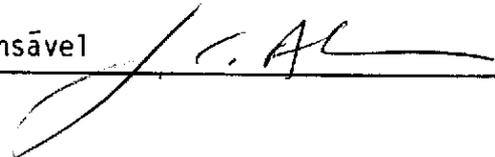


1. Publicação nº <i>INPE-2571-PRE/219</i>	2. Versão	3. Data <i>Nov., 1982</i>	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem <i>DME/DAM</i>	Programa <i>APLIM</i>		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>SONDADOR ACÚSTICO</i> <i>METEOROLOGIA</i>			
7. C.D.P.: <i>551.508</i>			
8. Título <i>SONDAC - TESTE, CALIBRAÇÃO E UTILIZAÇÃO DE UM SONDADOR ACÚSTICO PARA FINS METEOROLÓGICOS</i>		10. Páginas: <i>13</i>	
9. Autoria <i>Fausto Carlos de Almeida</i> <i>Jorge Artur Ramos*</i>		11. Última página: <i>12</i>	
Assinatura responsável 		12. Revisada por <i>Y. Viswanadham</i> <i>Y. Viswanadham</i>	
		13. Autorizada por <i>Parada</i> <i>Nelson de Jesus Parada</i> <i>Diretor</i>	
14. Resumo/Notas <p><i>Neste trabalho são apresentados os resultados dos testes do SONDAC, Sondador Acústico em desenvolvimento pelo INPE com 130 W. de potência elétrica pulsada, frequência variável de 1500, 2500 e 3500 Hz, ciclos completos de Transmissão/recepção de 1 a 10 segundos e pulsos com duração de 10, 100 e 250 m seg. Uma síntese histórica e teórica sobre a utilização de sondadores Acústicos também é apresentada.</i></p>			
15. Observações <i>*Departamento de Meteorologia-IAG-USP/FAPESP.</i> <i>Apresentado no II Congresso Brasileiro de Meteorologia.</i> <i>Pelotas, RS, 1982.</i>			

SONDAC - TEST, CALIBRATION AND USE OF AN ACOUSTIC SOUNDER FOR
METEOROLOGICAL PURPOSES

JORGE ARTUR RAMOS*
FAUSTO CARLOS DE ALMEIDA

INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE
CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO - CNPq
12200 - SÃO JOSÉ DOS CAMPOS - SP

ABSTRACT

The first results of a field test of an acoustic sounder being developed at INPE, is presented. The SONDAC, as it is called, has 130W of pulsating electric power, variable frequency of 1500, 2500 and 3500HZ, complete transmission reception cycles from 1 to 10 sec and pulses of 10, 100 and 200m sec, duration. A brief historic and theoretical review about acoustic sounders and its utilization is also presented.

*Departamento de Meteorologia-IAG-USP/FAPESP.

SONDAC - TESTE, CALIBRAÇÃO E UTILIZAÇÃO DE UM SONDADOR
ACÚSTICO PARA FINS METEOROLÓGICOS

JORGE ARTUR RAMOS*
FAUSTO CARLOS DE ALMEIDA

INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE
CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO - CNPq
12200 - SÃO JOSÉ DOS CAMPOS - SP

RESUMO

Neste trabalho são apresentados os resultados dos primeiros testes do SONDAC, Sondador Acústico em desenvolvimento pelo INPE com 130W de potência elétrica pulsada, frequência variável de 1500, 2500 e 3500 Hz, ciclos completos de transmissão/recepção de 1 a 10 segundos e pulsos com duração de 10, 100 e 250 m seg. Uma síntese histórica e teórica sobre a utilização de sondadores Acústicos também é apresentada.

1. SÍNTESE HISTÓRICA

Experiências realizadas na Inglaterra por Derham (1708) e na Itália por Avenani por volta de 1704, sobre a propagação do som e sua audibilidade, marcam o início da Acústica Atmosférica. Somente um século e meio após, as investigações de Tyndall (1874) sobre o espalhamento do som na atmosfera revelam que o espalhamento resultava principalmente de flutuações de temperatura. Whipple (1923) usando técnicas sônicas aplicadas em levantamentos geológicos verifica a existência de temperaturas elevadas na extratosfera. Gilman et alii (1946), preocupados em determinar as causas do decaimento de ondas de rádio na atmosfera, construíram o precursor da sonda acústica atual, uma espécie de "radar" sônico de baixa frequência por eles denominado SODAR (Sound Detecting and Ranging). Trens de onda sonora de audiodiferença eram lançados verticalmente para cima e os ecos de magnitude suficiente eram mostrados num osciloscópio. Observou-se que os sinais mais intensos estavam associados a fortes inversões térmicas. Ecos relativamente fortes também apareciam quando a atmosfera se encontrava em estado de considerável turbulência.

