

Atenuação atmosférica da Radiação Infravermelha: Influência de elevados níveis higrométricos no desempenho operacional de mísseis ar-ar.

André Gustavo de Souza Curityba, Ricardo A. Tavares Santos, Fabio Durante P. Alves, Jayr de Amorim Filho.

Instituto Tecnológico de Aeronáutica (Divisão de Engenharia Eletrônica) – Praça. Mal. Eduardo Gomes, 50. Vila das Acácias – S. José dos Campos – SP. CEP 12228-900

Resumo – Antes que sensibilize um detector infravermelho (IV), o fluxo radiante oriundo de um alvo percorre, algumas vezes, longas distâncias na atmosfera terrestre, que constituída por diversos gases e partículas em suspensão, submete este mesmo fluxo a um processo contínuo de atenuação. O objetivo deste trabalho é apresentar como elevados níveis higrométricos influenciam no desempenho operacional de mísseis ar-ar com guiamento infravermelho, em função dos fenômenos de espalhamento e absorção atmosférica. Por fim, é apresentado um breve resumo sobre o impacto esperado por este artigo no contexto da Força Aérea Brasileira (FAB).

Palavras-chaves – detector infravermelho, transmissão atmosférica, atenuação.

I. INTRODUÇÃO

A descoberta da radiação infravermelha é atribuída ao astrônomo inglês William Herschel [1], ocorrida no início do século XIX. Atualmente, variadas são as aplicações atribuídas a esta porção do espectro, estando presentes na medicina, sensoriamento remoto, equipamentos de visão termal, etc. Historicamente, o emprego militar de dispositivos fotodetectores infravermelhos (IV) remonta a Primeira Guerra Mundial, quando surgiram os primeiros equipamentos destinados à identificação de alvos à curta distância. Já no ano de 1937, ocorreu pela primeira vez a detecção ar-ar de uma aeronave empregando um dispositivo desta natureza. Contudo, a maior inovação nesta área foi percebida na Segunda Grande Guerra, quando os Alemães obtiveram êxito ao converter radiação IV em imagem, utilizando um “*infrared image converter tube*”. No início da década de cinquenta, surgem os primeiros mísseis ar-ar de guiamento IV (*infrared homing*), ocorrendo no ano de 1953 o primeiro lançamento de um artefato deste tipo, um míssil AIM-9A SideWinder. No conflito do Afeganistão, destacaram-se os MANPADS “*Man Portable Air Defense Systems*” conhecidos como mísseis de ombro, que em função de sua facilidade de transporte, operação e eficiência, foram responsáveis por diversas baixas

de aviões e helicópteros pertencentes à antiga União Soviética [2].

Hoje, com o advento da nanotecnologia, da eletrônica digital e da avançada engenharia de materiais, os dispositivos IV se tornaram mais eficientes e menos susceptíveis à ação das contramedidas eletrônicas, assim como tiveram suas dimensões reduzidas, possibilitando seu embarque em diversos tipos de plataforma, como, por exemplo, observado na Fig.1 um sensor termal instalado em um helicóptero Mi-35M2 Hind (Fig.1).



Fig.1. Sensor termal instalado em um Mi-35M2 Hind

Contudo, apesar do grau de evolução alcançado pelos dispositivos IV, sua eficiência continua sendo sensivelmente condicionada ao ambiente operacional. A atmosfera, principal meio de propagação da radiação IV, possui em sua constituição diversas variedades de gases e partículas em suspensão, cada qual encontrada em diferentes concentrações, submetendo esta radiação a diversos fenômenos, tais como a refração, espalhamento, absorção, etc. Desta forma, é importante conhecer as características de propagação IV na atmosfera e a influência destas no desempenho dos equipamentos que trabalham nesta faixa do espectro.

Este artigo abordará sobre a influência de elevadas concentrações de vapor de água na atmosfera (níveis

higrométricos) no emprego operacional de mísseis ar-ar, finalizando-se com uma breve explanação sobre o impacto esperado deste estudo no contexto da FORÇA AÉREA BRASILEIRA (FAB).

