

ecai

Universidade Federal de Santa Catarina
Centro Tecnológico
Curso de Engenharia de Controle e
Automação Industrial

ufsc

*Ferramenta para Auxílio ao Planejamento
de Vôo de Aeronaves não Tripuladas*

*Monografia submetida à Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito para a aprovação da disciplina:
EEL 5901: Projeto de Fim de Curso*

Gean Carlo Dallagnolo

Florianópolis, Fevereiro de 1998

**Ferramenta para Auxílio ao Planejamento
de Vôo de Aeronaves Não Tripuladas**

Gean Carlo Dallagnolo

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina
EEL 5901: Projeto de Fim de Curso
e aprovada na sua forma final pelo
Curso de Engenharia de Controle e Automação Industrial

Banca Examinadora:

Dr. Conrado W. Seibel
Orientador Empresa

Prof. Dr. Jean Marie Farines
Orientador do Curso

Prof. Augusto Humberto Bruciapaglia
Responsável pela disciplina e Coordenador do Curso

Prof. Dr. Joni da Silva Fraga, Avaliador

Fábio Pavanati, Debatedor

Daniel Kamers, Debatedor

Agradecimentos

Aos meus pais Valmor e Elisa pela confiança e pelo suporte...

À Fabiana, Rodrigo e Felipe por torcerem por mim...

À minha namorada Susana pelo apoio e pela presença constante...

Ao Conrado, Lígia, Daniel, Carlos, Miguel, Marcos, Fernanda, Nicolle e Baeter...

A todos meus parentes e amigos...

Muito obrigado.

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma metodologia para auxiliar o planejamento de missões de aeronaves não tripuladas de asas rotativas. A metodologia proposta utiliza autômatos híbridos para modelar a aeronave a ser utilizada e o plano de vôo a ser executado. Apresenta-se aqui também o conceito de uma ferramenta de software para auxiliar o planejamento do vôo. Essa ferramenta tem por propósito economizar tempo do operador no planejamento e aumentar a segurança das missões. Por fim apresenta-se os resultados obtidos na tentativa de implementar tal ferramenta.

Abstract

This paper presents the development of a methodology for helping the mission planning of rotary wing unmanned airplanes. The proposed methodology uses hybrid automata to model the aircraft which will be used to perform the mission and the flight plan that will be executed. The concept of a software tool to help the flight planning is presented here too. This too has the purpose of saving operator's planning time and increase the safety of the missions. In the end the obtained results in the implementation of this tool are presented.

Índice

1	INTRODUÇÃO.....	7
2	A EMPRESA.....	8
3	VEÍCULOS NÃO-TRIPULADOS	9
4	PROJETO HELIX	11
5	DESCRIÇÃO TÉCNICA DO SISTEMA HELIX.....	12
5.1	A Aeronave.....	12
5.2	Carga Útil	12
5.3	Estação de Controle.....	13
5.3.1	Controle de missão.....	13
5.3.2	Registro de vôo.....	13
5.4	Veículo de Apoio	14
6	EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO SISTEMA HELIX.....	15
6.1	Ecologia e Meio Ambiente.....	15
6.2	Segurança Pública	15
6.3	Ambientes Hostis ao Ser Humano.....	15
6.4	Urbanismo e Ocupação do Solo	16
6.5	Geração de Imagens de TV.....	16
6.6	Energia Elétrica.....	16
6.7	Telecomunicações	16
6.8	Aplicações Militares.....	17
7	PLANEJAMENTO DE MISSÕES	18
8	ASPECTOS IMPORTANTES PARA PLANEJAMENTO DE MISSÕES	20
8.1	Geometria do Universo de Operações.....	20
8.1.1	Sistema de coordenadas geodéticas.....	20
8.1.2	Sistema de coordenadas plano tangente.....	21
8.1.3	Sistema de coordenadas rigidamente acoplado ao centro de gravidade da aeronave	21
8.2	Planos de Vôo	21
8.3	Fases de Uma Missão	23
8.4	Recursos Necessários à Realização de uma Missão.....	25

8.4.1	Combustível	25
8.4.2	Energia Elétrica	26
8.4.3	Comunicação	27
8.5	Planejamento de Missões	27
8.5.1	Objetivo da missão	28
8.5.2	Aeronave utilizada	28
8.5.3	Região sobrevoada	29
8.5.4	Condições meteorológicas	29
8.5.5	Requisitos de segurança	29
9	MODELAGEM E VERIFICAÇÃO DE SISTEMAS AUTÔMATOS HÍBRIDOS.....	31
9.1	Autômatos Híbridos e Sistemas Híbridos.....	31
9.1.1	Um modelo para sistemas híbridos	31
9.1.2	As trajetórias de um sistema híbrido	33
9.1.3	Sistemas híbridos lineares	33
9.1.4	Estados alcançáveis.....	34
10	VERIFICAÇÃO DE PLANOS DE VÔO.....	35
10.1	Auxílio à Construção de Planos de Vôo.....	36
10.2	Hipóteses para Utilização de Autômatos Híbridos Lineares	36
11	O Conceito da Ferramenta de Planejamento de Missão	38
12	Exemplo de Aplicação.....	41
13	CONCLUSÃO.....	50
14	referências	52

1 INTRODUÇÃO

Aeronaves não tripuladas tem sido amplamente utilizadas principalmente em aplicações militares. Atualmente no entanto, novas aplicações, principalmente civis, tem sido vislumbradas para tais aparelhos. Essas novas aplicações abrem oportunidades de pesquisa nas mais diversas áreas de estudo da engenharia mecânica, elétrica, computacional e principalmente de automação pois, tratam-se de dispositivos projetados para operação sem a intervenção humana direta. Nesse sentido, pretende-se explorar aqui o estudo da viabilidade da automação da tarefa de planejar missões e vôos de aeronaves não tripuladas. A importância de tal estudo reside na possibilidade de redução do tempo de planejamento do vôo e garantia da exeqüibilidade da missão. A metodologia empregada neste trabalho baseia-se na leitura de diversas fontes que tratam deste assunto, elaboração de uma estratégia para construção da ferramenta, concepção e execução dos módulos dessa ferramenta e finalmente a comprovação de seu funcionamento. A hipótese aqui levantada é a de que é possível delegar a um software a tarefa de, dada uma missão, inferir matematicamente em sua exeqüibilidade utilizando para tanto a modelagem de autômatos híbridos discretos.

2 A EMPRESA

A GYRON Sistemas Autônomos Ltda. foi constituída em agosto de 1990 em Florianópolis, SC, com o objetivo de desenvolver e comercializar dispositivos móveis inteligentes autônomos e/ou controlados remotamente – mais conhecidos como *robôs* – em versões aéreas, aquáticas e terrestres.

Equipados com sensores adequados, esses robôs suportam uma vasta gama de aplicações em áreas diversas, como , por exemplo, aerofotogrametria, aquífotogrametria, sensoriamento remoto, patrulhamento e jornalismo.

Com base em análises de mercado, a GYRON iniciou em 1991 o desenvolvimento de um robô aéreo denominado HELIX, refletindo a posição de vanguarda da empresa em acompanhar a tendência mundial de utilizar esses dispositivos tradicionalmente militares em aplicações civis.

3 VEÍCULOS NÃO-TRIPULADOS

O surgimento dos RPVs (*Remotely Piloted Vehicles*) data do final da Segunda Guerra Mundial, quando, com o advento de inovações tecnológicas importantes, em especial na área de eletrônica, tornou-se possível a utilização de máquinas pilotadas remotamente em missões de alto risco.

A evolução desta tecnologia fez surgir os dispositivos hoje conhecidos como *Unmanned Vehicles*, ou Veículos Não-Tripulados, possibilitando a realização do que antes parecia ser apenas um sonho dos engenheiros: utilizar máquinas com “inteligência” própria que pudessem substituir o homem em missões de risco ou naquelas em que fossem capazes de realizar as operações desejadas de forma mais eficiente e/ou a um custo reduzido.

Desde então, consideráveis esforços têm sido desenvolvidos, principalmente no âmbito militar, para a construção de veículos não-tripulados. Estas máquinas são geralmente providas de sensores e processadores de última geração, pois são submetidas a condições operacionais onde o alto desempenho e a confiabilidade são de vital importância.

A atual conjuntura mundial, somada à disponibilidade para uso civil de tecnologias previamente desenvolvidas para aplicações militares e aeroespaciais, está viabilizando a participação da iniciativa privada neste universo de alta tecnologia. Trata-se de uma nova fronteira para a indústria de base tecnológica, que tem a oportunidade de oferecer soluções alternativas de baixo custo para inúmeras aplicações civis e comerciais, em mercados em grande parte inexplorados.

Na era da aeronáutica, por exemplo, estudos mostram que uma significativa parcela de vôos realizados por helicópteros convencionais destina-se exclusivamente a fins de observação, isto é, não transportam carga passageiros. A necessidade de um piloto aumenta os custos operacionais, tanto pela alta qualificação deste profissional como pelos riscos inerentes à operação. Além disto, deve-se considerar o elevado investimento necessário para a aquisição ou locação de uma aeronave. Assim, em inúmeras aplicações, tais como, patrulhamento e

vigilância, aerofogrametria, aerofilmmagem, e outras, um robô aéreo apresenta-se como uma solução viável e barata, além de eliminar o risco de vidas humanas no caso de sua utilização em ambientes inhóspitos ou perigosos.

Por outro lado, robôs aquáticos estão sendo desenvolvidos para atividades como a construção e manutenção de plataformas petrolíferas e a localização e resgate de objetos a profundidades em que a atuação de mergulhadores é arriscada e dispendiosa, além de mapeamento hidrográfico, monitoração ecológica (coleta de dados e/ou amostras), localização de cardumes etc.

Finalmente, também no caso de veículos terrestres, em que a maioria dos robôs é do tipo fixo, surgem agora inúmeras aplicações para sistemas móveis não-tripulados. Dentre estas, podemos citar o transporte de cargas em ambientes industriais e a remoção de explosivos em operações anti-terrorismo.

4 PROJETO HELIX

A GYRON escolheu para seu robô uma plataforma de asas rotativas devido à sua possibilidade de pairar durante o voo e capacidade de pouso e decolagem verticais (dispensando pista). Assim, a aparência física do HELIX é semelhante à de um helicóptero convencional de dimensões reduzidas.

A principal diferença é que o HELIX conta com uma sofisticada eletrônica embarcada, composta de processadores, sensores inerciais, sistemas de navegação por satélites e servomotores, que permitem o voo autônomo fora do alcance visual. Isto significa que o robô possui a capacidade de realizar trajetórias pré programadas, além de possuir recursos computacionais que diminuem significativamente o trabalho de pilotagem, que, numa aeronave convencional, é bastante complexo.

No desenvolvimento do HELIX utilizou-se a tecnologia de novos materiais, sendo sua estrutura totalmente construída em fibra de carbono, caracterizada principalmente por seu baixo peso e grande resistência mecânica. O HELIX também pode suportar uma carga útil composta de um ou mais sensores adequados a cada aplicação, sendo que, a versão básica prevê a inclusão de uma câmera de vídeo para auxílio à pilotagem fora do alcance visual. Isso não exclui a possibilidade do uso de outros sensores, como, por exemplo, câmeras fotográficas, sensores infra-vermelho, detectores de radiação e sonares.