Mc Allister (1968) introduziu melhoramentos significativos no SODAR, em especial um circuito comutador de transmissão-recepção que permite utilizar a mesma antena para a transmissão e recepção do sinal, e um registrador fac-símile adaptado do sonar para o registro do sinal recebido. Beran et alii (1971a) adicionam ao SODAR a capacidade de medir a variação de frequência entre o sinal transmitido e o sinal recebido (efeito Doppler), com a qual se determinou velocidades verticais do vento em plumas convectivas e em quebra de ondas durante uma passagem frontal. Neste experimento o sinal acústico retroespalhado era registrado em fita magnética. O emprego da mesma antena para a transmissão e recepção constitui o chamado sistema monoestático. Sistemas biestáticos, onde a antena de transmissão é separada da antena de recepção e a capacidade Doppler é incluída, são usados para a determinação da velocidade vertical e horizontal do vento, a exemplo de Beran et alii (1971b).

A sondagem acústica da atmosfera com o uso do SODAR tem-se desenvolvido rapidamente nos últimos 15 anos, principalmente por se tratar de um instrumento relativamente barato, de fácil manutenção e operação permitindo uma observação contínua de fenômenos da troposfera inferior de interesse para estudos da Poluição, da Aviação e de Previsão a curto prazo. A observação contínua do SODAR supre a falta de informações entre radiossondagens, as quais não revelam e nem acompanham o momento de início ou fim de algum fenômeno de interesse.

2. SÍNTESE DA TEORIA

Trens de onda acústica ou eletromagnética, propagando-se através da atmosfera, estão sujeitos a uma atenuação resultante de dois efeitos: absorção e espalhamento. Para o caso de ondas acústicas a absorção da energia é usualmente introduzida por um fator e^{-2mR} , onde m é o coeficiente de absorção suposto constante sobre a distância $2R$ de ida e volta ao longo do feixe. O valor de m para diferentes frequências e umidade relativa é dado por Harris (1966). O espalhamento da radiação acústica na atmosfera tem sido descrito quantitativamente por Kallistratowa (1961) que mostrou que, para ar seco:

$$d\sigma = 2\pi k^4 V \cos^2 \theta \left(\frac{1}{c^2} E(K) \cos^2 \frac{\theta}{2} + \frac{1}{4T^2} \Phi_T(K) \right) d\Omega \quad (1)$$

onde:

$d\sigma$ - é a fração da energia acústica incidente, que é espalhada por irregularidades em um volume V , num ângulo θ dentro de um cone de ângulo sólido $d\Omega$;

$k=2\pi/\lambda$ - é o número de onda da onda acústica;

c - é a velocidade do som no volume espalhador V ;

T - é a temperatura absoluta no volume espalhador V ;

$E(K)$ e $\Phi_T(K)$ - são respectivamente, as intensidades espectrais das flutuações na velocidade do vento e na temperatura, sendo funções do número de onda efetivo $K = 2k \left(\sin \frac{\theta}{2} \right)$.

O termo $\cos^2 \frac{\theta}{2}$ na Equação torna-se nulo para o caso de retroespalhamento ($\theta=180^\circ$), significando que não serão recebidos ecos de turbulência mecânica, e a Equação 1 expressa em termos de τ é dada por:

$$\sigma = 2\pi k^4 \frac{\Phi(2k)}{4T^2} \quad (2)$$

A Equação 2 mostra que a energia espalhada dependerá somente da intensidade espectral da flutuação de temperatura, a qual é função da metade do comprimento da onda acústica incidente, ou seja, qualquer turbulência que mistura parcelas de ar de diferentes temperaturas, numa escala 1 da ordem de metade do comprimento de onda incidente, causará um gradiente de temperatura em pequena escala e oferecerá condições para a formação de um refletor sônico na atmosfera.

Obukhov (1941) dá a intensidade espectral das flutuações de temperatura para o número de onda efetivo como sendo:

$$\Phi_T(K) = 0.033 C_T^2 K^{-11/3} \quad (3)$$

onde:

C_T^2 - é uma medida da intensidade das flutuações de temperatura e é dado por:

$$C_T^2 = \frac{(T(r + r_1) - T(r_1))^2}{r^{2/3}} \quad (4)$$

onde:

$T(r + r_1)$ e $T(r)$ são as temperaturas em dois pontos separados pela distância r .