II. MEDIDA E FENÔMENOS RELACIONADOS À CONCENTRAÇÃO DE VAPOR DE ÁGUA NA ATMOSFERA

A. Medida dos índices higrométricos

Dentre todos os componentes da atmosfera terrestre, a água é o único que é encontrado em seus três estados físicos, seja como neve ou cristais de gelo (sólido), chuva (líquido) ou vapor de água (gasoso). O índice higrométrico, ou umidade da atmosfera, conforme definido em I, significa a quantidade de vapor de água existente por unidade de volume, geralmente expresso em gramas por metro cúbico (g/m^3). Esta grandeza é conhecida como umidade absoluta. Quando a quantidade de vapor de água por unidade de volume atinge seu valor máximo, diz-se que a atmosfera se encontra saturada, ou seja, acima deste limite é possível ocorrer precipitação em forma de chuva. Por sua vez, a umidade relativa do ar é a razão entre a quantidade de vapor medida em uma amostra em relação à quantidade requerida para saturação desta mesma amostra a uma dada temperatura. Outro conceito importante no estudo da medição da umidade atmosférica é o ponto de orvalho “*dew point*” que é a temperatura em que uma determinada amostra de ar se torna saturada [4].

A quantidade de água, expressa em altura ou em volume, que poderia ser recolhida se todo o vapor de água contido numa determinada coluna da atmosfera, de seção horizontal unitária, fosse condensado e precipitado é conhecido como água precipitável [6]. Na Fig.2, é apresentado o gráfico empregado para se obter o valor da água precipitável e umidade absoluta do ar, em função da umidade relativa do ar e da temperatura.

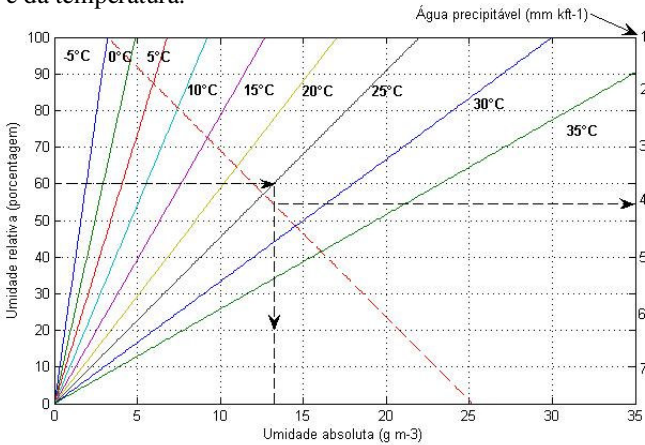


Fig.2. Gráfico de obtenção da água precipitável e umidade absoluta a partir da umidade relativa e temperatura.

Como exemplo, para a umidade relativa do ar de 60% e temperatura de 25°C, obtém-se no gráfico os valores aproximados de 4,2 mm kft⁻¹ (água precipitável) e 13,7 g m⁻³ (umidade absoluta do ar).

A quantidade de água precipitável varia regionalmente, atingindo seus valores máximos nas regiões equatoriais do planeta, em função das elevadas concentrações de vapor de água existentes na atmosfera que cobre estas áreas. Os valores de água precipitável também variam em função da altitude, decrescendo à medida que são atingidas camadas superiores da atmosfera [4].

B. Propagação da radiação infravermelha na atmosfera

Em sua trajetória na atmosfera, um fluxo radiante hipotético é seletivamente absorvido e espalhado pelos gases e partículas em suspensão que encontra pelo caminho, atenuando seu valor à medida que se desloca. A esta atenuação dá-se o nome de extinção [4], e sua expressão matemática conhecida como coeficiente de extinção :

$$\sigma = a + \gamma \quad (1)$$

Onde a é o coeficiente de absorção e γ , O coeficiente de espalhamento. É importante frisar que ambos os coeficientes variam em função do comprimento de onda da radiação propagante. Outra definição importante no estudo da transmissão IV na atmosfera diz respeito à transmitância, que é a razão entre o fluxo radiante transmitido em relação ao fluxo radiante incidente e é matematicamente expressa por:

$$\frac{I_t}{I_i} = \tau = e^{-\sigma x} \quad (2)$$

Analisando (2) verifica-se que a transmitância reduz seu valor exponencialmente à proporção que o fluxo radiante se desloca espacialmente, ou seja, quanto maior a distância percorrida pela radiação, maior a atenuação.

C. Atenuação da radiação infravermelha por absorção

Conforme pode ser observado na Fig.3, para cada comprimento de onda está associada uma transmitância. Este valor varia devido à absorção imposta por moléculas que compõe a atmosfera e que estão em suspensão. Cada molécula é responsável por absorver alguns determinados comprimento de onda, conforme prevê a teoria da discretização dos níveis de energia.

