



FLUXOGRAMA PARA PROJETO DE SISTEMA DE CONTROLE DE FOGUETES

Waldemar de Castro Leite Filho

Instituto de Aeronáutica e Espaço, Divisão de Sistemas Espaciais
CEP 12228-904 São José dos Campos, SP, Brasil

Resumo. *Este trabalho organiza, metodologicamente, as tarefas necessárias para o projeto de sistemas de controle de foguetes (sondagem ou lançadores de satélites). O objetivo visado é identificar o inter-relacionamento das diversas áreas que compõem a construção de um foguete com o projeto do sistema de controle. Assim sendo, focaliza-se o desenvolvimento do projeto do veículo do ponto de vista do sistema de controle. O trabalho apresenta um fluxograma, onde se encontram as atividades essenciais à realização de um projeto de sistema de controle e suas interações, além de uma descrição de cada uma dessas etapas.*

Palavras-chave: Fluxograma de projeto; Sistema de controle; Esquema de projeto

1. INTRODUÇÃO

Um foguete, ou mais genericamente, um veículo espacial só tem sentido de existir se for capaz de satisfazer aos requisitos de uma missão dentro das restrições impostas. Assim o primeiro passo do projeto de tal veículo é conhecer a sua missão. Esta consiste da definição, pelo cliente ou pelos órgãos de direção, dos objetivos que se pretende alcançar e de suas características (requisitos e restrições). Esses objetivos podem ser: satelizar uma determinada carga útil; levar uma carga útil a percorrer uma determinada trajetória; atingir um ponto na superfície da terra, entre outros.

Suas características podem ser descritas como: definição da órbita a ser atingida, carga (massa, volume, etc.) a ser satelizada, tipo de trajetória, alcance e precisão requerida.

A definição do engenho é a solução técnica para a missão definida, ou seja, é a descrição das características, ao nível de sistema, necessárias a um engenho para alcançar os objetivos definidos na etapa anterior. Envolve características de aerodinâmica, trajetografia, propulsão, estrutura e atuadores para pilotagem. Esta definição mostra a viabilidade de tal veículo, em termos tecnológicos, energéticos e de controlabilidade.

A controlabilidade é uma etapa mandatória para o prosseguimento dos estudos de projeto do sistema de controle. Trata-se da garantia da capacidade do sistema de controle de atitude em manter o veículo controlado a despeito das dispersões de parâmetros de diversos tipos e das perturbações externas. Traduz-se pela verificação de que os atuadores sejam capazes de gerar o torque necessário para controlar o veículo em situações extremas, pelo tempo necessário. Na maioria dos casos, em que se usa a técnica de controle por vetor de empuxo (TVC- thrust vector control), verifica-se o ângulo máximo de deflexão do jato principal.

2. DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES

Uma vez definida a missão e uma concepção inicial para o veículo, procede-se uma série de atividades que devem ser executadas para o projeto de um veículo controlado. A figura 1 mostra, em linhas gerais, o fluxograma dessas atividades.