Mc Allister (1969) mostra que fortes retornos acústicos são obtidos de regiões que são superadiabáticas, enquanto nenhum eco é observado, quando a estratificação da atmosfera é neutra. Em condições de estabilidade podem ser observados alguns ecos. Numa inversão os retornos acústicos são máximos na base e no topo, pois estas regiões são zonas de cisalhamento que dão origem à turbulência. A estabilidade da camada de inversão tende a limitar a escala de turbulência, tanto na base como no topo, causando diferenças de temperatura em pequena escala e favorecendo a formação dos refletores sônicos. A presença de uma camada de inversão causará o registro de retornos acústicos orientados horizontalmente. Retornos orientados verticalmente são observados no caso de convecção. Significantes gradientes horizontais de temperatura potencial e o cisalhamento necessário para produzir mistura em pequena escala estão presentes nas superfícies de "entrainment" dessas células convectivas. Os refletores sônicos, assim formados, produzirão registros acústicos verticais identificados por uma base mais larga que o topo.

A ordem de magnitude da energia recebida e medida pelo SODAR pode ser estimada pela expressão:

$$\frac{P_R}{E_R} = [P_T \cdot E_T] \cdot [e^{-2mR}] \cdot \left[\frac{1}{2} \tau C\right] \cdot \left[\left(\frac{A}{R^2}\right) \cdot G\right] \cdot \sigma \quad (5)$$

onde:

- P_R - é a potência elétrica recebida;
- E_R - é a eficiência de conversão da potência acústica recebida em potência elétrica;
- P_T - é a potência elétrica transmitida;
- E_T - é a eficiência de conversão da potência elétrica em potência acústica;
- e^{-2mR} - é a perda de energia devido à absorção atmosférica;
- C - é a velocidade do som na região de espalhamento;
- τ - é o tempo de duração do pulso acústico;
- A - é a área geométrica da abertura da antena;
- G - é a área efetiva da antena (geralmente igual à metade da área geométrica);
- σ - é a seção de retroespalhamento.

A frequência de operação do SODAR está relacionada ao alcance desejado, já que a absorção é diretamente proporcional à frequência utilizada. A resolução vertical do SODAR será da ordem de metade do comprimento do pulso, isto é, cerca de 10m se um pulso de 60m seg for usado.

3. O SONDAC

A operação do Sondador Acústico (SONDAC), em desenvolvimento, pode ser visualizada a partir de seu diagrama de blocos. (Figura 1).

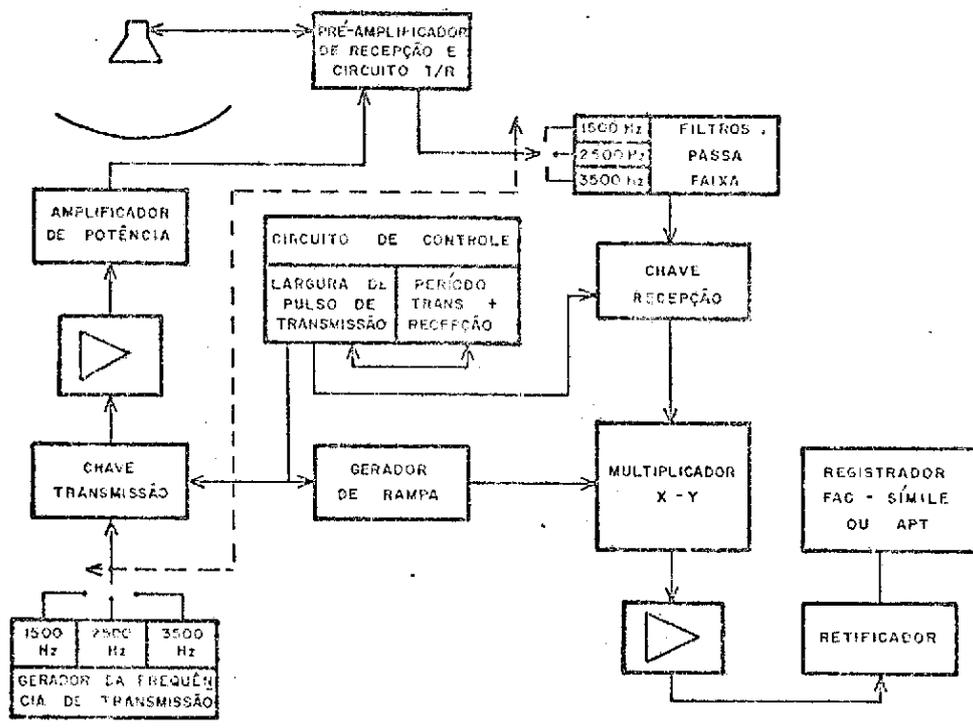


Fig. 1 - Diagrama de blocos do Sondador Acústico (SONDAC).