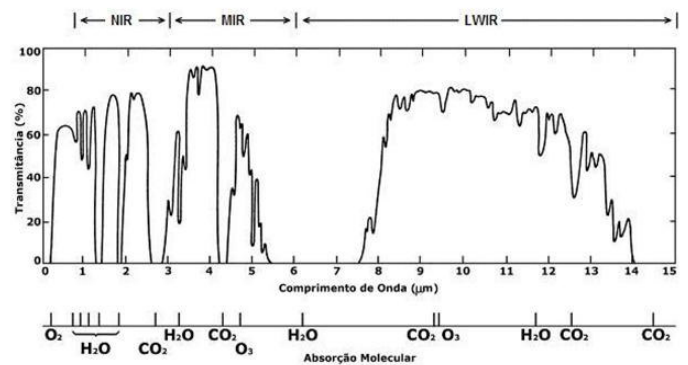


Fig.3. Transmissância atmosférica

Ainda na Fig.3, observa-se a existência de regiões onde determinadas moléculas apresentam elevada transmitância. Tais regiões são conhecidas como janelas atmosféricas, onde são verificados elevados valores de transmissão IV. Em contrapartida, estas regiões se encontram separadas por regiões de alta absorção, onde é reduzida ou, por vezes, nula a transmissão da radiação IV. Para o caso do vapor de água (H₂O), observa-se que, para comprimentos de onda entre 3 e 5µm, ocorre elevada atenuação devido à absorção [4].

D. Atenuação da radiação infravermelha por espalhamento

Comparado à absorção, o fenômeno do espalhamento possui menor, contudo não desprezível, participação na atenuação da radiação IV. Em síntese, este fenômeno consiste na difusão da radiação em função das partículas existentes na atmosfera [4]. Considerando somente a atenuação devido ao efeito de espalhamento, a equação da transmitância (2) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\tau = e^{-\gamma x} \quad (3)$$

Nesta situação, consta apenas a participação do coeficiente de espalhamento γ (4), atenuando a transmissão IV em função da distância.

$$\gamma = \pi n K r^2 \quad (4)$$

Onde n está relacionada ao número de partículas de água por centímetro cúbico encontrados na atmosfera, r é o valor do raio destas partículas e K "scattering area ratio" se refere à eficiência com que estas partículas de água espalham a energia radiante que incidem sobre as mesmas [4]. A variação da constante K em função da razão entre o raio da partícula de água em relação ao comprimento de onda (r/λ) pode ser verificada graficamente na Fig.4, possibilitando avaliar o grau de espalhamento sofrido por uma radiação incidente.

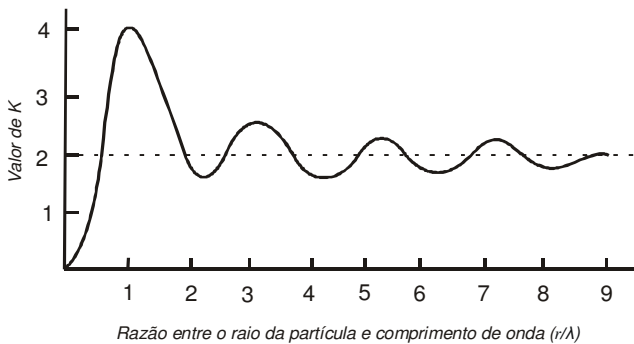


Fig.4. Gráfico da razão entre o raio da partícula e comprimento de onda versus valor de K

O gráfico da fig.4 é dividido em três regiões: Rayleigh, Mie e óptica. Na Região de Rayleigh, o fenômeno do espalhamento é tratado para as condições onde o comprimento de onda da radiação incidente é muito maior

que a dimensão da partícula, enquanto na Região de Mie, é considerado o espalhamento para a situação na qual os comprimentos de onda são iguais ou maiores que a partícula. Na Região óptica, por sua vez, os comprimentos de onda da radiação incidente são muito inferiores que a dimensão da partícula. Nesta última região, gotas de água em suspensão na atmosfera são os principais responsáveis pelo espalhamento nas faixas do visível, infravermelho próximo e médio [4].

