

# Simulação de Modelo de Predição de Assinatura Infravermelho de Aeronave

Flavio J. Galdieri, José Américo S. Pontarolli, Leonardo C. de Oliveira,  
Embraer S/A – VED – Av. Brig. Faria Lima, 2170 – 12227-901 São José dos Campos – SP - Brasil

**Resumo** — Assinatura Infravermelho de aeronaves e relevância da aplicação em redução de observabilidade. As etapas do desenvolvimento do modelo. Ferramentas de software envolvidas. Modelo proposto e resultados obtidos. Limitações e restrições no modelamento. Ferramentas analisadas.

**Palavras-chaves** — Assinatura Infravermelho, Modelo de Predição, Pluma, Ferramenta de Simulação, CFD, Mitigação de Assinatura.

## I. INTRODUÇÃO

A assinatura infravermelho é parte importante na avaliação de sistemas no espectro infravermelho. Consiste da imagem geométrica detalhada, neste caso da aeronave, com o padrão de distribuição de temperatura aparente dado pela radiação detectada. Estes padrões podem ser obtidos experimentalmente ou simulados computacionalmente.

Avaliações de desempenho de sistemas de contramedidas, de auto-proteção e baixa observabilidade de aeronaves dependem fortemente dos modelos de assinatura. As emissões do infravermelho são utilizadas para detectar, rastrear e engajar além de reconhecer e identificar alvos.

Com os modelos de predição validados é possível mitigar no ante-projeto a assinatura reduzindo a vulnerabilidade às ameaças guiadas por infravermelho, como os mísseis de ombro.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo de predição de assinatura infravermelho utilizando ferramentas de software para aplicação futura na mitigação da assinatura e no reconhecimento de alvos.

### A. Elementos da assinatura infravermelho

O processo de análise de assinatura é complexo e envolve várias questões técnicas e o conhecimento da fenomenologia do infravermelho como as soluções térmicas de distribuição de temperatura, cálculo da radiação, fator de visada, influência do cenário, radiação solar, cálculo de propagação atmosférica, óptica de detetores e sensores imageadores e caracterização de emissividade de materiais e tintas.

Como um valor de assinatura infravermelho depende fortemente de aspectos como condições operativas e ambientais os parâmetros da assinatura infravermelho são definidos para um conjunto particular desses fatores e a partir de um modelo parametrizado é possível fazer a predição da assinatura simulando diversas situações.

### B. Modelamento da predição de assinatura infravermelho

O processo de predição da assinatura infravermelho envolve a elaboração de um modelo geométrico da aeronave que é utilizado como dado de entrada para a geração de uma malha de elementos de superfície, a partir da qual será feito o cálculo da radiação emitida pela superfície da aeronave.

O modelo geométrico da aeronave e a malha de elementos da superfície são inicialmente criados nas ferramentas de software aplicativos ou importados a partir de um software de projeto assistido por computador (CAD) ou de um gerador de malhas. A malha é semelhante à utilizada nas análises computacionais de dinâmica de fluidos (CFD), porém o número de elementos pode ser menor, pois o cálculo da radiação geralmente não necessita de uma malha tão refinada quanto a de CFD. Neste caso, a distribuição de temperatura ou fluxo de calor calculada por CFD será interpolada para a malha utilizada no software de cálculo de radiação na predição. Caso o software possua funcionalidades para analisar a radiação emitida pela pluma de exaustão dos motores, os resultados das distribuições de temperatura e concentração dos gases serão importados no software e acoplados ao modelo. O modelo da pluma pode ser um modelo 2D axissimétrico, no qual os resultados são dados num plano e rotacionados em torno do eixo da pluma ou um modelo 3D, composto por uma caixa contendo os valores dos resultados da pluma em diversos pontos ao longo da sua extensão. Uma simulação de CFD em 3D para a pluma geralmente necessita de uma malha mais refinada do que a malha utilizada para o cálculo do escoamento ao redor da aeronave.

Os parâmetros com as características dos materiais da superfície da aeronave, que compreendem basicamente os valores de emissividade, são introduzidos nos cálculos da radiação das diversas partes da geometria da aeronave. Alguns softwares apresentam bibliotecas contendo os valores de emissividade para tintas e materiais padronizados.