O gerador do sinal a ser transmitido é um multivibrador estável, e a sua frequência pode ser fixada externamente em 1500, 2500 e 3500 Hz. O transdutor eletroacústico, que opera como altofalante e microfone simultaneamente é uma corrente para média frequência, para a qual adotaram-se os valores de eficiência de conversão da potência elétrica em potência acústica (E_T) e de eficiência de conversão da potência acústica em potência elétrica (E_R), respectivamente iguais a 0,4 e 0,1. O circuito de controle gera os sinais necessários para a comutação transmissão-recepção e podem ser escolhidos períodos de 1 a 10 segundos. A largura do pulso de transmissão pode ser de 10, 100 ou 250ms e os sinais acústicos são transmitidos e recebidos através do mesmo conjunto antena/transdutor. Maiores detalhes sobre a parte eletrônica são dados por Fukuda (1981).

A antena utilizada pelo SONDAC é um holofote da marinha, cujo refletor é uma parábola de diâmetro igual a 110 cm, de acordo com medições feitas com um parquímetro de profundidade, utilizando o método "best fit curve". O anteparo lateral cilíndrico, com 60 cm de altura, foi revestido internamente com absorvente acústico, bem como a parede externa do refletor. Utilizando um indicador de nível de intensidade de ondas acústicas foi determinado o diagrama polar do padrão de ganho da antena nas três diferentes frequências.

A Figura 2 revela a necessidade de um anteparo lateral mais elevado e de uma melhor isolamento acústico, para que não se verifique a captação de ruídos laterais não desejados, bem como não incomode o homem por ocasião da transmissão do pulso. O pré-amplificador de recepção possui um ganho de 10^6 e boas características de ruído. Após a recepção o sinal é filtrado através de um filtro passa-faixa na mesma frequência de transmissão. O conjunto multiplicador mais o gerador de rampa serve para dar ao sinal recebido um ganho variável (linearmente crescente) em relação ao tempo de ocorrência dos ecos.

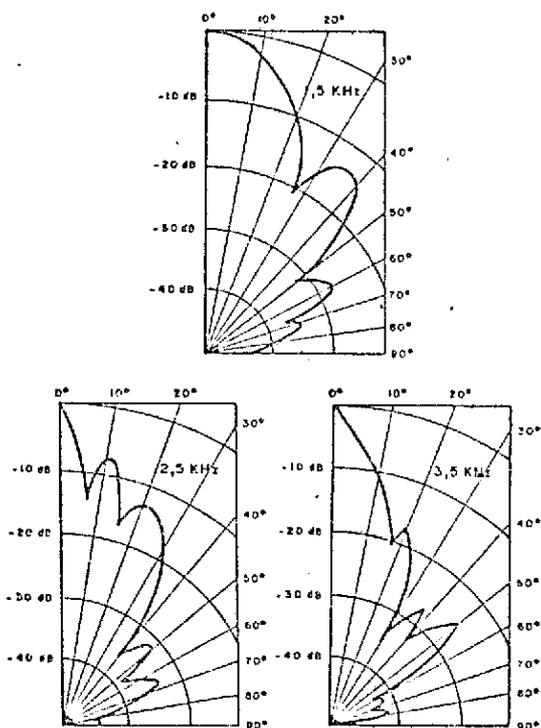


Fig. 2 - Diagrama polar do padrão de ganho da antena para as três diferentes frequências.

Para a gravação dos sinais acústicos transmitidos e recebidos pelo SONDAC, utiliza-se atualmente o sistema imageador da estação APT. Uma câmara fotográfica registra o sinal luminoso da tela do osciloscópio, com o filme movendo-se a uma velocidade de 75 mm h^{-1} . Um exemplo simulado deste sistema de gravação é mostrado na Figura 3. A faixa branca na base é o sinal de transmissão cuja espessura é proporcional ao tempo de duração do pulso. As demais marcas claras são ruídos na faixa de frequência da transmissão, e o retorno horizontal registrado no meio do filme são os sinais acústicos recebidos de uma fonte de 10^{-6} W de potência transmitidos em intervalos regulares por um segundo altofalante para testar a capacidade de recepção e registro do sistema.

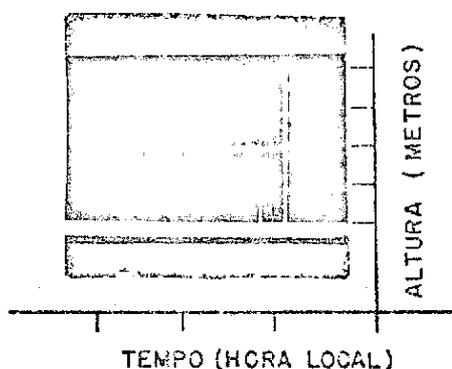


Fig. 3 - Exemplo de imagem obtida com o sistema imageador da Estação APT adaptado para o SONDAC.