III.: O MÍSSIL INFRAVERMELHO E A INFLUÊNCIA DA ATENUAÇÃO ATMOSFÉRICA NO SEU DESEMPENHO

A. O míssil de guiamento infravermelho

O míssil de guiamento infravermelho "infrared homing" é basicamente formado por um sistema de pilotagem, espoleta, sistema de guiamento, cabeça de guerra e sistema propulsor. No sistema de guiamento, encontra-se o *seeker*, responsável por detectar as radiações IV oriundas do alvo, processá-las e transmitir estes sinais para o sistema de pilotagem [5]. Considerando o alvo deste míssil uma aeronave, verificam-se na Fig.6 suas principais fontes de emissão infravermelha.

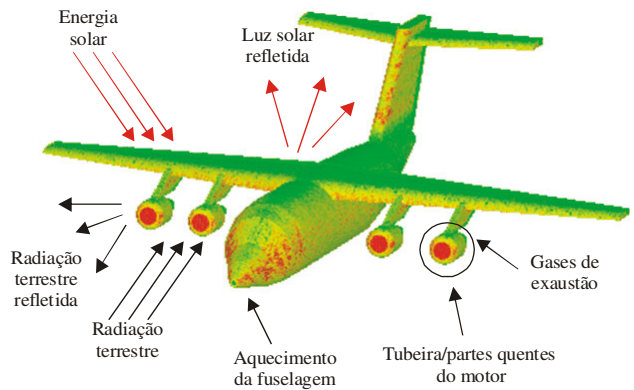


Fig.5. Fontes de emissão infravermelha em uma aeronave

Dentre todas as fontes de radiação infravermelha existentes em uma aeronave, a tubeira "tailpipe" (escapamento do motor) e a pluma (gases de exaustão composta por produtos da combustão interna do motor) são as mais intensas. A expressão matemática que relaciona a temperatura dos gases de exaustão com a temperatura da pluma é apresentada por:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (5)$$

Onde T_2 representa a temperatura da pluma, T_1 a temperatura dos gases de exaustão, P_2 é a pressão atmosférica na altitude em questão, P_1 é a pressão dos gases na tubeira e γ é a razão entre o calor específico do combustível por constante de pressão e

constante de volume, sendo o valor típico de γ igual a 1,3 para aeronaves militares [5].

B. Radiação infravermelha da pluma e tubeira

Em sua composição, a pluma é formada basicamente por dióxido de carbono e vapor de água, que apesar de se encontrarem a elevada temperatura e emitindo grande quantidade de energia, considerável parcela da radiação IV é absorvida pela atmosfera [5], fenômeno acentuado em ambientes que apresentam elevados índices de umidade do ar. Desta forma, conforme citado em II que a quantidade de vapor de água na atmosfera é inversamente proporcional à altitude, pode-se concluir que a pluma gerada por uma aeronave incursora voando à baixa altura sofre elevada absorção atmosférica, situação atenuada à medida que esta aeronave realiza seu vôo em altitudes maiores.

O comprimento de onda da radiação infravermelha emitida pela tubeira da aeronave depende da liga de metal que esta é constituída e tal informação não consta na literatura, pois possui caráter estratégico. Contudo, sabe-se que sua temperatura varia entre 500° a 700°C, com valores de emissividade efetiva próximos à 0,9 [5]. Em regimes de vôo a baixa altura, sem uso de pós-combustor, a emissão infravermelha oriunda da tubeira é a principal fonte de radiação, visto que grande parte da radiação da pluma é absorvida por seus principais componentes.

C. Desempenho do detector infravermelho de mísseis ar-ar

Resumidamente, um detector infravermelho converte energia radiante desta natureza em corrente elétrica e seu desempenho, em condições normais de operação, é descrito em função de sua responsividade (R), potência de ruído equivalente (*nep*) e detectividade (D^*) [5].

A responsividade, também descrita como fator de conversão, é a razão entre a corrente de saída no detector em relação à potência incidente sobre o mesmo [5]. A expressão matemática da responsividade é apresentada da seguinte forma:

$$R = \frac{i_s}{EA_d} \quad (6)$$

Onde i_s é a corrente na saída do detector, E é densidade de potência incidente no detector (W/cm^2) e A_d é a área sensível do detector (cm^2) [5].

O conceito de potência de ruído equivalente (*nep*) é resumido como a potência incidente no detector necessária para que, na saída deste, a relação sinal-ruído seja unitária [5]. A expressão matemática para a potência de ruído equivalente (*nep*) é dada por:

$$nep = EA_d \frac{i_n}{i_s} \quad (7)$$

Onde i_n é a corrente de ruído na saída do detector [5]. Em função do conceito apresentado, verifica-se que quanto maior

o valor da potência de ruído equivalente (*nep*), pior a qualidade do detector.