Os parâmetros restantes que completam a definição do modelo de cálculo de radiação (resultado do total de radiação emitida e refletida pelo modelo) incluem parâmetros de entrada para o modelamento da radiação emitida pelo sol, céu, solo, mar, nuvens, etc, e também para o modelamento da propagação da radiação através da atmosfera. Alguns softwares possuem modelos específicos para simular o efeito da passagem da aeronave sobre o mar. Alguns modelos também incluem dados de cenários compostos por materiais específicos tais como diversos tipos de solo, concreto, etc.

C. Processo do modelamento de predição

A elaboração do calculo para o modelo de predição da assinatura infravermelho consiste de um processo com diversas tarefas [1], visualizado na Fig. 1.

1) *Construção da geometria:* Criação de um modelo geométrico através de um software CAD e posterior criação de uma malha de elementos finitos sobre a superfície do modelo com um software gerador de malha, agrupando os elementos em partes e conjuntos.

O modelo geométrico é utilizado como dado de entrada para a geração de uma malha de elementos de superfície a partir da qual é feito o cálculo da distribuição térmica e a partir desta a radiação emitida pela superfície da aeronave.

A boa qualidade da predição da assinatura depende da fidelidade do modelo geométrico ao real, incluindo a atribuição correta das partes que contem as fontes térmicas. Este mesmo modelo permite também gerar uma malha de elementos volumétricos para o cálculo do escoamento do ar ao redor da aeronave através de códigos de CFD para cálculo de aquecimento aerodinâmico e distribuição de temperatura e concentração de gases na pluma.

de materiais e calcula a condução, convecção e radiação com reflexões múltiplas. A distribuição de temperatura na superfície da aeronave é calculada por softwares que fornecem a solução de distribuição termal sobre o modelo.