Os primeiros testes de campo do Sondador Acústico foram realizados durante o I Experimento Meteorológico do Projeto RADASP na cidade paulista de Bauri. O objetivo primário destes testes era verificar a capacidade de resposta do aparelho quanto aos conceitos básicos conhecidos do SODAR, ou seja, o registro de ecos acústicos quando a atmosfera possui um "lapse rate" superadiabático ou quando existe uma camada de inversão; e a ausência de registro quando a atmosfera está em equilíbrio neutro ou mesmo estável. Alguns exemplos de registros colhidos no período do Experimento são apresentados a seguir.

4. RESULTADOS PRELIMINARES

Os registros acústicos obtidos pelo SONDAC e os perfis de temperatura obtidos por radiossonda para o dia 27 de julho de 1982, nos horários de 08:00 às 12:00 horas local (HL), são mostrados na Figura 3. A velocidade de rotação do filme, durante este experimento, foi a mesma velocidade fixada para o sistema APT (75 mm h^{-1}). Esta velocidade não possibilita uma imagem mais comprimida horizontalmente e, portanto, dificulta a interpretação dos sinais de retorno, principalmente no que se refere a sua continuidade.

Apesar deste inconveniente, os registros acústicos do dia 27 mostram alguma concordância com os perfis de temperatura obtidos pela radiossonda das 06:15 HL. O perfil de temperatura mostra uma inversão com base na superfície e topo a 460 m de altura. (Figura 4).