O conceito de detectividade possui sentido inverso ao de potência de ruído equivalente, sendo que aquele considera a eletrônica aplicada na leitura do sinal. A detectividade e a potência de ruído equivalente estão relacionados através da seguinte expressão matemática [5]:

$$D^* = \frac{(A_d \Delta f)^{1/2}}{nep} \quad (8)$$

Onde Δf é a faixa de passagem da eletrônica associada ao detector.

Conforme mencionado em II, a atenuação da radiação infravermelha aumenta exponencialmente em função da distância. Em ambientes com elevados índices de umidade, os fenômenos da absorção e espalhamento são intensificados, contribuindo para a gradativa extinção da radiação infravermelha, à medida que esta se propaga na atmosfera, vide expressão matemática da extinção (2). Desta forma, é possível afirmar que, quanto maior a atenuação, menor é a potência radiante incidente no detector e, por conseguinte, menor a responsividade do referido dispositivo.

Outro aspecto a ser considerado é a possível redução do contraste entre o alvo e o fundo “background” considerado. Em função da atenuação atmosférica sofrida pela radiação infravermelha oriunda do alvo, este último pode se confundir com o fundo, dificultando a distinção do sinal de interesse (proveniente do alvo), reduzindo assim a relação sinal-ruído e o desempenho do detector.

C. A Força Aérea Brasileira e os mísseis ar-ar

A história dos mísseis infravermelhos ar-ar na Força Aérea Brasileira (FAB) começou no início dos anos 70, simultaneamente à aquisição dos Mirage III. Para equipar estes supersônicos, foram adquiridos mísseis ar-ar do modelo Matra R-530. Alguns anos após, juntamente com a aquisição das aeronaves Northrop F-5E/B Tiger II, foram também comprados mísseis AIM-9B Sidewinder (vide Fig.6.). Durante muito tempo, estes dois mísseis de segunda geração foram os únicos artefatos com guiamento infravermelho disponíveis na FAB.

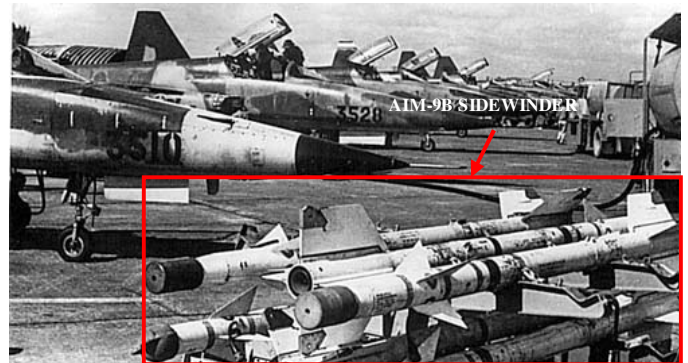


Fig.6. Míssil AIM-9B Sidewinder

A partir de meados dos anos oitenta, teve início o desenvolvimento do primeiro míssil nacional com guiamento infravermelho, o MAA-1 Piranha que, em função de suas características, é qualificado como míssil de terceira geração.

Atualmente, a dotação de mísseis ar-ar da FAB é formada pelos mísseis de terceira geração Python III, de construção israelense e pelo MAA-1 Piranha, recém incorporado à Força Aérea. Visando a futura aquisição de um míssil infravermelho de quinta geração, o Comando da Aeronáutica assinou um acordo de cooperação com a Denel Aerospace da África do Sul, visando o desenvolvimento do míssil A-Darter.

IV. MEDIDA DA TRANSMITÂNCIA ATMOSFÉRICA

A elevação da capacidade operacional de uma força aérea, visando torná-la compatível com o crescimento e objetivos estratégicos de um país não se resume, de forma exclusiva, à aquisição de novos equipamentos, armamentos e aeronaves de última geração. Conduzir estudos acerca das peculiaridades do ambiente operacional é de grande importância, pois possibilita a produção de dados confiáveis a respeito do desempenho esperado de um determinado equipamento ou dispositivo. Outro aspecto que reforça a relevância em conduzir estudos desta natureza, diz respeito à limitação imposta pelos fabricantes em fornecer dados mais aprofundados sobre o desempenho dos equipamentos que fornecem.