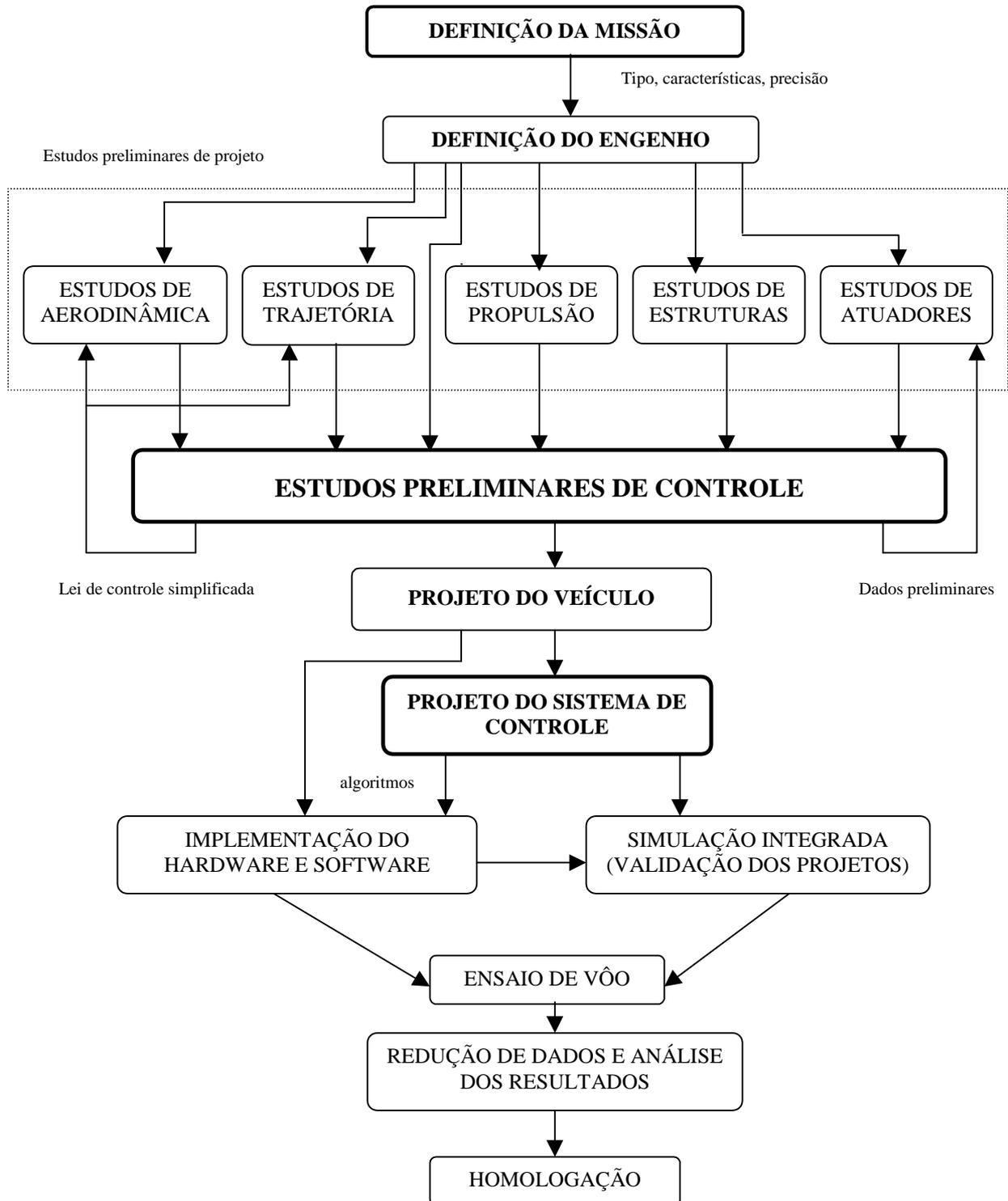


Figura 1 – Fluxograma para Projeto do Sistema de Controle de um Foguete

2.1 Estudos Preliminares de Projeto

Os Estudos preliminares devem determinar uma proposta de configuração de veículo que satisfaça aos requisitos da missão. Divide-se em cinco aspectos fundamentais, ou sub-áreas de engenharia que fornecerão as informações necessárias aos estudos de controle. São elas:

- propulsão** : devem gerar o perfil de empuxo e dispersão admissível;
- estrutura** : devem gerar os perfis de massa, momentos de inércia e posição do centro de gravidade, além de estimativas do ganho e da frequência de flexão e do fator de carga máximo admissível, com as dispersões admissíveis;
- aerodinâmica**: devem gerar os perfis dos coeficientes de arrasto, sustentação e posição do centro de pressão com as dispersões admissíveis;
- trajetografia**: devem fornecer a sequência de vôo e o perfil de velocidade longitudinal. Para trajetórias predeterminadas (caso de veículos lançadores e de veículos de sondagem) deve fornecer ainda o perfil de atitude e posição do centro de gravidade no espaço. Para o caso de mísseis, é necessário que seja fornecido o envelope de vôo. Todos os dados deverão ser acompanhados das dispersões admissíveis;
- atuadores**: devem fornecer os tipos de atuadores a serem usados e sua dinâmica estimada.