5 DESCRIÇÃO TÉCNICA DO SISTEMA HELIX

O sistema Helix é composto de quatro partes: uma aeronave não tripulada, a carga útil transportada pela aeronave, uma estação de controle em terra e um veículo de apoio.

5.1 A Aeronave

Trata-se de um veículo não-tripulado de asas rotativas, semelhante a um helicóptero, cuja estrutura é totalmente construída em fibra de carbono. Esta aeronave é acionada por um motor de combustão interna, a gasolina, de dois tempos e dois cilindros, refrigerado a ar e com controle automático de rotação.

Um alternador acionado pelo motor de combustão supre a energia elétrica aos circuitos eletrônicos e carga embarcadas. Um conjunto de baterias de Níquel-Cádmio provê energia elétrica quando o motor não está em funcionamento e em caso de falha do alternador.

O controlador de voo usa uma CPU RISC de 32 bits (*transputer*) para processamento matemático e dois microcontroladores de 8 bits para processamento de entrada/saída. A partir de informações de posição, atitude e aceleração providas por uma bússola eletrônica, um giro-inclinômetro digital, um receptor GPS e uma unidade de referência inercial, o controlador calcula acelerações, velocidades lineares e taxas de rotação relativas a um referencial terrestre, além de informações de atitude e posição absoluta da aeronave.

5.2 Carga Útil

A carga útil transportada pela aeronave depende do tipo de aplicação à qual esta se destina. A princípio, o Helix pode suportar qualquer tipo de carga ou sensor com peso inferior a 10 kg, consumo de energia elétrica inferior a 250 VA e de volume compatível com a aeronave.

No caso de vôos fora do alcance visual, é necessário incluir pelo menos uma câmera de vídeo na faixa visível ou infravermelha para orientação ao operador. As imagens e os dados captados por esta câmera são transmitidos em tempo real para a estação de terra, onde podem ser visualizados e registrados.

Além deste, outros tipos de sensores passíveis de utilização incluem, por exemplo, garrafas de vácuo para a obtenção de amostras de gases na atmosfera, medidores de intensidade de campo eletromagnético e medidores de radiação.

5.3 Estação de Controle

A estação de controle em terra implementa duas funções básicas:

5.3.1 Controle de missão

Acompanhamento do desenrolar da missão, fornecendo ao operador informações de posição, velocidade e desempenho da aeronave.

5.3.2 Registro de vôo

Gravação em mídia magnética de dados da carga útil, dados telemétricos da aeronave e comandos executados pelo operador.

A estação de controle em terra permite ao operador pilotar a aeronave e acompanhar o desenrolar de uma missão mesmo em situações onde a mesma encontra-se fora do alcance visual (além da linha do horizonte, à noite ou em condições de baixa visibilidade).

Para tanto são disponibilizadas informações de situação horizontal e vertical, pilotagem e monitoração dos diferentes sub-sistemas da aeronave.

5.4 Veículo de Apoio

O veículo de apoio permite transportar duas aeronaves até as imediações do local de lançamento e serve como base de operações para o sistema HELIX, comportamento e estação de controle em terra e facilidades para abastecimento de combustível e pré-carga de baterias.

6 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO SISTEMA HELIX

6.1 Ecologia e Meio Ambiente

Uma das principais aplicações do sistema HELIX é a vigilância ecológica florestal a baixo custo, facilitada pela posição privilegiada da câmera. São possíveis o rastreamento e o mapeamento de focos de incêndio, a detecção de operações clandestinas de caça, extração de madeira e outras ações agressoras às reservas e parques sob proteção oficial. Também é possível o repovoamento de matas nativas através de sementeira aérea, com fim de recuperação da cobertura vegetal em áreas que sofreram ataque ambiental, ou sementeira de espécies nativas em extinção em locais de difícil acesso com requisitos de uniformidade de na distribuição das sementes. Fundações de amparo ao meio ambiente, governos municipais, estaduais e federal são clientes em potencial ao lado de empresas reflorestadoras.

6.2 Segurança Pública

Aplicações em aparatos de segurança, polícia, bombeiros, etc. Em situações de emergência como rebelião em presídios, confronto com grupos ligados ao crime organizado e o tráfico de drogas, a utilização de um veículo aéreo não tripulado pode evitar que a polícia exponha seus homens e a população a situações de risco de vida. Em situações de calamidade pública como enchentes, alagamentos, maremotos, terremotos, a utilização de veículos não tripulados em salvamento, conduzindo bóias ou cabos guia em tempo hábil pode evitar a exposição da vida humana a riscos desnecessários. Mesmo em situações menos drásticas como em balneários e áreas de prática de esportes náuticos tais veículos poderão ser utilizados. Nesta aplicação a Polícia Militar e o Corpo de Bombeiros são clientes em potencial.

6.3 Ambientes Hostis ao Ser Humano

Vistoria em áreas imersas em atmosferas hostis ao ser humano, como por exemplo áreas contaminadas por agente radioativo, químico ou biológico. Esta situação pode ocorrer em acidentes com usinas nucleares ou com equipamentos radioativos da área médica, com veículos movidos a energia nuclear, em acidentes na indústria química e em conflitos

militares. A Defesa Civil e outras entidades governamentais que coordenam atividades ligadas ao uso da energia atômica e de materiais radiativos, químicos e bacteriológicos, aparecem em primeiro plano como clientes em potencial.

6.4 Urbanismo e Ocupação do Solo

Como meio de alimentação de imagens para vistoria e acompanhamento de ocupação territorial urbana e rural, avaliação e planejamento da expansão urbana, detecção de loteamentos clandestinos e invasões de áreas públicas e privadas, vistoria de glebas e detecção de movimento clandestino de limites, rastreamento de rebanhos e levantamentos aerofotogramétricos. Neste tipo de aplicação aparecem principalmente as prefeituras, empresas agrícolas, cooperativas e grandes fazendas como potenciais clientes.

6.5 Geração de Imagens de TV

Emprego como externa avançada para estações de televisão, acompanhamento eventos esportivos de campo, náuticos, automobilísticos, acidentes (inclusive ecológicos) e outros. São clientes em potencial tanto as grandes emissoras de TV, como pequenas produtoras independentes.

6.6 Energia Elétrica

Vigilância e inspeção de lagos e barragens de complexos hidroelétricos, inspeção de isoladores, suportes, conexões e cabos em torres de alta tensão, sem a exigência de manobras de linha. As empresas geradoras e distribuidoras de energia elétrica representam uma parcela importante do mercado.

6.7 Telecomunicações

Levantamento de curvas de propagação para dimensionamento de altura de torres de transmissão / recepção de microondas. Companhias de telecomunicações poderão vir a ser clientes.

6.8 Aplicações Militares

No auxílio ao patrulhamento do mar territorial, permitindo substancial aumento do raio de ação das embarcações designadas para este fim. O robô aéreo pode ser equipado para operações de pouso e decolagem nestas embarcações, desde que seja instalada plataforma para tais operações. Como plataforma elevada para inspeção de exercícios militares, fornecendo imagens em tempo real do campo de exercícios.

7 PLANEJAMENTO DE MISSÕES

Veículos aéreos não-tripulados (UAVs – *Unmanned Aerial Vehicles*) tem sido usados por forças militares para fins de reconhecimento há mais de trinta anos [Uni93]. Mais recentemente, as vantagens inerentes a este tipo de aeronave, principalmente ausência de risco para vidas humanas e baixo custo operacional, atraíram a atenção de usuários civis. As aplicações desenvolvidas vão desde operações de segurança pública e monitoração ecológica [Kan94] à pesquisa científica em altitude [NAS93].

A grande maioria dos sistemas desenvolvidos até o presente é baseada em aeronaves de asas fixas (aviões). Isto, não apenas porque aplicações militares requerem alta velocidade à frente, grande raio operacional e baixa assinatura acústica, mas também porque aviões podem ser projetados de forma a se comportarem de modo inerentemente estável e são, portanto, comparativamente fáceis de pilotar a partir de uma estação de controle em terra.

Aplicações civis de UAVs, entretanto, apresentam requisitos diferentes. O mais importante deles é, certamente, a capacidade de decolagem, pouso e operação em áreas restritas e a baixa velocidade. Aeronaves não-tripuladas de asas rotativas (RWUAVs – *Rotary Wing Unmanned Aerial Vehicles*), capazes de vôo pairado e decolagem e pouso verticais, adequam-se bem a estes requerimentos. Diferentes veículos e sistemas de controle foram amplamente descritos em, por exemplo, [Kan94, GYR92, Sug92, Wei94, BJH92, Cyc92].

Diversas ferramentas para o planejamento de missões de aeronaves tripuladas usadas para controle, patrulhamento e transporte foram desenvolvidas [Cap94, Roc96, Hug91]. Tais ferramentas procuram maximizar a eficiência do uso da aeronave e, ao mesmo tempo, minimizar sua exposição à ações hostis. Algumas ferramentas, como a descrita em [Hug91], objetivam ainda harmonizar a operação conjunta de aeronaves de diferentes características.

Ferramentas de simulação de desempenho de UAVs [She92] também foram desenvolvidas como o objetivo de examinar quais as características de uma aeronave que mais influenciam o

seu desempenho na realização de certos tipos de missão. Estas ferramentas, por sua própria natureza, são utilizadas na fase de estudos que precede o desenvolvimento de novos veículos.

Os fatores a serem levados em conta quando do planejamento de missões a serem executadas por UAVs e RWUAVs em aplicações civis são bastante distintos daqueles levados em consideração pelos sistemas referenciados acima: ferramentas de planejamento de missões para usuários civis devem basicamente aumentar a segurança da utilização do equipamento e reduzir seu custo operacional ao facilitar sua operação, reduzindo assim os investimentos necessários ao treinamento e qualificação do operador.

A metodologia proposta utiliza autômatos híbridos para modelar a aeronave utilizada, o plano de vôo a ser executado, a região a ser sobrevoada e as condições meteorológicas esperadas quando da realização do vôo.

O modelo resultante pode ser formalmente verificado quanto à satisfação de requisitos de segurança previamente estabelecidos, tais como não-esgotamento de combustível ou manutenção de distâncias mínimas ao solo durante todas as fases da missão. Desta forma, será possível verificar a exeqüibilidade de planos de vôo, dimensionar planos de vôo parametrizados e auxiliar a construção interativa de planos de vôo.

Neste trabalho propõe-se também a utilização da metodologia de planejamento de missões para o desenvolvimento do protótipo de um editor gráfico de planos de vôo para aeronaves não-tripuladas. Tal editor deverá utilizar modelos digitais da região a ser sobrevoada para permitir a visualização gráfica dos resultados da verificação de um plano de vôo. Esta ferramenta deverá facilitar enormemente a construção interativa de planos de vôo para aeronaves não-tripuladas cuja exeqüibilidade pode ser garantida a priori.