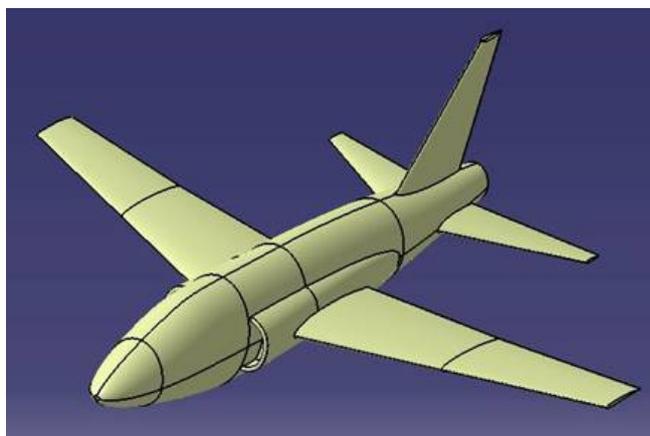


Fig. 2 - Modelo geométrico da aeronave

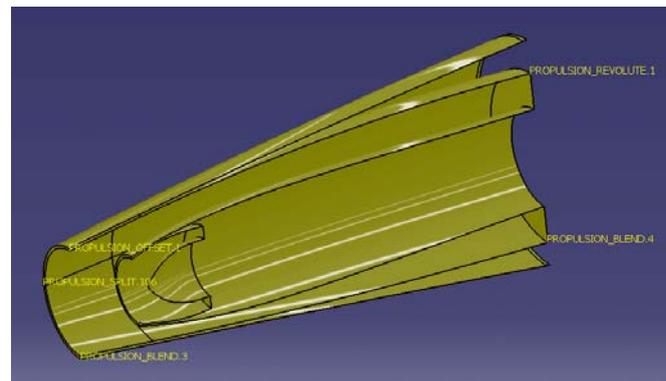


Fig. 3 - Modelo geométrico do motor

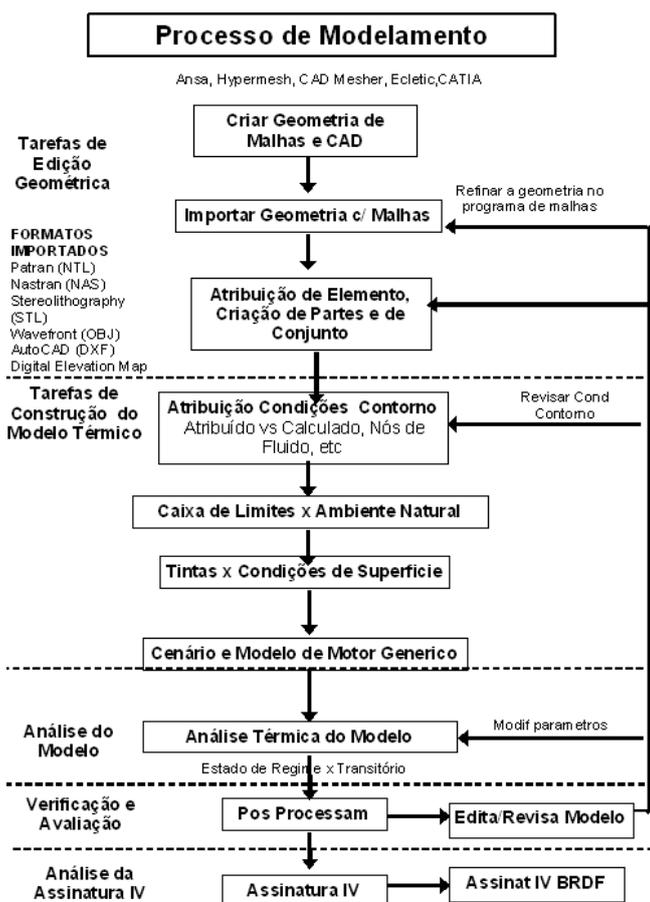


Fig.1 - Processo de modelamento de assinatura infravermelho com a ferramenta I. Ref.[1].

2) *Construção do modelo térmico:* Os dados térmicos constituem as entradas básicas para a predição da assinatura infravermelho. A análise térmica considera as propriedades

3) *Criação dos modelos para análise de CFD:* A análise de CFD que fornece os dados do escoamento ao redor da aeronave é feita a partir da geração de uma malha na superfície da aeronave e a partir desta uma malha de elementos volumétricos nos quais serão calculados os parâmetros do escoamento, tais como pressão, velocidade e temperatura, para uma dada condição de operação da aeronave. Os resultados iniciais obtidos em função destes dados são as distribuições de temperatura e fluxo de calor na superfície da aeronave devido a troca de calor por atrito com o ar em escoamento. Estes resultados são usados como dados de entrada para o programa de cálculo da assinatura infravermelho.

O modelo de CFD também fornece as distribuições de temperatura, velocidade e concentração de gases na pluma de exaustão dos motores da aeronave. Para obter estes resultados é necessário definir as condições de contorno relativas a estes parâmetros em áreas apropriadas da malha. Pode-se eventualmente modelar a reação química de queima do combustível e a geração dos gases de saída, entretanto, estes detalhes aumentam consideravelmente a complexidade do modelo.

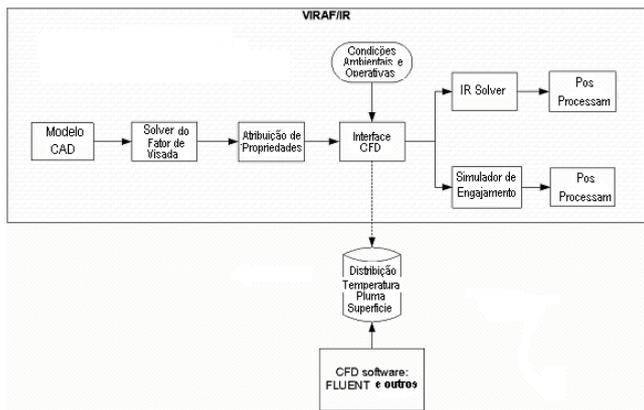


Fig. 4 – Processo de modelamento de assinatura infravermelho com CFD para a ferramenta II. Ref.[2]

4) *Cálculo da assinatura infravermelho:* O pós-processamento fornece os parâmetros de radiação, temperatura aparente e imagem com os padrões de reflexão difusa como a função BRDF. O modelo básico de predição considera apenas as fontes térmicas internas da aeronave (intensidade de radiante de distancia zero [W/sr]). A partir do modelo básico podem ser introduzidos os fatores dos diversos cenários de operação para considerar a influência da radiação externa, solar e proveniente do cenário, as condições ambientais de clima e a influencia dos fatores atmosféricos na propagação da radiação nas diversas situações, que alteram os padrões originais do modelo.