2.2 Estudos Preliminares de Controle

De posse dos resultados dos estudos preliminares de projeto, incluindo aí a dispersão de todas as informações pertinentes mencionadas acima, o grupo de controle dá início aos estudos visando definir os seguintes pontos: natureza dos controladores (analógico, digital ou híbrido); estrutura dos controladores de atitude (ou leis de pilotagem); verificação da necessidade de guiagem e proposta de lei de guiagem, se necessário; escolha e especificação dos sensores (inerciais e não inerciais) e características de localização dos controladores e dos sensores (função dos modos de flexão). Esses estudos têm os seguintes objetivos: avaliar os torques envolvidos; analisar a estabilidade do sistema e analisar o desempenho preliminar.

Como resultado desses estudos preliminares tem-se leis de controle simplificadas e dados sobre a precisão e a dinâmica necessária para o atuador e sensores a serem usados. A figura 2 mostra o diagrama geral dos sistemas de controle de foguetes, de onde se baseiam os estudos preliminares.

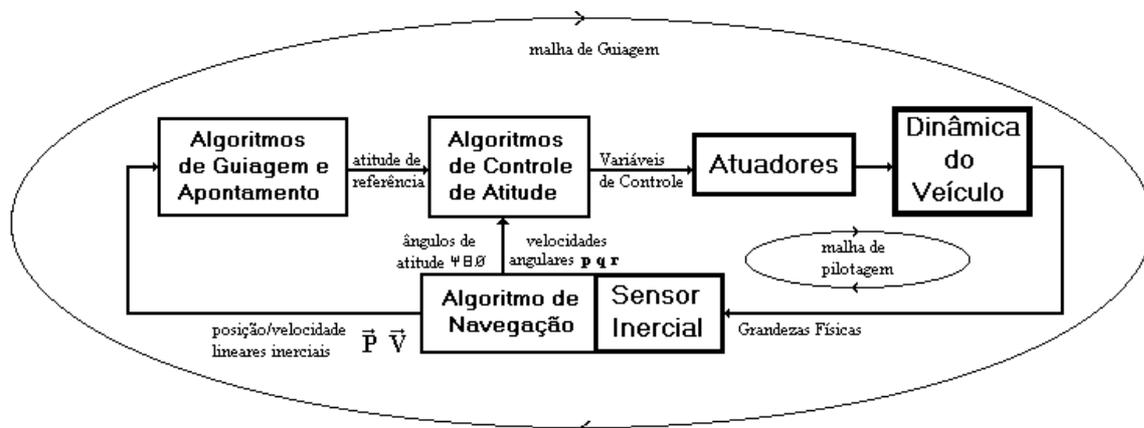


Figura 2 - Diagrama Geral de um Sistema de Controle de Foguetes

Vale dizer que durante todo esse desenvolvimento haverá uma interação com os setores fornecedores de informações preliminares de projeto para permitir alterações nessas

características, se necessário. Com isso, a concepção inicial do veículo poderá ser substancialmente alterada ou mesmo considerada inviável.

Ao fim desses estudos preliminares obtém-se a definição completa do veículo, ou seja, a configuração é considerada congelada.

2.3 Projeto do Veículo:

Congelada a configuração procede-se ao projeto do veículo gerando as mesmas informações anteriormente mencionadas, porém com maior precisão e detalhe. Diversos subsistemas deverão ter seu projeto detalhado completo e promovido sua fabricação. As informações geradas no projeto do veículo terão de ser suficientes para o desenvolvimento do projeto de todo o sistema de controle, agora detalhado e em condições de implementação física para vôo.