8 ASPECTOS IMPORTANTES PARA PLANEJAMENTO DE MISSÕES

Serão apresentadas as características fundamentais ao planejamento de vôo de aeronaves de asas rotativas como por exemplo o sistema de coordenadas usado, a dinâmica da aeronave, as fases constituintes de uma missão e os modos de operação do veículo bem como os recursos necessários à realização da missão.

8.1 Geometria do Universo de Operações

Três sistemas distintos de coordenadas são usados para descrever a posição e a dinâmica da aeronave e de objetos em seu universo de operações. O *sistema de coordenadas geodéticas* é usado para especificar a posição de objetos de interesse para o cumprimento dos objetivos da missão. Os problemas de navegação da aeronave são resolvidos usando um *sistema de coordenadas cartesiano plano tangente*, referenciado ao ponto de lançamento/recolhimento da aeronave. Finalmente, as velocidades desenvolvidas pela aeronave são especificadas usando um *sistema de coordenadas cartesiano rigidamente acoplado ao centro de gravidade da aeronave*.

8.1.1 Sistema de coordenadas geodéticas

O *sistema de coordenadas geodéticas* é um sistema de coordenadas que especifica um ponto usando as coordenadas esféricas da normal ao elipsóide de referência.

A *latitude* ψ de um ponto é o ângulo formado entre a normal ao elipsóide no ponto e o plano do equador. A *longitude* θ é o ângulo formado entre o meridiano de Greenwich e o meridiano que passa pelo ponto de interesse. A *altitude* z é a medida em relação ao elipsóide de referência, geralmente WGS-84. A maioria dos objetos no universo de operação da aeronave, tais como rodovias, estradas, aeroportos e curvas de nível, é especificada neste sistema de coordenadas.

8.1.2 Sistema de coordenadas plano tangente

O sistema de coordenadas plano tangente é um sistema de coordenadas cartesiano que utiliza distâncias lineares em relação a um ponto de referência (o ponto de lançamento/recolhimento da aeronave) para especificar a posição de um ponto de interesse.

O eixo X_t do sistema de coordenadas plano tangente é coincidente com o meridiano que passa pela origem e é positivo na direção norte. O eixo Y_t é coincidente com o paralelo que passa pela origem do sistema de coordenadas e é positivo na direção leste. O eixo Z_t é perpendicular ao plano formado pelos eixos X_t e Y_t e é positivo para baixo.

A utilização do sistema de coordenadas plano tangente permite resolver os problemas de navegação utilizando a geometria do plano ao invés da geometria esférica. A aproximação da superfície elipsoidal da terra por um plano tangente à superfície da mesma no ponto de lançamento / recolhimento é possível visto ser o raio operacional da aeronave muito menor que o raio terrestre [KF69].

8.1.3 Sistema de coordenadas rigidamente acoplado ao centro de gravidade da aeronave

As velocidades desenvolvidas pela aeronave são especificadas usando um sistema cartesiano de coordenadas rigidamente acoplado ao centro de gravidade da aeronave.

Nesse sistema de coordenadas, o eixo X_a aponta para a frente da aeronave, o eixo Y_a aponta para a direita e o eixo Z_a é perpendicular ao plano formado pelos eixos X_a e Y_a e aponta para baixo.

8.2 Planos de Vôo

A seqüência de manobras executadas pela aeronave durante um vôo é especificada por um plano de vôo.

Um plano de vôo é constituído de várias *etapas*. Cada etapa compreende o deslocamento de um ponto (*waypoint*) $WP_n = (x_n, y_n, z_n)$ a outro ponto $WP_{n+1} = (x_{n+1}, y_{n+1}, z_{n+1})$. Os pontos são numerados seqüencialmente a partir de $n = 0$, com $WP_0 = (0, 0, 0)$ sendo o ponto de lançamento / recolhimento, coincidente com a origem do sistema de coordenadas plano tangente.

A distância R entre dois pontos WP_n e WP_{n+1} situados a uma mesma altitude z , é dada por:

$$R = \sqrt{(x_n - x_{n+1})^2 + (y_n - y_{n+1})^2}$$

Da mesma forma, o curso ψ que conduz de WP_n para WP_{n+1} é dado por:

$$\Psi = \arctan \frac{x_n - x_{n+1}}{y_n - y_{n+1}}$$

As manobras efetuadas durante o vôo de um RWUAV podem ser decompostas em *etapas elementares*. Etapas elementares podem ser de quatro tipos:

- Vôo à frente. Esta etapa é caracterizada por deslocamentos à velocidade e altitude constantes ao longo do eixo x_a de WP_n para WP_{n+1} .
- Mudança de rumo. São etapas que compreendem rotação da aeronave em torno do eixo z_a do ângulo ψ_n para o ângulo ψ_{n+1} . O tempo necessário à execução de uma etapa deste tipo pode ser considerado como sendo desprezível.
- Decolagem / Pouso. Etapas deste tipo compreendem deslocamentos à velocidade constante ao longo do eixo z_a de um ponto WP_n a um ponto WP_{n+1} . Velocidades negativas indicam ascensão, velocidades positivas indicam perda de altitude.
- Ganho / perda de altitude. Etapas deste tipo compreendem deslocamentos à velocidade constante de um ponto WP_n a um ponto WP_{n+1} . Uma característica destas é a

proximidade das projeções horizontais de WP_n e WP_{n+1} , ou seja, $x_n \cong x_{n+1}$. Além disso, nas etapas de ganho de altitude

O *vôo pairado*, característica particular de RWUAVs, pode ser considerado um caso particular do vôo à frente em que a velocidade é zero e WP_n é coincidente com WP_{n+1} .

8.3 Fases de Uma Missão

O termo *missão* é usado para descrever a operação da aeronave em uma certa região durante um período restrito de tempo visando cumprir um objetivo específico, o *objetivo da missão*.

Uma missão compreende todas as atividades necessárias à utilização da aeronave com o intuito de cumprir o objetivo associado. As atividades constituintes de uma missão podem ser agrupadas em diferentes fases [otA74], a saber:

- A fase de inicialização compreende todas as atividades executadas no solo, antes do vôo propriamente dito, incluindo inspeção inicial da aeronave, energização, verificação funcional dos diferentes sub-sistemas, partida e pré-aquecimento do motor.
- As atividades realizadas durante a fase de *decolagem* e *ascensão* objetivam levar a aeronave até a altitude de cruzeiro, necessária para a execução das fases seguintes. Esta fase compreende a manobra de decolagem propriamente dita e ascensão à altitude de cruzeiro. As etapas elementares utilizadas para tanto são *decolagem*, *ganho de altitude* e, eventualmente, *mudanças de rumo*.
- A fase de *deslocamento* compreende a execução de atividades destinadas a conduzir a aeronave das proximidades do ponto de lançamento a um ponto determinado pelos objetivos da missão a ser executada. As etapas elementares que podem ser utilizadas para tanto são *vôo à frente*, *mudanças de rumo*, *ganho de altitude* e *perda de altitude*.
- A fase de *execução* é constituída pelo conjunto de atividades necessárias ao cumprimento dos objetivos da missão. Esta é, geralmente, a fase mais complexa da missão pois compreende a operação da carga útil transportada pela aeronave (*payload*) e a execução de todo um conjunto de manobras de vôo destinado a posicionar a carga útil de acordo com

os objetivos da missão. As etapas elementares que podem ser utilizadas para tanto são *vôo à frente, mudanças de rumo, ganho de altitude e perda de altitude*.

- As atividades realizadas durante a fase de *retorno* destinam-se a conduzir a aeronave do ponto onde os objetivos da missão foram cumpridos (ou abandonados) às proximidades do ponto de recolhimento, geralmente coincidente com o ponto de lançamento. As etapas elementares utilizáveis para tanto são *vôo à frente, mudanças de rumo, ganho de altitude e perda de altitude*.
- A fase de *descida e pouso* compreende as atividades destinadas ao recolhimento da aeronave. Esta fase compreende a manobra de perda de altitude e a manobra de pouso propriamente dita. As etapas elementares utilizadas para tanto são *perda de altitude e pouso*, precedidas opcionalmente de etapas de *mudanças de rumo*.
- A fase de *finalização* é executada no solo, após o encerramento do vôo propriamente dito, e compreende o desligamento do motor, desenergização dos diferentes sub-sistemas e inspeção visual da aeronave.

Durante qualquer uma das fases de operação da aeronave esta pode ser operada de dois modos distintos:

- No modo *pré-programado* de operação a aeronave executa autonomamente um plano de vôo previamente estabelecido. O modo pré-programado é utilizado quando o plano de vôo da aeronave é ditado pelos objetivos da missão a ser cumprida. No controle de tráfego em rodovias, por exemplo, a rota a ser seguida é definida pelo traçado da rodovia a ser monitorada. Às vezes, principalmente durante missões de longa duração, um plano de vôo pode vir a ser alterado durante sua execução visando cumprir novos objetivos, mais atuais que os originalmente pretendidos para aquela missão. Chama-se a isto de *reprogramação da missão*. A reprogramação de uma missão implica no abandono do plano de vôo atual e na construção de um novo plano de vôo, plano este que substitui a parte não executada do plano de vôo abandonado.
- No modo *interativo* de operação o operador define de forma interativa, em tempo real, a trajetória a seguir. O modo interativo é utilizado quando as manobras a serem executadas durante o vôo dependem de informações coletadas durante a execução do mesmo.

Freqüentemente, aeronaves são operadas em modo híbrido: um plano de vôo é usado para levar a aeronave a uma área de interesse. A partir deste ponto o operador utiliza o modo interativo para cumprir os objetivos da missão.

A ocorrência de falhas em algum dos sub-sistemas da aeronave pode provocar a reprogramação da missão, ou o abandono do modo pré-programado em favor do modo de operação interativa com o objetivo de recuperar a aeronave.

8.4 Recursos Necessários à Realização de uma Missão

Três recursos são essenciais para a realização de uma missão, a saber:

- *Combustível* para o funcionamento do motor da aeronave;
- *Energia elétrica* para a operação dos sub-sistemas de controle, navegação, comunicação e da carga útil;
- *Comunicação* entre a aeronave e uma estação de controle em terra para transmissão de comandos, telemetria e dados referentes à carga útil.

A utilização destes recursos será detalhada a seguir.

8.4.1 Combustível

O consumo específico de combustível, s , é medido em gramas/segundo e depende principalmente da velocidade desenvolvida e da massa da aeronave. Em menor escala, o consumo de combustível depende também da altitude de operação e das condições e das condições de temperatura e pressão atmosférica. Neste trabalho, num primeiro tempo, serão considerados apenas os dois primeiros fatores mencionados.