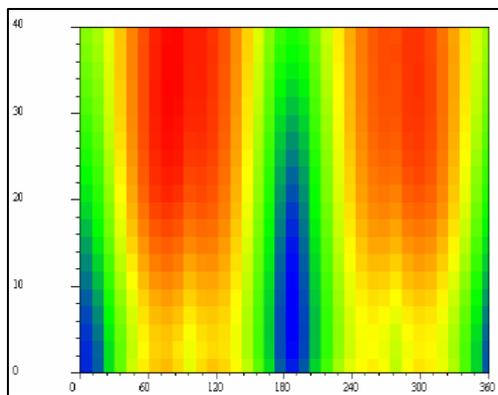


Fig. 5 – Mapa de intensidade radiante aparente total [W/sr] em função dos ângulos de azimute e elevação. Ref.[2]

As influências do aquecimento aerodinâmico e a predição da forma e distribuição de temperatura da pluma de exaustão dos motores são calculadas com softwares de CFD disponíveis.

1. Pós-processamento e geração de imagens

Os resultados obtidos para a radiação emitida pela superfície da aeronave e pela pluma são utilizados para gerar as respostas que identificam a assinatura infravermelho. As respostas que possibilitam o controle da assinatura são: intensidade polar radiante [W/sr] (Fig. 5 e Fig. 6), intensidade espectral radiante [W/sr] (Fig. 7) e simulação de imagens (Fig. 8). Podendo ser obtida destas a faixa de engajamento. As intensidades polar e espectral radiantes são obtidas através da integração da radiação do alvo na projeção da imagem do

alvo sobre um plano perpendicular à direção de observação. A radiancia polar é função dos ângulos de azimute e elevação, considera a contribuição de todos os comprimentos de onda, e é medida em W/sr.

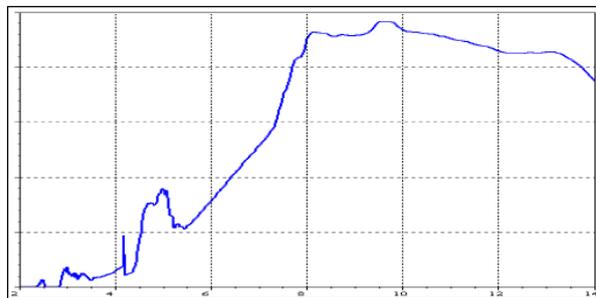


Fig. 6 – Intensidade espectral radiante aparente total [W/sr.m] 2 - 14  $\mu$ m Ref.[2]

A radiancia espectral é dada em função do comprimento de onda, e é medida em W/sr.m . Ambas as respostas podem ser apresentadas na forma de intensidade total ou contraste em relação ao fundo, que é a diferença entre as intensidades de radiante emitidas pelo alvo e pelo cenário de fundo em [W/sr].

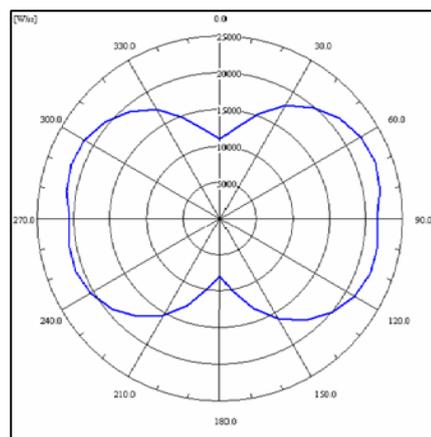


Fig. 7 – Diagrama polar de intensidade de radiante aparente total [W/sr].

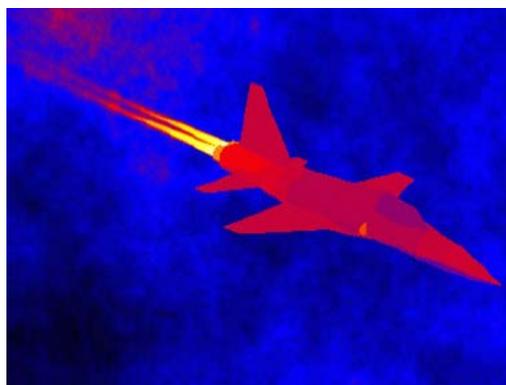


Fig. 8 – Imagem da aeronave gerada a partir da radiancia. Ref. [2]

O software de cálculo de radiação pode oferecer funcionalidades para o modelamento do sensor, tais como a posição de observação em relação ao alvo, o tipo de sensor e

a sua curva de resposta em função da frequência ou comprimento de onda.