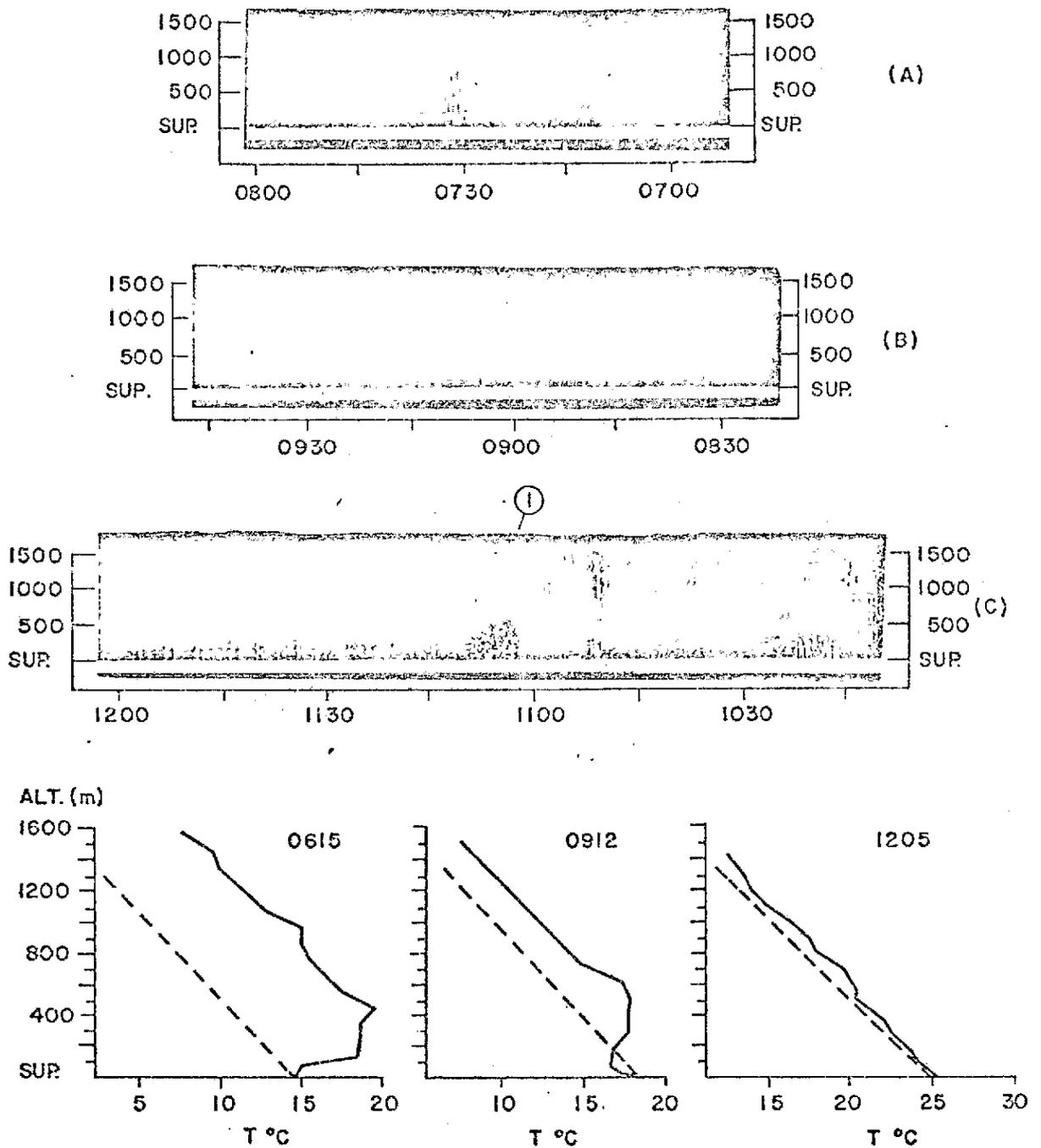


Fig. 4 - Imagens registradas pelo SONDAC e perfis de temperatura para o dia 27/07/82. A linha tracejada nos perfis de temperatura é a adiabática seca.

As 09:12 HL perfil mostra um "lapse rate" superadiabático nos primeiros 100 m com a base da inversão nesse nível e o topo em aproximadamente 300 m. As 12:05 HL a atmosfera está praticamente em equilíbrio neutro até alturas superiores ao alcance do SONDAC. Nos registros dos filmes A e B pode-se definir uma concentração de retornos abaixo dos primeiros 500 m desde as primeiras horas da manhã até aproximadamente as 09:15 HL, apesar de existirem algumas descontinuidades durante o período. Nota-se, por volta das 07:30 HL, um forte retorno em todos os níveis, em geral característico de fontes não-atmosféricas, que no exemplo coincide com a mudança de turma no experimento; intensa movimentação de veículos e pessoas. Por volta das 09:30 HL registram-se 7 minutos de retornos orientados num ângulo de 35°, cuja origem não foi determinada. No registro do filme C observa-se também uma concentração de retornos nos primeiros 300 m que se estende por vezes a níveis superiores, como por exemplo o ponto (1). Tais retornos podem ser associados a plumas convectivas face à hora de ocorrência do evento. A radiossonda das 12:05 HL mostra que a atmosfera se encontrava próxima de um estado de equilíbrio neutro, o que é revelado no registro do filme C pela ausência de sinal de retorno.

No dia 29 de julho (Figura 5) a radiossonda das 17:32 HL mostra uma profunda camada superadiabática com forte gradiente nos primeiros 50 m, seguida de uma inversão térmica cuja base encontra-se próxima a 370 m de altura. Às 20:34 HL nota-se uma redução da instabilidade da camada, permanecendo a inversão com a base agora em 470 m. O registro do filme A, que se iniciou aproximadamente 1 hora após o lançamento da radiossonda, mostra retornos entre os níveis de 50 a 400 m, com pequena descontinuidade por volta 18:55 HL. O registro do filme B, no horário correspondente à radiossonda, não mostra retorno abaixo dos 400 m, o que reflete um perfil de temperatura menos instável.

Retornos não-contínuos coincidentes com a primeira camada de inversão são observados para o mesmo período. Como exposto anteriormente, notou-se que a interpretação dos registros acústicos fica prejudicada pelo espaçamento no filme entre os sinais de retorno, consequência da alta velocidade de rotação do filme no sistema de gravação.

No dia 30 de julho (Figura 6), as radiossondas das 06:00 e 08:53 HL mostram inicialmente uma atmosfera estável com uma inversão localizada no limiar do alcance do SONDAC às 08:00 HL, enquanto às 08:53 HL nota-se uma inversão baseada na superfície, cujo topo encontra-se no nível de 250 m e uma segunda camada de inversão com base em 570 m e o topo em 700 m. O registro do filme A não mostra nenhum retorno significativo às 06:00 HL (consequência da estabilidade), enquanto o registro do filme B mostra uma concentração de retornos abaixo de 250m, não havendo uma definição exata quanto à segunda inversão embora haja alguns retornos nos níveis superiores, no horário das 08:53 HL.

5. CONCLUSÃO

Os casos aqui apresentados revelam que o SONDAC é capaz de fornecer informações qualitativas sobre a baixa atmosfera apesar de suas limitações de antena, de transdutor eletracústico e do próprio sistema imageador adaptado da estação APT. Testes futuros serão realizados com o objetivo de definir parâmetros como o nível ideal de recepção (sensibilidade) e alcance máximo efetivo e frequência ideal, além de possíveis melhorias no atual sistema de gravação.