Considerando f_0 como a quantidade inicial de combustível a bordo da aeronave, a quantidade de combustível restante f , em gramas, a qualquer instante é dada por:

$$f = f_0 - \int_0^t s \cdot dt$$

Considerando que a aeronave pode ser operada de acordo com os objetivos da missão em um dos quatro modos abaixo, temos [KS79, Pro85]:

- No vôo *pairado* (*hover*, ponto A da curva), a velocidade V_h é zero ou próxima de zero, visto que o vôo *pairado* inclui todas as manobras efetuadas à baixa velocidade. O consumo específico de combustível no vôo *pairado* será denotado por s_h .
- O deslocamento à frente à *velocidade mais econômica* (*endurance speed*, ponto B da curva), V_c , permite *maximizar o tempo* que a aeronave permanece no ar para uma dada quantidade de combustível. O consumo específico de combustível no vôo à velocidade mais econômica será denotado por s_c .
- O deslocamento à frente à *velocidade mais eficiente* (*best range speed*, ponto C da curva), V_r , corresponde ao ponto de máxima derivada da curva de consumo específico em função da velocidade desenvolvida. Deslocamentos a esta velocidade permitem maximizar a distância percorrida ou a área coberta para uma dada quantidade de combustível. O consumo específico de combustível no vôo à velocidade mais eficiente será denotado por s_r .
- O deslocamento à frente à velocidade máxima definida pelo envelope operacional da aeronave, V_m , permite minimizar o tempo necessário para percorrer um dado trajeto. O consumo específico de combustível no vôo à velocidade máxima será denotado por s_m .

8.4.2 Energia Elétrica

Os diferentes sub-sistemas existentes a bordo da aeronave necessitam de energia elétrica para seu funcionamento. Tal energia é proveniente de uma de duas fontes distintas:

- Um alternador acoplado ao motor de combustão da aeronave;
- Um acumulador de emergência.

O alternador é capaz de prover energia elétrica somente quando o motor de combustão opera à rotação nominal e, nestas condições, parte da energia provida pelo mesmo é usada para carregar o acumulador de emergência com a corrente I_{chg} , até sua carga máxima Q_{max} .

Quando o alternador não é capaz de fornecer energia elétrica para a aeronave (rotação do motor de combustão insuficiente ou falha do alternador ou do circuito controlador de carga), a

energia elétrica necessária para a operação da mesma é obtida do acumulador de emergência. Nestas condições, a corrente (assumida como constante) I_{dis} é drenada do acumulador de emergência.

Se a aeronave for dotada de um sistema de gerenciamento de energia que permita o desligamento seletivo de sub-sistemas não essenciais para o voo, deve-se ainda considerar o consumo mínimo de energia elétrica I_{min} após o desligamento de parte dos equipamentos/sensores a bordo.

8.4.3 Comunicação

Durante a execução de uma missão há necessidade de comunicação permanente entre a aeronave e a estação de controle em terra. Um canal de comunicação bidirecional, geralmente um enlace de rádio-freqüência, é usado para a transmissão de comandos para a aeronave e para a recepção de dados telemétricos da mesma, bem como dados relativos à carga útil usada durante a missão.

Para uma operação confiável da aeronave, é preciso garantir uma intensidade mínima do sinal de rádio-freqüência é função da potência do transmissor, do ganho das antenas de transmissão/recepção usadas para implementar o enlace, da freqüência de operação do enlace e da topografia da região sobrevoada.

8.5 Planejamento de Missões

O *planejamento de missões* para aeronaves não-tripuladas objetiva produzir um *plano de voo*, isto é a seqüência de manobras a serem efetuadas pela aeronave, considerando:

- O atendimento aos objetivos da missão;
- As características da aeronave utilizada;
- As características da região sobrevoada;
- As condições meteorológicas esperadas quando da realização da missão;
- Um conjunto de requisitos de segurança.

O plano de vôo é um fator a ser considerado durante o planejamento da missão e, simultaneamente, o resultado do planejamento efetuado.

8.5.1 Objetivo da missão

O primeiro e mais importante dos fatores a ser considerado quando do planejamento de uma missão é o *objetivo da missão*, visto que um vôo é sempre executado visando o cumprimento de um objetivo específico, por exemplo, inspecionar um trecho de uma linha de alta tensão, monitorar o tráfego ao longo de uma rodovia ou medir a concentração de gases atmosféricos em um ou mais pontos pré-determinados.

Duas características podem ser associadas ao objetivo de uma missão:

- O *custo associado* ao cumprimento dos objetivos da missão. Tanto o custo operacional de uma aeronave não-tripulada como o custo de sua perda durante a execução de uma missão são quantificáveis.
- O *benefício resultante* do cumprimento dos objetivos da missão. Devido à sua variedade e à conseqüente dificuldade em quantificá-los, os benefícios são normalmente melhor avaliados por um ser humano.

8.5.2 Aeronave utilizada

O segundo fator a ser considerado quando do planejamento de uma missão, diz respeito às características da *aeronave escolhida* para realizar a missão.

O conjunto de características a ser levado em conta varia de uma aeronave para a outra e está também ligado ao tipo de missão a ser executada. Um conjunto típico de características a serem consideradas inclui: as velocidades a que a aeronave pode ser operada, o consumo de combustível a cada uma destas velocidades, a capacidade de combustível armazenável a bordo, a fonte de energia elétrica usada pelos sub-sistemas a bordo da aeronave e pela carga útil selecionada para a missão, a potência consumida por estes equipamentos e o tipo de comunicação usado entre a aeronave e a estação de controle em terra.

8.5.3 Região sobrevoada

O terceiro fator a ser considerado quando do planejamento de uma missão diz respeito à *região* onde será executado o voo.

Além das *elevações* do terreno sobrevoado é necessário também considerar *zonas de exclusão* onde a operação da aeronave não é permitida ou somente o é durante certos períodos de tempo. Exemplos de zonas de exclusão permanente são aeroportos, aerovias em geral e zonas de alta periculosidade como o espaço aéreo sobre reatores nucleares e refinarias de petróleo. Zonas de exclusão temporária incluem áreas reservadas para exercícios militares.

8.5.4 Condições meteorológicas

O quarto fator a ser considerado no planejamento de missões de UAV's diz respeito às *condições meteorológicas* esperadas durante a realização da missão. As condições meteorológicas precisam ser consideradas de duas formas distintas:

- É preciso, inicialmente, garantir que a aeronave não seja exposta a condições para as quais não foi construída, o que implica na não-execução da missão sob tais condições.
- A intensidade, a direção e o tipo de vento (constante ou em rajadas) influenciam a dinâmica da aeronave. Esta influência é mais evidente em UAV's de dimensões reduzidas que utilizam motores pouco potentes.

8.5.5 Requisitos de segurança

Todo plano de voo precisa satisfazer um conjunto de *requisitos obrigatórios de segurança*. Dentre estes, destacam-se:

- O não esgotamento de recursos não-renováveis a bordo da aeronave, como o combustível;
- A operação dentro da área de cobertura do enlace de comunicação usado para comando e telemetria.

A violação dos requisitos de segurança obrigatórios implica em perda da aeronave e só é justificável em missões onde os benefícios esperados o justifiquem. A segurança da operação da aeronave pode ser aumentada se, além dos requisitos obrigatórios, um conjunto de *requisitos desejáveis de segurança* também for satisfeito. Dentre estes pode-se citar:

- A manutenção de distâncias mínimas em relação ao solo durante todas as fases da missão;
- Pouso com reserva de combustível;
- Garantia de retorno ao ponto de lançamento em caso de anomalias usando recursos de emergência.

Um exemplo da utilização de recursos emergenciais é o abandono dos objetivos da missão após a falha do alternador. Durante o retorno com alternador inoperante, a energia é fornecida pelo acumulador de emergência e certos sub-sistemas não essenciais podem ser desativados temporariamente para reduzir a potência elétrica consumida a bordo da aeronave.

9 MODELAGEM E VERIFICAÇÃO DE SISTEMAS AUTÔMATOS HÍBRIDOS

A dinâmica e características de aeronaves não-tripuladas descritas no capítulo 7 caracterizam um *sistema híbrido*. Um sistema híbrido é um sistema dinâmico resultante da interação de componentes contínuas (no caso de UAV's, posição, velocidade, combustível) e componentes discretas (por exemplo, as transições entre as diferentes etapas do plano de voo executado pelo UAV).

9.1 Autômatos Híbridos e Sistemas Híbridos

Em 1993, Alur et al. [ACHH93] e Nicollin et al. [NOSY93] independentemente desenvolveram um modelo para descrição e análise de sistemas híbridos baseado em autômatos híbridos. A seguinte descrição é baseada principalmente em [ACH⁺94, AHH96].

Um autômato híbrido é construído pela generalização de um autômato de estados finitos equipado com um conjunto de variáveis contínuas. Um autômato híbrido é capaz de modelar não somente ações discretas (como apresentado nas seções anteriores), mas também atividades contínuas governadas por um conjunto de equações diferenciais.

9.1.1 Um modelo para sistemas híbridos

Informalmente, um *autômato híbrido* é constituído por um conjunto finito de variáveis reais X e por um multigrafo etiquetado (V, E) . O conjunto das derivadas primeiras de X será denotado por X' . Os arcos E representam ações discretas e são etiquetados com restrições sobre os valores de X antes e após a execução das ações correspondentes. Os vértices V representam atividades contínuas e são etiquetados com restrições sobre os valores de X e X' durante a realização das atividades associadas. Desta forma, o estado de um autômato híbrido é modificado tanto por ações discretas e instantâneas como pelo passar do tempo.

Um *sistema híbrido* é descrito por uma coleção de autômatos híbridos, um para cada componente do sistema. Os autômatos constituintes do sistema operam de forma concorrente e coordenada. A comunicação entre os diferentes autômatos se dá por meio de variáveis compartilhadas e por meio de etiquetas de sincronização.

Um autômato híbrido $H = (X, V, E, \text{syn}, \text{act}, \text{inv})$ é constituído por seis componentes:

- **Variáveis.** Um conjunto finito $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ de *variáveis* contendo valores reais. O tamanho n de X é a dimensão de H . Uma *avaliação* de H é um ponto $s = (x_1 = a_1, x_2 = a_2, \dots, x_n = a_n)$ no espaço n -dimensional real \mathbb{R}^n e representa o estado das variáveis contínuas do autômato. S será usado para denotar o conjunto das avaliações possíveis do autômato H .
- **Lugares.** Um conjunto finito V de vértices chamados *lugares de controle*. Um *estado* do autômato H é um par (v, s) constituído de um lugar $v \in V$ e de uma avaliação $s \in \mathbb{R}^n$. O termo *região* é usado para denotar um conjunto de estados. As avaliações *associadas* com um lugar v em uma região W são as avaliações s tais que $(v, s) \in W$. Σ será usado para denotar o conjunto dos possíveis estados do autômato H .
- **Transições.** Um conjunto finito E de arcos chamados de *transições*. Cada transição $e = (v, a, \mu, v')$ é constituída por um lugar de *origem* $v \in V$, um rótulo de sincronização $a \in \text{syn}$ e uma relação de transição $\mu \subseteq S^2$. A transição e é dita *habilitada* em um estado (v, s) se para alguma avaliação $s' \in S$, $(s, s') \in \mu$. O estado (v', s') é dito um *sucessor transitivo* do estado (v, s) .
- **Etiquetas de sincronização.** Um conjunto finito syn de *etiquetas de sincronização*, usadas para definir a composição paralela de dois autômatos: se dois autômatos partilham a etiqueta α , então cada α -transição de um dos autômatos é acompanhada de uma α -transição do outro autômato.
- **Atividades.** Uma função act que atribui a cada lugar $v \in V$ um conjunto de *atividades*. Cada atividade é uma função do conjunto de reais não-negativos $\mathbb{R}_{\geq 0}$, também $(f+t) \in \text{act}(v)$, onde $(f+t)(t') = f(t+t')$ para todo $t' \in \mathbb{R}_{\geq 0}$. Para todos os lugares $v \in V$, atividades $f \in \text{act}(v)$ e variáveis $x \in X$ denota-se f^x a função de $\mathbb{R}_{\geq 0}$ para \mathbb{R} tal que $f^x(t) = f(t)(x)$.