Estas características são consideradas para a simulação da imagem do alvo que é observada pelo sensor. A imagem é formada por um conjunto de pixels, e cada pixel corresponde a um valor de intensidade de radiação. A soma dos valores de todos os pixels fornece a intensidade de radiação total medida pelo sensor.

## 2. Engajamento do alvo

A faixa de engajamento que é definida como a distância de visualização do alvo em função do ângulo de azimute do observador, para uma dada razão sinal-ruído, representa a distância mínima a partir da qual um míssil com sensor de infravermelho é capaz de se engajar em um alvo. Para uma avaliação realista da susceptibilidade de uma aeronave a predição dos perfis de temperatura sobre toda a superfície da aeronave, contidas na assinatura, para diferentes condições de operação, possibilita obter os envelopes de engajamento e letalidade Ref.[3].

## D. Resultados obtidos

1) *Simulação da assinatura - ferramenta I:* A assinatura infravermelho da aeronave foi realizada para observação em 3D, nas faixas espectrais de comprimento de onda 3-5  $\mu\text{m}$  e 8-12  $\mu\text{m}$ , utilizando como aplicativo uma ferramenta para predição da assinatura Ref. [1], com fluxo do processo da Fig. 1.

A geometria da aeronave foi descrita utilizando dois modelos em 3D gerados com o software CATIA V5. O primeiro modelo corresponde à geometria externa da aeronave e é mostrado na Fig. 2. O segundo modelo, mostrado na Fig. 3, corresponde à geometria interna do motor, e foi utilizado exclusivamente para a geração de uma malha dedicada ao cálculo das distribuições de temperatura e concentração dos gases de escape na pluma do motor.

A partir deste modelo foi gerado o modelo de malhas e importado pelo pré-processador para o programa aplicativo.

Os resultados da geração da assinatura infravermelha apresentam a imagem observada pelo sensor utilizando a função bidirecional de reflexão difusa (BRDF), radiância, temperatura física e temperatura aparente. Estes resultados foram obtidos em formatos exportáveis para outras aplicações

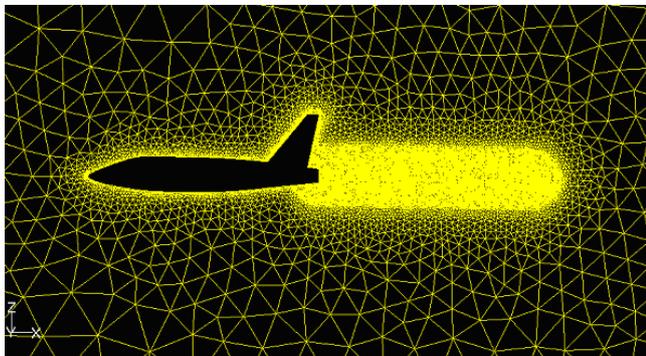


Fig. 9.- Malha 3D utilizada para simulação CFD da aeronave

2) *Simulação da assinatura - ferramenta II:* Foi elaborado o modelo CFD para aplicar na ferramenta II [2], com fluxo do processo Fig. 4. As condições de geometria foram análogas

as da ferramenta I, sendo que o modelo geométrico foi importado em um pré-processador (IcemCFD) para a criação do modelo CFD, realizando a geração da malha e definição de condições de contorno. Os modelos obtidos estão nas Fig. 9 e Fig. 10.

3) *Simulação da aeronave com modelo CFD:* A análise de CFD para obter os dados do escoamento ao redor da aeronave foi feita pelo software Fluent com uma malha 3D (Fig. 9) na qual foram calculados os parâmetros do escoamento para uma dada condição de operação da aeronave.

