelos planadores (“*thou shalt never enter into the clouds!*”). Mas apesar disso, interessa sempre calcular o **tecto teórico**, ou mais claramente dito, interessa determinar a espessura vertical das nuvens, para avaliar os riscos de sobre-desenvolvimento (notar que o valor de 4000 metros foi “deitado fora”, pois supunha térmica azul¹). Com efeito, mesmo a partir do tal ponto de 675 hPa o ar continua a subir, condensando-se água e engrossando na vertical a nuvem. Onde é que isto pára?

- traça-se a partir do ponto de intercepção anteriormente obtido (em 675 hPa) uma curva adiabática saturada, até que esta intercepte o perfil da temperatura;

Neste exemplo das Figuras 3/4 o ponto de intercepção até se encontra fora do gráfico! Estamos, pois, perante uma situação em que se prevê o surgimento de nuvens de grande desenvolvimento vertical (**cumulonimbus**), passíveis de causar trovoadas e chuvada forte. O piloto desprevenido pode, numa prova de distância, após fazer muitos quilómetros, ver o seu caminho de regresso ao aeródromo barrado por cumulonimbus, que se formam tendencialmente a meio da tarde, quando a temperatura do solo² é máxima e as térmicas mais fortes.

Num futuro artigo mostrar-se-ão exemplos de perfis do ar associados a situações meteorológicas típicas (após passagem de frente fria, sob acção de anticiclone de bloqueio, etc.). Tratar-se-á igualmente da interpretação de dados de sondagens em situações especiais, mormente quando os modelos matemáticos tendem a falhar (vento forte, influência de frentes complexas, etc.).

Referência final para um *site* na *internet* que disponibiliza perfis atmosféricos:

- <http://www.arl.noaa.gov/ready/cmet.html>; preencher coordenadas; seleccionar “sounding”; limitar a altitude de pressão a 400 mB; preencher outros campos relevantes, como a resolução do gráfico, data, etc. e introduzir o código de acesso.

¹ No caso de térmica azul, podemos ainda especular sobre o **verdadeiro tecto**: este método pressupõe que as térmicas elevam-se adiabaticamente. Ora isto é apenas uma aproximação à (complexa) realidade, pois são sempre inevitáveis trocas de energia com o ar ambiente, i.e., o ar em elevação cede energia para o exterior e o tecto deveria ser inferior ao previsto. No entanto, 2 factores contribuem para contrabalançar esta realidade, podendo até dar-se que o tecto seja ligeiramente superior ao previsto: (i) a **energia cinética** do ar em movimento, que lhe dá inércia mecânica, permitindo-lhe subir mais, e (ii) o facto da **humidade presente no ar de térmica ser superior à do ar que a rodeia**, em geral, devido à evaporação de água dos solos. Com efeito, o ar sobe enquanto for menos denso que o ar que o rodeia. Ora um dado volume de ar húmido é menos denso que um mesmo volume de ar seco, pelo que quando as temperaturas do ar da térmica e do ar exterior se equilibrarem, a térmica pode ainda continua a subir, por o seu ar ser mais húmido e menos denso!

² Nota importante relativa à temperatura máxima prevista para o solo: neste exemplo em concreto, os 30° C poderiam resultar duma previsão de cerca 25° C para temperatura máxima do ar. Com efeito, as estações meteorológicas falam em temperaturas de ar, que, em conformidade com a prática de colocação dos termómetros das estações, são tomadas a uma dada altura do solo (mais de 2 metros) e em condições abrigadas do sol. Ora as térmicas são formadas devido à condução de calor para o ar a partir do solo, pelo que é a temperatura do solo que deve ser usada nas “contas” e não a temperatura do ar, sendo que o solo aquece sempre uns poucos graus Celsius a mais.