- **Invariantes.** Uma função inv que atribui a cada lugar $v \in V$ um *invariante* $inv(v) \subseteq S$. O autômato pode permanecer no estado v apenas enquanto o invariante do lugar for verdadeiro, ou seja, invariantes podem ser usados para forçar a evolução de um autômato.

O sistema híbrido H é dito *temporalmente determinístico* se, para cada lugar $v \in V$ e cada avaliação $s \in S$, existe no máximo uma atividade $f \in act(v)$ com $f(0) = s$. Neste caso, a atividade f é denotada por $\phi_v[s]$.

9.1.2 As trajetórias de um sistema híbrido

A qualquer instante, o estado de um sistema híbrido é determinado por um lugar de controle e por valores para cada variável. Como já mencionado, o estado pode mudar de duas formas distintas:

- Por uma *transição discreta* e instantânea que modifica tanto o lugar de controle como os valores das variáveis de acordo com a relação de transição μ .
- Pelo *decorrer de tempo* que modifica apenas os valores das variáveis de acordo com as atividades do lugar de controle.

O sistema pode permanecer em um lugar apenas enquanto o invariante do lugar for verdadeiro. Isto implica em que alguma transição discreta deva ocorrer antes do invariante tornar-se falso, pois neste instante a mudança de lugar de controle torna-se obrigatória.

9.1.3 Sistemas híbridos lineares

Um *temo linear* sobre um conjunto X de variáveis é uma combinação linear das variáveis em X com coeficientes inteiros. Uma *fórmula linear* sobre X é uma combinação booleana de desigualdades entre termos lineares sobre X .

O sistema híbrido temporalmente determinístico $H = (X, V, E, \text{syn}, \text{act}, \text{inv})$ é dito *linear* se as atividades, invariantes e relações de transição de H podem ser definidas por expressões lineares sobre o conjunto X de variáveis.

9.1.4 Estados alcançáveis

Sejam σ e σ' dois estados de um sistema híbrido H . O estado σ' é dito *alcançável* a partir do estado σ , se existe uma trajetória de H que começa em σ e termina em σ' . O problema dos estados alcançáveis consiste então em verificar $\sigma \rightarrow^* \sigma'$ para dois estados σ e σ' de um autômato híbrido H .

A resolução do problema dos estados alcançáveis é central para a verificação de sistemas híbridos. A verificação de propriedades invariantes de um sistema pode ser convertida em um problema de estados alcançáveis: uma região $W \subseteq \Sigma$ é um invariante do sistema híbrido H se e somente se nenhum estado de $\Sigma - W$ é alcançável de um estado inicial de H .

Um sistema híbrido linear é dito *simples* se todos os termos atômicos lineares dos invariantes e das guardas das transições são da forma $x \leq k$ ou $k \leq x$, para uma variável $x \in X$ e uma constante inteira $k \in \mathbb{Z}$.

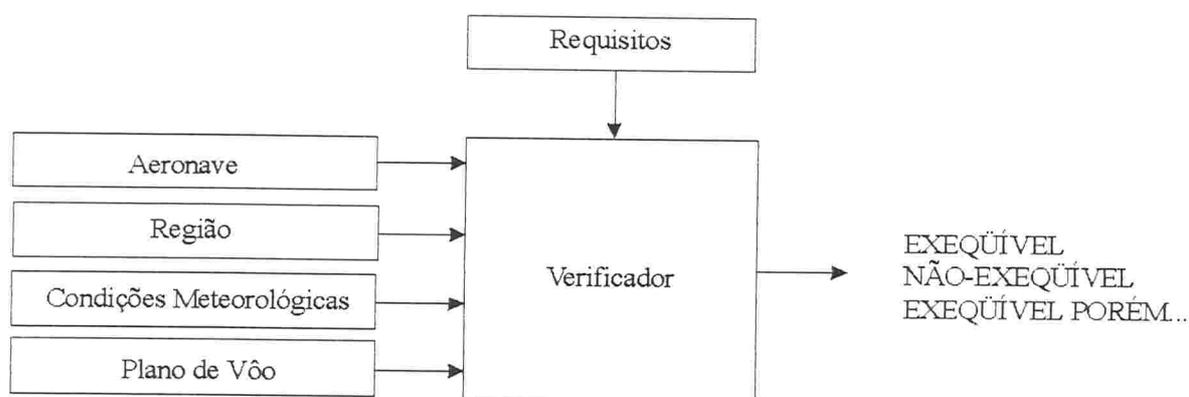
10 VERIFICAÇÃO DE PLANOS DE VÔO

A verificação de um plano de vôo aplica-se a situações em que um plano de vôo construído de acordo com critérios externos precisa ser verificado quanto à sua exequibilidade.

Dados uma aeronave, uma região de operação, as condições meteorológicas esperadas durante a operação e um plano de vôo, a verificação de um plano de vôo tem por objetivo verificar se o plano atende um conjunto de requisitos de segurança pré-definidos.

O resultado da verificação de um plano de vôo pode ser:

- O plano é exequível, isto é, satisfaz os requisitos indispensáveis e desejáveis e atende os objetivos da missão.
- O plano não é exequível. É impossível conciliar o atendimento dos objetivos da missão e os requisitos indispensáveis de segurança.
- O plano é exequível com ressalvas. Neste caso é possível conciliar o atendimento dos objetivos da missão com os requisitos indispensáveis de segurança. Porém, os requisitos desejáveis de segurança não são satisfeitos. Nesta situação, cabe ao operador avaliar o risco de operação frente ao custo associado ao não cumprimento da missão.



10.1 Auxílio à Construção de Planos de Vôo

A construção de um plano de vôo consiste em especificar as etapas constituintes do mesmo, bem como a seqüência em que tais etapas serão executadas. Dados uma aeronave, uma região de operação, as condições meteorológicas esperadas durante a operação e um plano de vôo n -parcial o mecanismo de auxílio à construção de um plano de vôo computa a região alcançável à aeronave a partir do ponto final da n -ésima etapa.

Em uma ferramenta de planejamento de missões, esta informação pode ser apresentada ao projetista de forma gráfica, superposta a um modelo digital da região sobrevoada. Esta representação gráfica pode ser usada pelo projetista do plano de vôo para determinação da $(n+1)$ -ésima etapa, em consonância com os objetivos da missão a ser executada.

O auxílio à construção pode ser utilizado para a geração de planos de vôo de forma eficiente, visto que a execução destes pode ser garantida a priori.

10.2 Hipóteses para Utilização de Autômatos Híbridos Lineares

A realização da metodologia proposta neste trabalho exige a utilização de uma ferramenta matemática de modelagem e verificação capaz de modelar uma aeronave não tripulada, sua dinâmica e seu universo de operações.

Os fatores que precisam ser considerados no planejamento de missões RWUAVs, podem ser considerados da perspectiva de sistemas híbridos. Um sistema híbrido, conforme descrito anteriormente, é um sistema dinâmico resultante da interação de componentes contínuas e discretas.

No caso de planos de vôo para aeronaves não tripuladas, a posição da aeronave, a quantidade de combustível restante a bordo da mesma e a carga do acumulador de emergência são exemplos de componentes contínuas de um sistema híbrido. As transições entre as diferentes

etapas constituintes de um plano de vôo constituem componentes discretas do mesmo sistema híbrido.

Uma das maneiras de modelar sistemas híbridos, particularmente adequada à verificação simbólica baseia-se em *autômatos híbridos* [ACHH93, NOSY93], uma extensão de autômatos temporizados [AD94].

A modelagem de um UAV, sua dinâmica e seu universo de operações por um conjunto de autômatos híbridos lineares torna-se possível através de:

- Utilização de um sistema de coordenadas plano tangente. O sistema de coordenadas plano tangente é um sistema cartesiano que permite resolver os problemas de navegação utilizando a geometria do plano ao invés da geometria esférica. O erro introduzido pela aproximação da superfície terrestre por um plano é negligenciável para o raio operacional de UAVs civis.
- Operação da aeronave apenas a velocidades pré-determinadas (velocidade mais eficiente, mais econômica, máxima e vôo pairado), o que permite que sua dinâmica seja descrita por equações diferenciais de primeira ordem.
- Operação da aeronave a altitudes comparativamente baixas (geralmente menos de 500 metros acima do nível do solo), característica de aplicações civis. A operação a baixas altitudes permite, num primeiro tempo, desprezar a variação do consumo específico de combustível com a altitude e não linearidade associada com esta variação.
- Desconsideração dos períodos de transição entre uma etapa em outra, visto ser sua duração muito inferior à duração das etapas propriamente ditas.
- Aproximação das regiões de cobertura do enlace de comunicação, das zonas de exclusão e das elevações do terreno pela união das regiões definidas por um conjunto de desigualdades de primeira ordem.