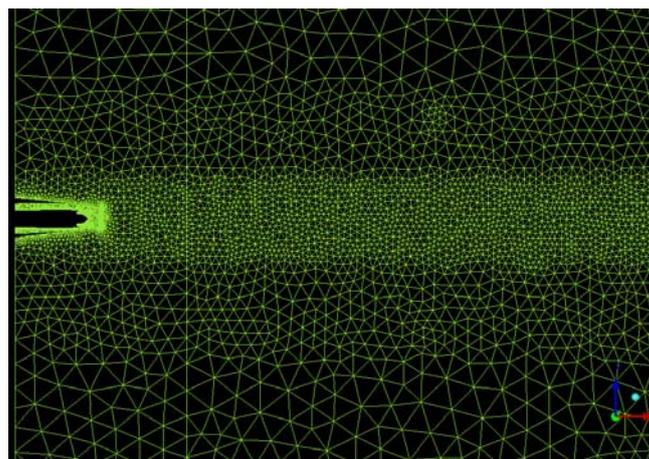


Fig. 10. Malha 3D utilizada para simulação CFD da pluma

4) *Simulação da pluma de exaustão do motor com modelo CFD:* Para o cálculo da simulação da pluma de exaustão do motor foi desenhada uma geometria, gerada uma malha de elementos superficiais e volumétricos, ajustada às condições de contorno do modelo, solucionado os fenômenos aerodinâmicos e extraídos os resultados pertinentes, Fig. 10.

A geometria foi caracterizada pela aproximação da estrutura interna de um motor a reação, com turbina e com passagem de fluxo de ar frio por fora da câmara de combustão. A malha sobre a geometria do modelo adotado foi gerada com definições rigorosas para o tamanho dos elementos superficialmente e um crescimento adequado para a simulação. No modelo não foi desenvolvida uma estrutura de elementos para simulação de camada limite devido a um custo computacional elevado para a simulação do fenômeno.

A simulação do escoamento no interior da camada limite afetaria os resultados aumentando levemente a temperatura da casca mais externa da aeronave e, no caso de simulação com mistura dos elementos resultantes da combustão, aumentaria a efetividade da mistura, resultando num efeito espectral um pouco diferente na faixa de frequência referente à pluma da aeronave. Envolvendo toda a pluma foi imposta uma estrutura diferenciada de elementos para minimizar o efeito causado pelo tamanho dos elementos na simulação.

Para o jato quente foi imposta uma condição de alta pressão e alta temperatura, e para o jato frio foi imposta um aumento de pressão com relação às condições ambientes. A distribuição de temperatura resultante desta simulação é mostrada na Fig. 11. Os resultados da simulação do motor foram usados como condição de contorno para a simulação da aeronave completa. Essa técnica de realizar a simulação da aeronave e do motor

independentes foi adotada com o objetivo de se obter um resultado mais acurado com relação as temperaturas, formato e velocidades da pluma, e usar esses resultados para a simulação da aeronave, de forma a poder, no modelo da aeronave, usar uma quantidade muito menor de elementos e ainda assim se obter um resultado bastante satisfatório.

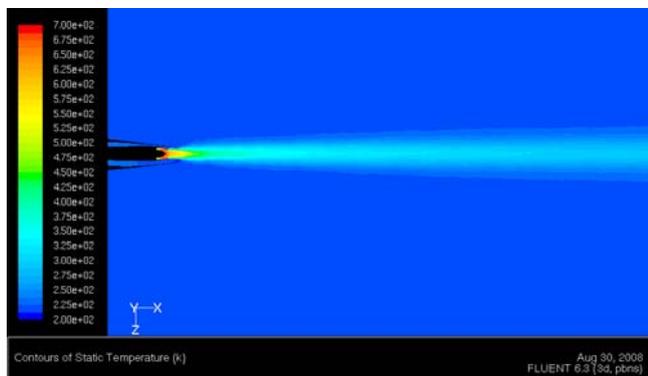


Fig. 11 – Distribuição de temperatura na pluma

##### 5) Cálculo das concentrações dos gases na pluma

Para se obter a distribuição de concentração dos gases de escape na pluma do motor, foi adotado um modelo