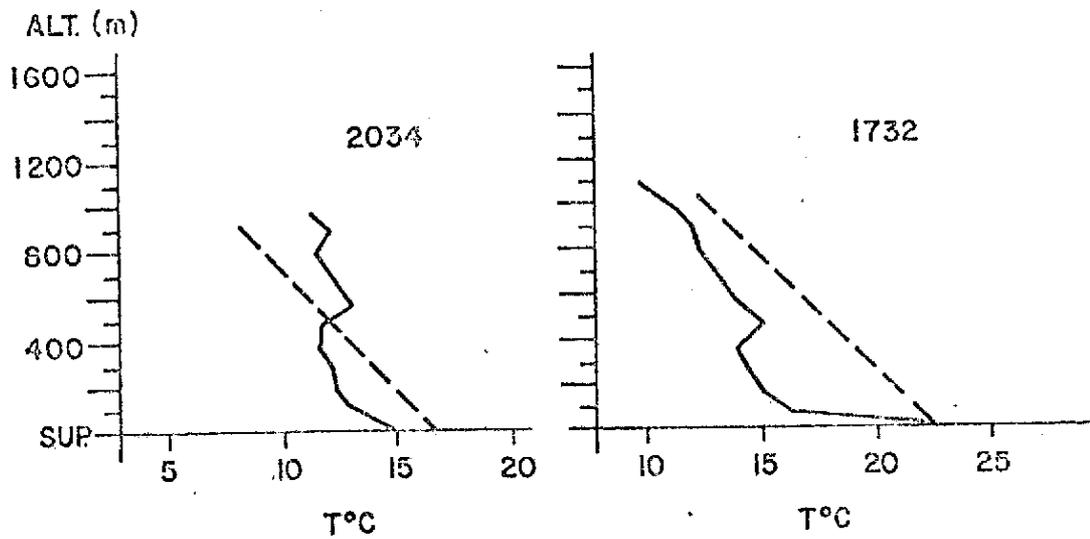
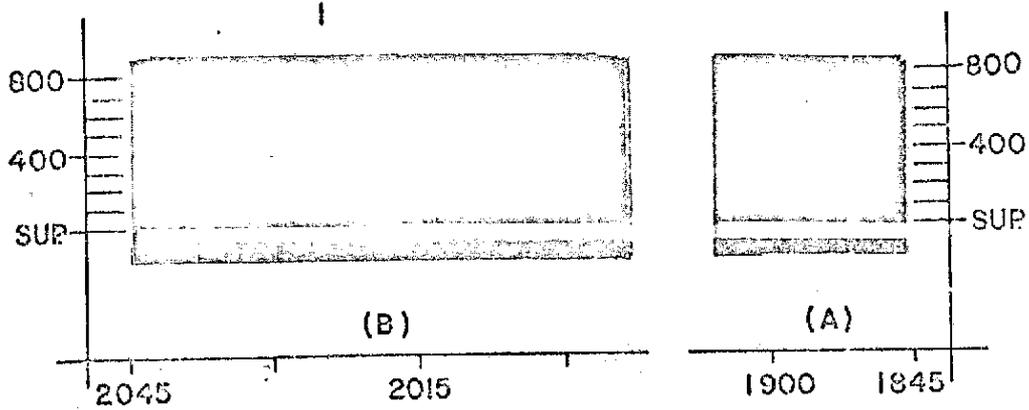


Fig. 5 - Umagens registradas pelo SONDAC e perfis de temperatura para o dia 27/07/82. A linha tracejada nos perfis de temperatura é a adiabática seca.