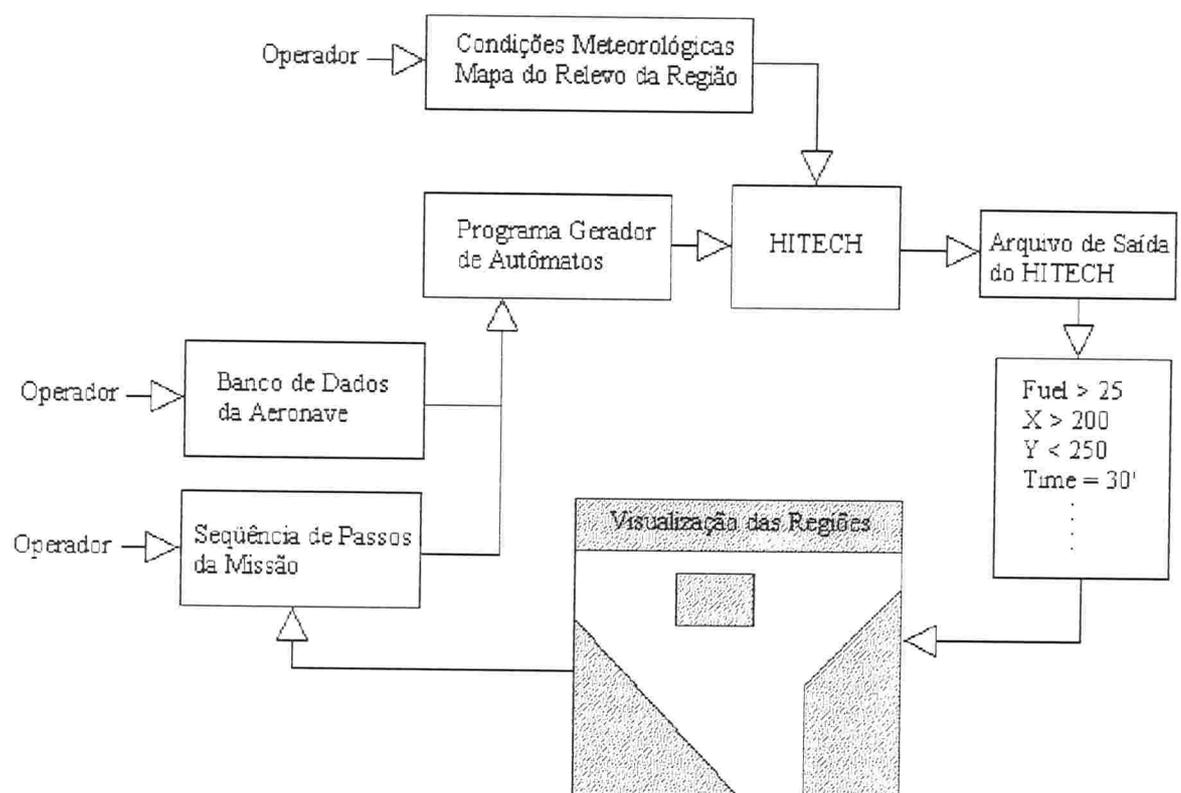
11 O CONCEITO DA FERRAMENTA DE PLANEJAMENTO DE MISSÃO

As etapas que constituem o que aqui chamamos um *ciclo de planejamento de missão* são as seguintes:

1. Elaboração de uma seqüência de instruções que representam a missão a ser executada. Nessa seqüência estão descritos os movimentos, parâmetros e posições que deverão ser ocupados pelo UAV. Exemplos típicos de comandos seriam: LIGAR, AQUECER(2min), DECOLAR, SUBIR(200m), VOAR_MAX_SPEED(2500N, 1000W), PAIRAR(5min) etc.
2. Preenchimento de um banco de dados da aeronave com as condições iniciais da mesma. Exemplo de informações para o banco de dados são a quantidade de combustível inicial, a carga das baterias, temperatura e hora de início da operação, coordenadas geográficas do ponto de lançamento etc. Este mesmo banco de dados contém informações específicas sobre o UAV como por exemplo o seu consumo específico para cada uma das velocidades padrão de deslocamento, a capacidade total de combustível possível de ser carregada, a máxima altitude prevista para deslocamento etc.
3. A união dos dois conjuntos de informações acima deve ser feita através de um programa interpretador cuja função é simplesmente transformar a seqüência de informações dadas pelo operador junto com as informações do banco de dados, em um autômato híbrido que descreve a missão e fornecê-lo ao programa interpretador de autômatos.
4. Uma terceira fonte de dados seriam as condições meteorológicas no momento da execução da missão bem como o mapa de relevos da região de cobertura da missão. Essas informações também são fornecidas ao programa que faz a interpretação do autômato.
5. O programa interpretador e que calcula as regiões alcançáveis por um autômato passa então a executar o FORWARD do plano de vôo. O cômputo das regiões alcançáveis e por

consequente a exeqüibilidade ou não da missão é revelada em um arquivo de saída gerado pelo mesmo.

6. O arquivo de saída gerado contém um conjunto de desigualdades que representam as regiões alcançáveis, o comportamento das variáveis envolvidas na missão e por fim uma conclusão sobre a exeqüibilidade da missão. Neste ponto podem haver dois caminhos para o fluxo da informação. Em um primeiro caso o operador se apodera da listagem e infere por simples observação na exeqüibilidade ou não da missão. Em um segundo caso essa listagem é passada para um outro programa interpretador de desigualdades.
7. A função do programa interpretador de desigualdades é simplesmente representar as desigualdades listadas no arquivo de saída na forma de polígonos indicativos das regiões alcançáveis. Esses polígonos são representados por sua vez sobre o mapa da região de cobertura da missão.
8. Fechando-se então o ciclo o operador terá a sua disposição uma informação visual e gráfica do que deverá acontecer com o UAV caso este seja submetido ao plano originalmente traçado para o mesmo. Verá as possíveis incursões do UAV sobre regiões proibidas (e destacadas em outra cor) bem como o sobrevôo sobre as regiões permitidas.

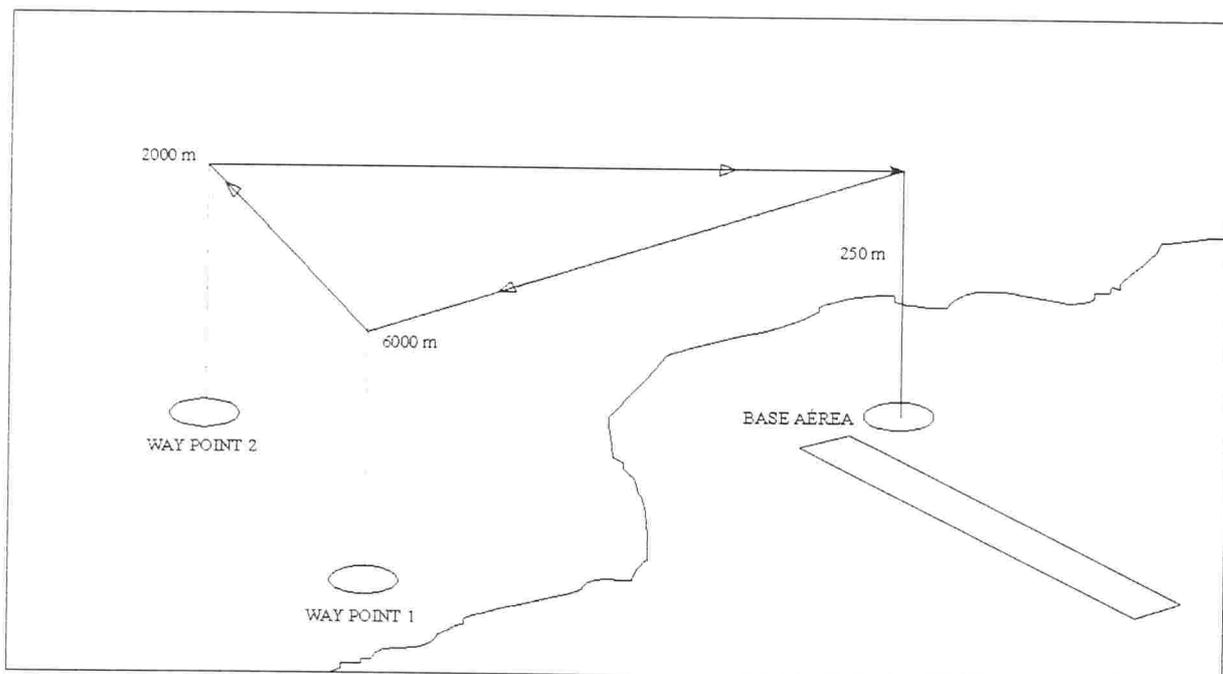


12 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

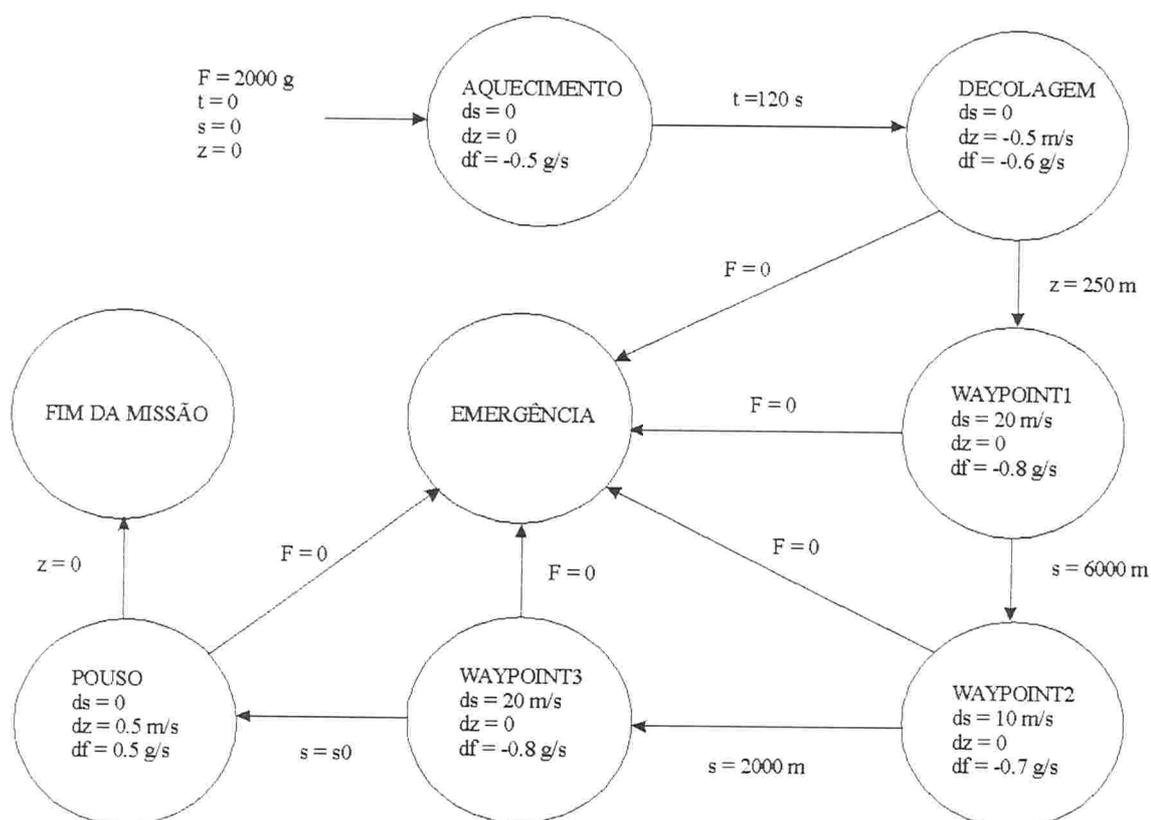
Como exemplo apresenta-se um caso hipotético onde o operador planeja a seguinte missão:

1. A decolagem e o pouso serão feitos na base aérea de Florianópolis;
2. Ligar aeronave;
3. Aquecer por 120 s;
4. Subir e estabilizar a aeronave numa altitude de cruzeiro de 250 m;
5. Deslocar com velocidade constante de 20 m/s a altura constante por 6000 m, na direção X;
6. Deslocar com velocidade constante de 10 m/s a altura constante por 2000 m, na direção Y;
7. Retornar ao ponto de partida com velocidade constante de 20 m/s;
8. Descer até o nível do solo;
9. Desligar aeronave.

A etapa acima corresponde a etapa inicial de um ciclo de planejamento de vôo onde o operador lista uma seqüência a ser seguida e um conjunto de way points a serem atingidos. A representação esquemática pode ser vista na página a seguir.