Uma forma de se resolver tais problemas é controlar o ambiente no qual os sensores a serem avaliados estão inseridos. Se a emissão da fonte é conhecida e controlada e se o meio propagante também é conhecido e controlado, pode-se verificar se os requisitos técnicos estabelecidos para os sensores avaliados, optrônicos no caso deste artigo, foram respeitados e cumpridos. Os resultados dessas avaliações contribuem para aumentar o grau de confiança e de eficiência no emprego de equipamentos em situações reais.

Neste sentido, podem-se utilizar produtos importados oferecidos no mercado internacional ou desenvolver produtos nacionais que atendam às necessidades operacionais. No caso de se medir a transmitância atmosférica na faixa do IV há produtos bastante interessantes e com reconhecida capacidade. Exemplos bem comuns são os softwares de baixa e média resolução de fabricação americana LOWTRAN e MODTRAN. Há ainda um de alta resolução denominado HITRAN. Estes produtos têm uma comprovada eficiência para predições feitas em ambientes do hemisfério norte, mas não se conhece sua eficiência em ambientes do hemisfério sul, onde as características das chuvas, umidade relativa, pressão, dentre outros, possuem um comportamento bem diverso do hemisfério norte. Além disso, pode haver problemas de interface entre estes softwares e os equipamentos usados em avaliações [7]. Além disso, há a possibilidade de embargo do uso desse tipo de ferramenta.

Por outro lado, conforme dito anteriormente, pode-se desenvolver ferramentas adequadas a necessidades específicas. No caso abordado, SANTOS desenvolveu um software que prediz a transmitância atmosférica na faixa de 0,1 a 30 μm . O software está com resultados validados na faixa de 3 a 5 μm , através da comparação de resultados com o

software americano SEARED, que é uma combinação dos já citados LOWTRAN e MODTRAN. Os resultados obtidos para a faixa de interesse são inferiores a 5%. Este programa foi denominado TRFINAL e apresenta resultados promissores que precisam ser mais estudados e validados em outras faixas de interesse [7].

Com a utilização de ferramentas desse tipo é possível prever a atenuação atmosférica de forma confiável e aplicar os resultados em avaliações de sensores operacionais tais como autodiretores de mísseis e imageadores, conforme dito no início da seção. Um dado que já foi colhido com a utilização do TRFINAL é a elaboração da metodologia de medição de envelopes IV de aeronaves proposto por SANTOS [7].

V. CONCLUSÃO

As alternativas e teoria discutidas nesse artigo trazem um grande avanço no sentido da possibilidade de se operar um equipamento de combate com base em conhecimento gerado em trabalhos técnico-científicos. Nesse contexto, foram estudados e analisados a emissão IV em aeronaves e o comportamento de sua transmissão através da atmosfera. Ferramentas computacionais que podem prever a transmitância atmosférica foram apresentadas.

A avaliação de sistemas baseada em conhecimento próprio traz independência operacional e assimetria conceitual que podem fazer diferença na hora do emprego real de vetores e armamentos associados a eles.

As propostas aqui apresentadas são parte significativa do investimento da Força Aérea Brasileira em melhorar suas concepções técnicas para aumentar sua eficiência operacional.

REFERÊNCIAS

- [1] WIKIPÉDIA. William Herschel. Disponível em: http://pt.wikipedia.org/wiki/William_Herschel Acesso em: 19 ago. 2007.
- [2] INTERNET. MANPADS proliferation. Disponível em: http://www.fas.org/asmp/campaigns/MANPADS/MANPADS.html#fn11_txt Acesso em: 28 ago. 2007.
- [3] AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Hidrologia e geoquímica da Bacia Amazônica. Disponível em: <http://www.ana.gov.br/hibam/>. Acesso em: 19 ago. 2007.
- [4] HUDSON, Richard D. Infrared System Engineering. New York: John Wiley, 1969.
- [5] Santos, Ricardo Augusto Tavares. Proposta de procedimento para a medida do envelope infravermelho de aeronave. 2001. 107 f. Trabalho de conclusão de curso (especialização) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2001. Trabalho apresentado no Curso de Especialização em Análise do Ambiente Eletromagnético (CEAAE).
- [6] INTERNET. Sistema de Meteorologia e Recursos Hídricos do Estado de Goiás - SIMEGO. Disponível em: <http://www.simego.sectec.go.gov.br/> Acesso em: 03 set. 2007.
- [7] COLOCAR A REF DA MINHA TESE DE MESTRADO.