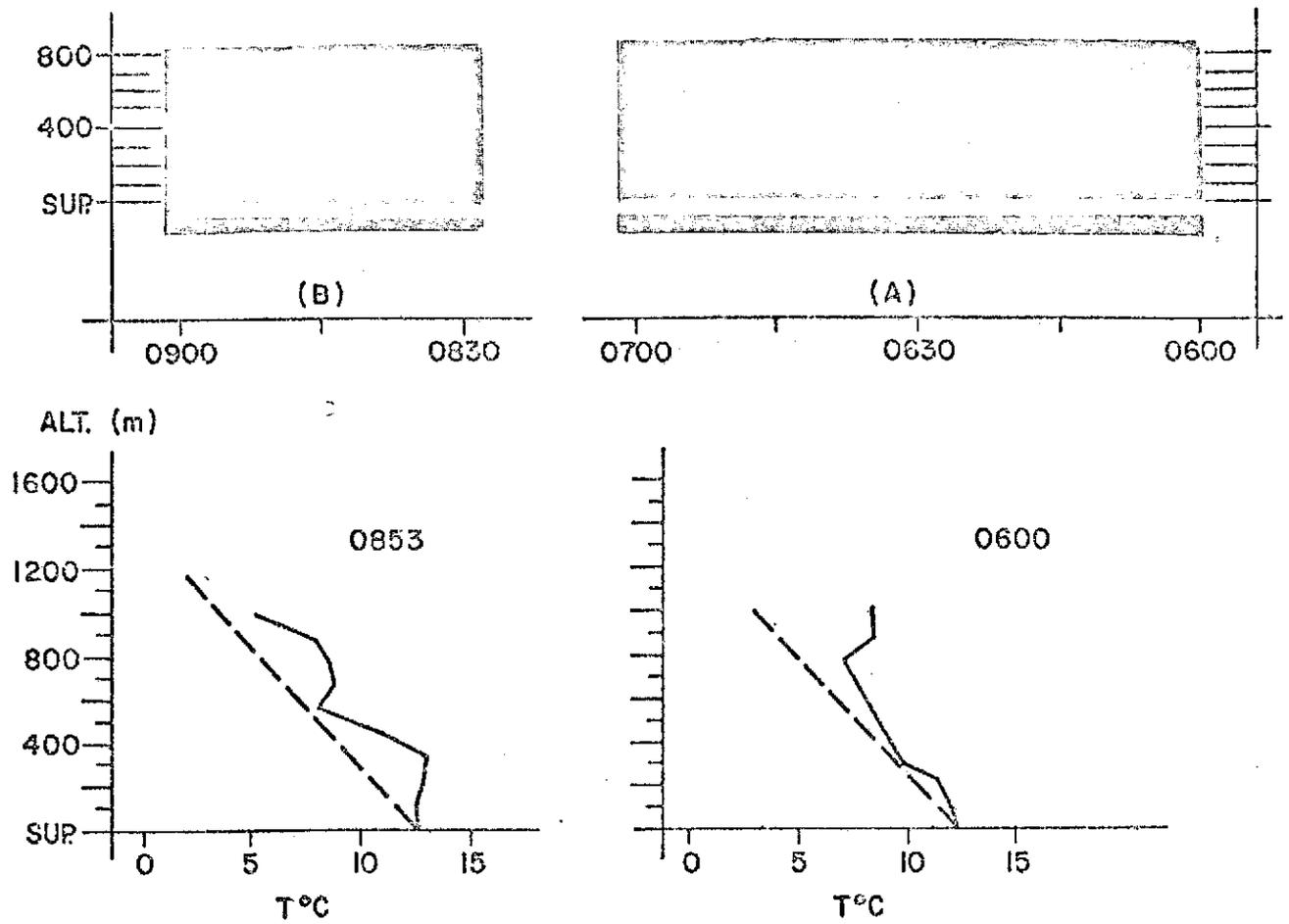


Fig. 6 - Imagens registradas pelo SONDAC e perfis de temperatura para o dia 30/07/82. A linha tracejada nos perfis de temperatura é a adiabática seca.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERAN, D.W.; LITTLE, C.G.; WILLMARTH, B.C. Acoustic doppler measurements of vertical velocities in the atmosphere. *Nature*, 230(5290):160-162, mar., 1971a.
- BERAN, D.W.; WILLMARTH, B.C. Doppler winds from a bistatic acoustic sounder. In: International Symposium on Remote Sensing Environment, 7., Ann Arbor, MI, may 17-21, 1971. *Proceedings*. Ann Arbor, MI University of Michigan, 1971. V.3, p. 1699-1714.
- DERHAM, W. Experimenta et observationes de soni notu. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. Series A 26:2-35, 1708.
- FUKUDA, F.H. *Sondador Acústico*. São José dos Campos, ITA, 1981. 50 p.
- GILMAN, G.W.; COXHEAD, N.B.; WILLIS, F.N. Reflection of sound signals in the teosphere. *Journal of the Acoustical Society of America*, 18:274-283, 1946.
- HARRIS, C.M. Absorption of sound in air versus humidity and temperature. *Journal of the Acoustical Society of America*, 40:148-159, 1966.
- KALLISTRATOVA, M.A. Experimental investigations of sound wave scattering in the atmosphere. *Trudy Inst. Fiz. Atmosfery. Atmosfermaya Turbulentnost*, nº 4:203-256, 1961.
- Mc ALLISTER, L.G. Acoustic sounding of the lower troposphere. *Journal of atmospheric and Terrestrial Physics*, 30(7):1439-1440, july 1968.
- Mc ALLISTER, L.G.; POLLARD, J.R.; MAHONEY, A.R.; SHAW, J.R. Acoustic sounding a new approach to the study of atmospheric structure. *Proceedings of the IEEE*, 57:579-587, 1969.
- OBUKHOV, A.M. Scattering of sound in turbulent flow. *Doklady Akademiy Nauka SSSR*, 30:611, 1941. (In russian).
- TYNDALL, J. On the atmosphere as a vehicle of sound. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Series A, 104:183-244, 174.
- WHIPPLE, F.J.W. The high temperature of the upper atmosphere as an explanation of zones of audibility. *Nature*, nº 2780:187, 1923.