Tendo sido escolhido o caminho ou trajetória a ser seguido pela aeronave pode-se então iniciar a operação de transformação dos comandos em um autômato correspondente. A representação em diagrama esquemático assume a seguinte forma:



Nesse autômato observa-se a presença no primeiro estado a presença de condições iniciais como combustível inicial ($F = 2000\text{g}$), tempo, coordenadas de lançamento ($s = 0$) e velocidade inicial. Além destas poderiam haver outras como a carga na bateria, temperatura ambiente, velocidade e direção do vento no local etc. Todas essas informações iniciais devem ser informadas para o software que fará a transformação dos comandos em uma linguagem que possa ser reconhecida por um programa interpretador e que faça o cômputo do autômato. Além disso deve existir um banco de dados onde estejam registradas as características típicas da aeronave que está sendo usada. Uma informação fundamental seria o consumo específico de combustível em função da velocidade desenvolvida pela aeronave. No exemplo atribuiu-se um consumo de 0.5 g/s para o estágio de aquecimento, 0.6 g/s para o estágio de decolagem,

0.7 g/s para a velocidade de 10 m/s e 0.8 para a velocidade de 20 m/s. Esses valores são fictícios mas dão uma idéia da importância de se conhecer a dinâmica da aeronave utilizada.

Como era de se esperar, a transição de um estado para outro ocorre sempre que a condição de transição é atingida. Por simplicidade escolhemos como sendo a falta de combustível ($F = 0$) como sendo a única transição que leva o veículo a um estado de emergência (no caso seria a queda do mesmo). Por outro lado, se as transições esperadas ocorrerem o plano como um todo é completado e a missão é dita exequível.

Ferramentas para a análise automática de sistemas híbridos como o HYTEC [HHWT95, HH95] podem ser usados para computar a região alcançável do sistema híbrido resultante. O HYTECH pode também manipular regiões, computar suas interseções e verificar se uma região está incluída em outra ou não.

Para que o HYTECH seja no entanto utilizado, faz-se necessário a geração de um código que seja interpretável pelo mesmo e que contenha as informações do autômato correspondente à missão que se deseja realizar. Uma ferramenta computacional pode perfeitamente transformar os comandos dados pelo operador (AQUECER, DECOLAR, VOAR A FRENTE....) nesta linguagem. No exemplo acima fez-se manualmente esta etapa e obteve-se o seguinte código:

```
Var
    s:    analog;    -- distância a ser percorrida em vôo
    z:    analog;    -- altura de vôo
    F:    analog;    -- quantidade de combustível no tanque
    t:    clock;     -- tempo de vôo

automaton  FLIGHT_MISSION
synclabs:;
initially AQUECIMENTO & t=0;

loc AQUECIMENTO: while F≥0 & t ≤ 120 wait {ds=0, dz=0, df=-0.5}
when t = 120 do () goto DECOLAGEM;
when F=0 do () goto EMERGENCIA;

loc DECOLAGEM: while F≥0 & h≤250 wait {ds=0, dz=-0.5, df=-0.6}
when z = -250 do () goto WAYPOINT1;
when F=0 do () goto EMERGENCIA;
```

```
loc WAYPOINT1: while  $F \geq 0$  &  $s \leq 6000$  wait {ds=20, dz=0, df=-0.8}  
when s = 6000 do () goto WAYPOINT2;  
when F=0 do () goto EMERGENCIA;
```

```
loc WAYPOINT2: while  $F \geq 0$  &  $s \leq 2000$  wait {ds=10, dz=0, df=-0.7}  
when s = 2000 do () goto WAYPOINT3;  
when F=0 do () goto EMERGENCIA;
```

```
loc WAYPOINT3: while  $F \geq 0$  &  $s \leq s0$  wait {ds=20, dz=0, df=-0.8}  
when s=s0 do () goto POUSO;  
when F=0 do () goto EMERGENCIA;
```

```
loc POUSO: while  $F \geq 0$  &  $z \geq -250$  wait {ds=0, dz=0.5, df=0.5}  
when z = 0 do () goto FIM_DA_MISSAO;  
when F=0 do () goto EMERGENCIA;
```

```
loc FIM_DA_MISSÃO: wait {ds=0, dz=0, df=0}
```

```
end
```

```
reachable := reach forward from init_reg endreach;  
prints "REACHABLE REGION :"  
prints reachable;
```

Submetendo o código acima a compilação por parte do HYTECH este fornece como saída um arquivo contendo uma série de desigualdades obtidas da análise forward do autômato descrito.

Um exemplo típico de um arquivo de saída obtido no HYTECH é o seguinte:

```
HYTECH: symbolic model checker for embedded systems  
Version 1.02b 3/21/96  
For more info:  
e-mail: hytech@cs.cornell.edu  
http://www.cs.cornell.edu/Info/People/tah/hytech.html  
Warning: Input has changed from version 1.00(a). Use -i for more info
```

Number or iteratios required for reachability: 7

Initial region:

Location: AQUECIMENTO

$s=0$ & $h=0$ & $F=2000$ & $t=0$

**Reachable region:

Location: DESLIGAR

$s=4000$ & $h=0$ & $F=1740$ & $t \geq 13$

Location: POUSO
 $s=4000$ & $1950 = h + 150t$ & $150 \geq h$ & $h \geq 0$

Location: WAYPOINT2
 $400t = s + 800$ & $h = 250$ & $s + 20F = 5200$ & $s \geq 0$

.
.
.
.

Location: AQUECIMENTO
 $s=0$ & $h=0$ & $2000 = F + 20t$ & $2000 \geq F$

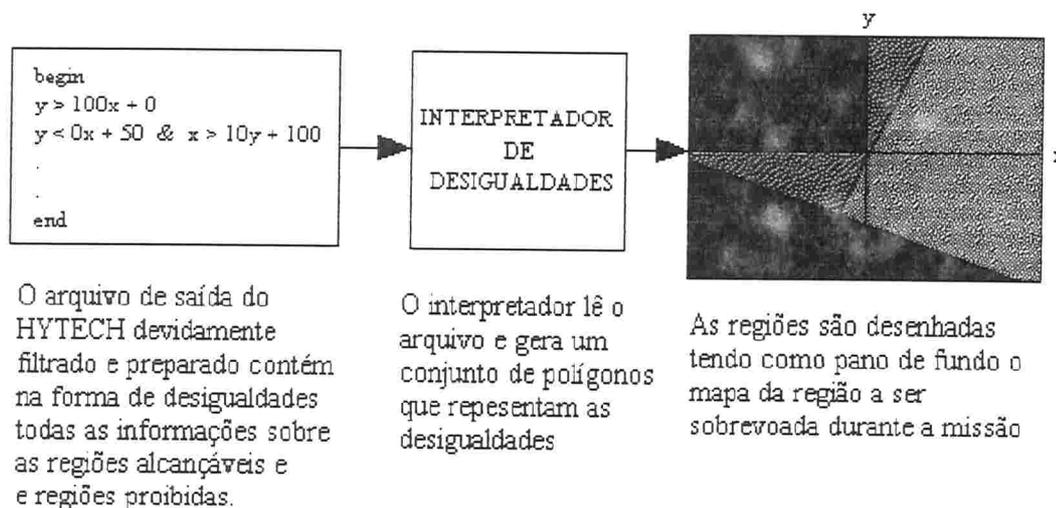
Max memory used = 0.1 MB
Time spent = 0.1 sec

Tendo em mãos este arquivo é trabalho árduo porém factível a transformação do mesmo em um conjunto de desigualdades que representam a análise obtida através do HYTECH.

Esta etapa de transformação foi deixada para uma ocasião futura. O que se fez foi a implementação de um software de visualização de desigualdades. O objetivo era que, tendo um conjunto de desigualdades escritas em um arquivo e com uma ordem bem conhecida, se pudesse transformar as mesmas em um desenho de polígonos que representem-nas sobre um plano. Esse plano nada mais é do que o mapa da região a ser sobrevoada.

O software foi desenvolvido e testado para diversas combinações de conjuntos de desigualdades e se mostrou capaz de representá-las. O mesmo foi todo desenvolvido em linguagem C para X-WINDOWS do sistema operacional UNIX. Uma grande parte do tempo do trabalho foi tomada justamente no aprendizado deste sistema operacional e no uso do X-WINDOWS como ferramenta de programação. O tempo necessário ao seu aprendizado foi subestimado o que incorreu em um significativo atraso no cronograma de atividades proposto.

Esquemáticamente pode-se dizer que o software interpretador de desigualdades faz a seguinte tarefa:



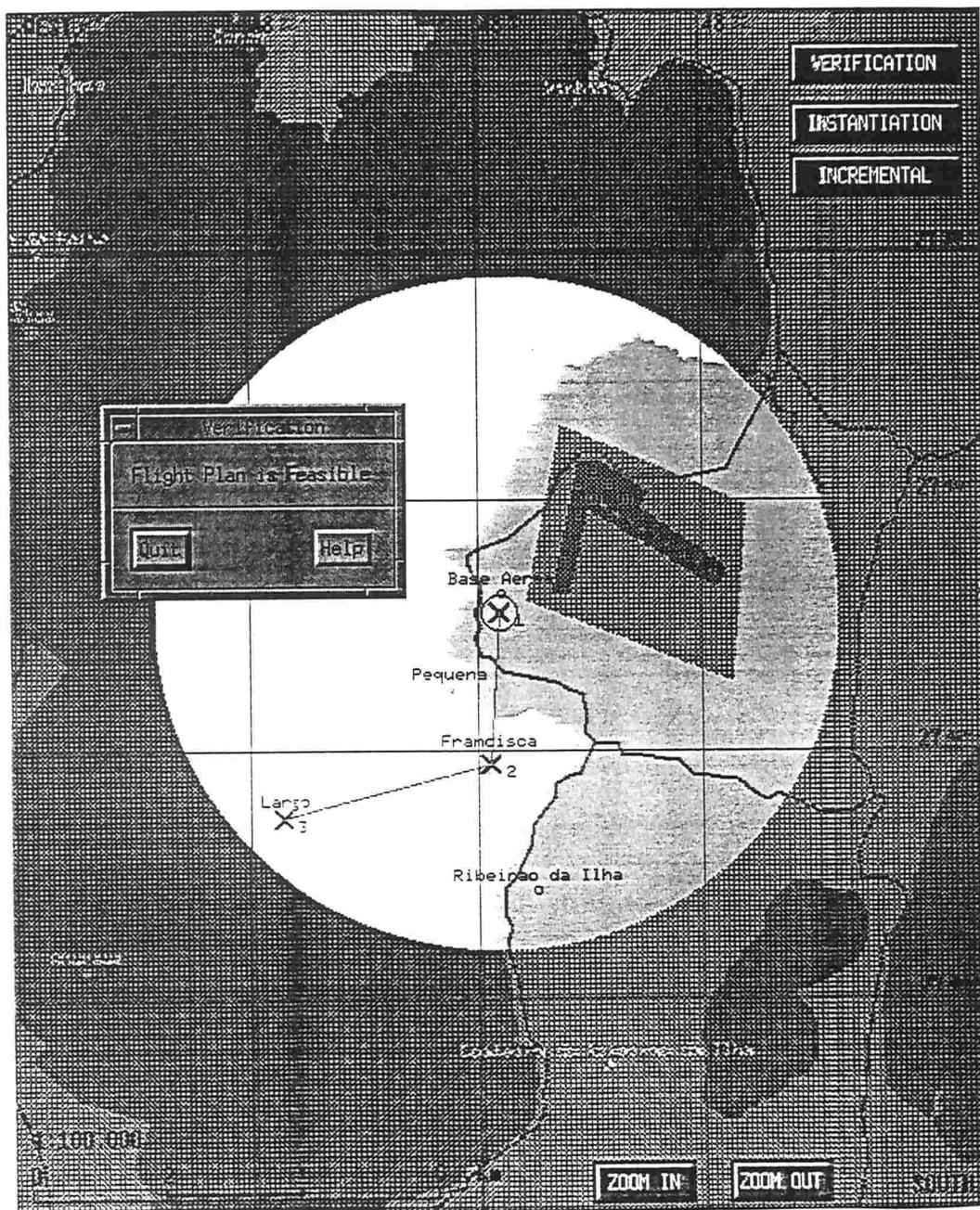
Não vale a pena aqui neste momento apresentar a listagem do programa interpretador. Seria cansativa a sua leitura e de difícil entendimento. O código fonte encontra-se em poder da GYRON SISTEMAS AUTÔNOMOS que é a responsável e principal interessada em sua utilização.