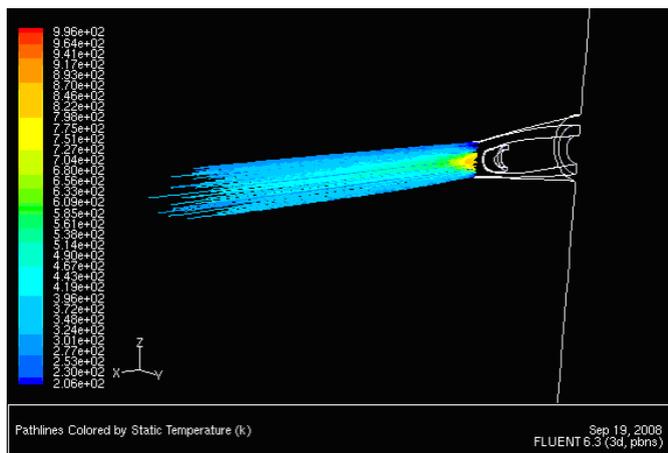
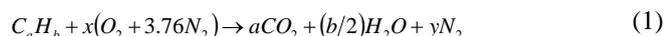


Fig. 12. Linhas de trajetória da pluma com resultados de temperatura

simplificado no qual foram especificadas as concentrações dos produtos de combustão com uma distribuição uniforme na superfície correspondente à saída da turbina. Neste modelo foi considerada a queima de um hidrocarboneto com fórmula  $C_aH_b$  e a equação da reação estequiométrica de queima como Ref. [4]:



onde  $x$  é o volume de ar utilizado. A equação da reação obtida considerando excesso de ar e presença de  $CO$  e  $O_2$  nos produtos de combustão Ref.[5]:



$$w = x(1 + k/100) \quad (3)$$

Os parâmetros  $k$  e  $w$  em (3) são o percentual de excesso de ar e o volume de ar na reação com excesso de ar. A solução de (2) a partir dos dados de composição aproximada do combustível, relação ar/combustível em massa e percentual de formação de  $CO$  fornece os valores de concentração em massa dos produtos de combustão. Esses valores são usados para definir a condição de contorno para a análise de CFD, que fornece como resultados as distribuições de temperatura e concentração dos gases em cada ponto da pluma. Esses resultados são utilizados pelo programa de previsão de assinatura para o cálculo da radiação emitida por cada um dos produtos de combustão. A Fig.7 mostra as linhas de trajetória correspondentes à uma distribuição de temperatura na pluma.

##### E. Conclusões

O processo de modelamento da previsão de assinatura infravermelho em aeronaves pode ser resumido nos seguintes passos: geração de geometria, geração de malhas, definição das condições de operação, análises térmica e de CFD, definição de propriedades do modelo de radiação, cálculo da radiação e pós-processamento. Esses passos são executados por ferramentas específicas, que compreendem programas CAD, geradores de malha, solvers e programas de cálculo de assinatura, e para cada tipo de ferramenta existem diversas opções disponíveis no mercado. A compatibilidade entre os modelos e os resultados gerados pelas ferramentas em cada passo do processo devem ser observados. Valores elevados obtidos para a assinatura infravermelho indicarão a necessidade de mudanças nos parâmetros de projeto da aeronave. Recursos de execução automática existentes nas ferramentas escolhidas também são importantes para facilitar as iterações no processo de modelamento, e os resultados obtidos a cada iteração podem ser usados para indicar a influência dos parâmetros de projeto nos valores da assinatura.

##### REFERÊNCIAS

- [1] RadThermIR Technical Documentation - ThermoAnalytics, Inc.- Calumet, MI - [www.thermoanalytics.com](http://www.thermoanalytics.com)
- [2] IDS - IR Analysis Capability Presentation - VIRAF - IDS Ingegneria dei Sistema - Pisa - Italy - May 2007 - [www.ids-spa.it](http://www.ids-spa.it)
- [3] S. P. Mahulikar, H. R. Sonawane, G. A. Rao, "Infrared signature studies of aerospace vehicles", in *Progress in Aerospace Sciences* 43, pp. 218-245, August 2007.
- [4] EM 722 - Geração, Distribuição e Utilização de Vapor - Engenharia Mecânica - UNICAMP - <http://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP1.pdf>
- [5] J. Jachic, "Simulação da Produção de Monóxido de Carbono em Ambiente Fechado", VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental - <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/sibesa6/ccvii.pdf>