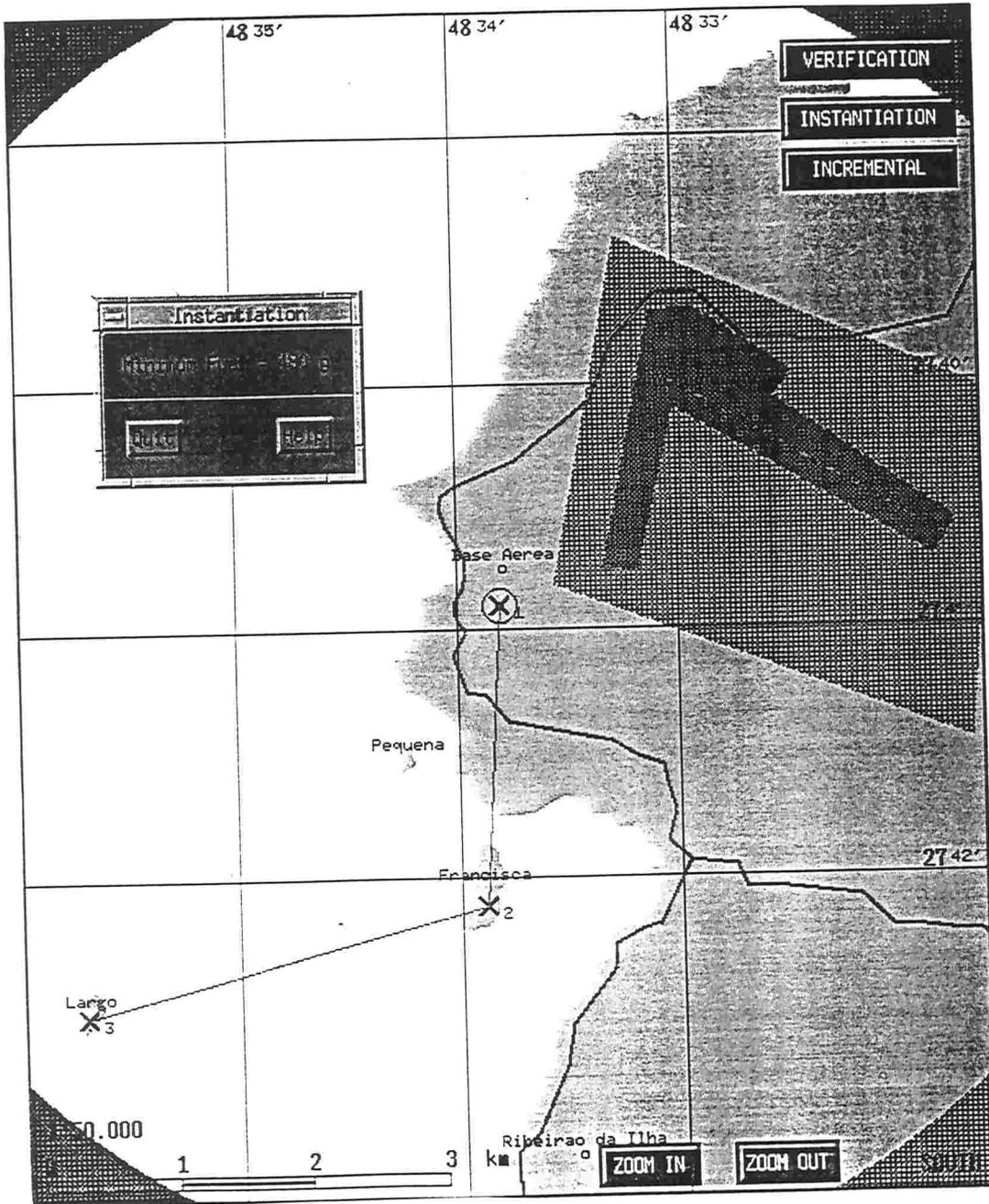
Uma etapa que está muito próxima de ser concluída mas que, por falta de tempo, ainda não pode ser considerada pronta é a sobreposição dos polígonos que representam as regiões permitidas e proibidas sobre o mapa geográfico da região a ser sobrevoada.

Durante o período de estágio foi feita a digitalização de uma grande área do mapa de Santa Catarina. A área de interesse cobre toda a ilha de Florianópolis. A digitalização dentro da GYRON foi feita por não se ter acesso a esses mapas em nenhuma instituição responsável por tal matéria (IBGE, Exército, marinha...).

O tipo de resultado que se pretende obter através do casamento e sobreposição dos mesmos pode ser visto nas duas figuras que são apresentadas a seguir. Na primeira mostra-se o

resultado da análise de um plano de vôo como sendo factível pois encontra-se dentro de uma região permitida (branca) e, na segunda, uma ampliação mostrando com mais detalhes uma zona de exclusão que é o aeroporto Hercílio Luz.





13 CONCLUSÃO

Esse trabalho teve por finalidade mostrar como autômatos híbridos podem ser usados para modelar missões de veículos aéreos e auxiliar ao operador na verificação de sua exeqüibilidade.

A metodologia empregada pode ser aplicada a diferentes aeronaves e é flexível o suficiente para ser usada com várias classes de veículos não tripulados . Pela experiência adquirida pode-se afirmar que esta técnica aumenta muito a confiança do operador, mesmo trabalhando com problemas de overflow do HYTECH que requerem freqüentemente a intervenção manual nos modelos gerados.

Dos quatro módulos necessários à finalização desta ferramenta, concluiu-se apenas uma que é justamente o módulo do interpretador de desigualdades. Muito precisa ser feito para que a primeira versão esteja disponível ao usuário porém, o grande mérito está no fato de se ter apresentado conceitualmente uma metodologia e uma maneira de automatizar o processo de análise de viabilidade das missões propostas.

Em um futuro não muito distante essa metodologia será empregada não só para o planejamento da missão (construção e verificação de planos de vôo antes de sua execução) mas também, para o controle da missão durante a execução da mesma. Neste caso o modelo será construído e verificado periodicamente em tempo real, fornecendo um nível adicional de supervisão quando a aeronave estiver sendo operada no modo interativo.

Como experiência profissional fica a importância de se estabelecer com muito mais cuidado as metas a serem atingidas em um curto prazo pois, não fazendo desta forma, corre-se o perigo de subestimar o tempo necessário e conseqüentemente não atingir todas as etapas previstas.

Fica também aberta uma grande oportunidade de continuação do exercício aqui descrito que, longe de ser uma tarefa simples, oferece muitos desafios e dificuldades porém ao mesmo tempo sabe-se que a ferramenta é implementável, oferece inúmeras oportunidades de

aplicação de conceitos da engenharia de software e é fundamental para o planejamento de missões.

14 REFERÊNCIAS

- Uni93 J. Unit. A bright future for RPVs after Vietnam? *Unmanned Systems*, 11(2), 1993
- Kan94 S. Kandebo. CYPHER moves toward autonomous flight. *Aviation Week & Space Technology*, March 7 1994.
- Nas93 NASA. Extending the vision. *Unmanned Systems*, 11(1), 1993.
- GYR92 GYRON. Projeto HELIX: Definição e descrição geral. Documento inteiro, 1992.
- Sug92 M. Sugeno. Development of an intelligent unmanned helicopter. Technical report, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, 1992.
- BJH92 Col. B. M. Brown, C. H. Jacobus, and P. G. Hall. Tiltrotor UAV: The next generation unmanned system. *Vertiflite*, 38(3):18-24, May/June 1992.
- Cyc92 J.P. Cycon. Sikorsky aircraft UAV program. *Vertiflite*, 38(3):26-30, May /June 1992.
- Cap94 T. Capaccio. Basic change in mission planning. *Air Force Magazine*, pages 58-62, December 1994.
- Hug91 D. Hughes. Advanced USAF mission planning system will serve fighters, bombers and transporters. *Aviation Week & Space Technology*, pages 52-57, June 10 1991.
- She92 R. E. Sheffield. An analysis tool for UAV effectiveness evaluation. *Vertiflite*, 38(3):31-37, May/June 1992.
- KF69 M. Kayton and W.R. Fried, editors. *Avionics Navigation Systems*. John Wiley & Sons, New York, 1969.
- otA74 Department of the Army. *Engineering Design Handbook – Helicopter, Part one, preliminary design*. United States Army Material Command, Alexandria, VA, August 1974.
- KS79 C. N. Keys and W. Z. Stepniewsky: *Rotary-Wing Aerodynamics, volume II – Performance Prediction of Helicopters*. Dover Publications, Inc., New York, 3rd edition, 1979.
- Pro85 R. W. Prouty. *Helicopter Aerodynamics*. Phillips Publishing inc, Potomac, MD, 1985.
- ACHH93 R. Alur, C. Courcoubetis, T. Henzinger, P. Ho. Hybrid Automata: An algorithmic approach to the specification and verification of hybrid systems. *Hybrid Systems*, volume 736 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 209-229. Springer Verlag, 1993.
- AC⁺94 R. Alur, C. Courcoubetis, T. Henzinger, P. Ho, X. Nicollin, A. Olivero and S. Yovine. The algorithmic analysis of hybrid systems. In *Proceedings of the 11th international conference on analysis and optimization of discrete event systems*, pages 331-351. Springer Verlag, 1994
- AHH96 R. Alur, T. Henzinger, and P. Ho. Automatic Symbolic verification of embedded systems. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 22 March 1996.
- HHWT95 T. Henzinger, P. Ho. A user guide to HYTECH. In *TACAS95: Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems*. Springer Verlag, 1995.