2.4 Projeto do Sistema de Controle:

Nesta etapa são projetadas as malhas de pilotagem, guiagem e navegação, se houver. **Pilotagem** significa o sistema que controla a direção do movimento do veículo em torno de seu centro de massa, ou simplesmente, a orientação de sua atitude (ângulos em relação a um triedro fixo ou inercial). **Guiagem** significa o sistema que gera as ordens de correção necessárias a manter o veículo em um determinado curso, ou simplesmente, controle do movimento do centro de massa (gerando um perfil de atitude de referência, por exemplo). Entende-se por **Navegação** a determinação da posição e da velocidade lineares de um veículo com respeito a um triedro de referência (normalmente a Terra). O sistema de navegação inercial autônoma, freqüentemente usado em veículos de sondagem e lançadores, constitui-se, então, de um conjunto de sensores inerciais – acelerômetros e girômetros ou plataformas giro-estabilizadas – e um complexo algoritmo de cálculo feito em um computador de bordo.

Para a pilotagem, são confeccionados programas de simulação que permitem a obtenção dos valores precisos dos coeficientes do controlador (filtros, moduladores, ganhos, etc). Nesta fase, deve ser considerada a presença de distúrbios como vento, desalinhamentos de empuxo, de sensores, perturbações de separação de estágios, modos de flexão, etc.. O objetivo principal desta etapa é obter um sistema robusto, ou seja, capaz de manter estabilidade e desempenho satisfatórios na presença de variações nos parâmetros de projeto e na presença de perturbações.

Com a conclusão do projeto tem-se o conjunto de algoritmos e a seqüência de eventos a serem implementados para controle do engenho. Além disso, devem ser especificadas as dispersões aceitáveis para a implementação de controladores analógicos, e as dispersões de desempenho dinâmico e erros de montagem dos sensores e atuadores. No caso de um controlador digital, esse algoritmo deve ser colocado em forma de software de tempo real adequado ao computador usado. Em ambos os casos (digital ou analógico) a concepção do sistema é entregue ao setor de eletrônica para seu projeto e implementação.

O grupo de controle deve ainda especificar os sinais necessários para análise do desempenho do veículo durante a fase de preparação para lançamento e em vôo, do ponto de vista do controle, para serem transmitidos via telemetria.

2.5 Simulação Digital de Validação do Projeto

Também chamada de simulação de “longo período”, consiste na confecção de um programa de computador no qual todas as restrições físicas do “hardware” são levadas em conta bem como o equacionamento global e detalhado da mecânica de vôo. Faz-se então a avaliação do desempenho global da missão, verificando os efeitos de acoplamento das

diversas malhas e algoritmos e estabelecendo erros admissíveis na trajetória até o fim da fase controlada. Para tanto, torna-se necessária a execução de simulações considerando diversas condições de voo baseadas em uma seleção estatística de dispersões, perturbações e erros.

Este estudo valida o projeto do sistema de controle e autoriza sua implementação real no que se chama “modelo de engenharia”.

2.6 Simulação Integrada

Pronto o “modelo de engenharia” do sistema de controle, é feita então uma simulação integrada a elementos físicos utilizando-se o “hardware”, os atuadores e sensores, a mesa de três eixos (simulador de movimento rotativo de 3 graus de liberdade), mancais a ar (aeroestáticos) ou ainda outros dispositivos. O objetivo é investigar aspectos da implementação do sistema de controle (hardware e software) além de auxiliar na qualificação e na aceitação dos equipamentos da rede elétrica de controle e suas interfaces com as demais redes (telemetria, serviço e segurança). Esta simulação deverá reproduzir o desempenho previsto na simulação digital de validação.

O projeto do sistema de controle é então realizado em seu modelo de voo, que deverá passar pelo mesmo conjunto de ensaios de simulação integrada. Após esses ensaios será, então, liberado para voo.

2.7 Ensaio de Voo

O próximo passo é então a integração total do sistema para voo. Neste ensaio são monitorados os sinais já especificados em fase anterior para que seja feita uma análise completa do comportamento do veículo visando sua homologação. Finalmente, é realizado o voo do veículo.

2.8 Redução de Dados e Análise dos Resultados

Os dados de voo, gravados em meio eletrônico, são adequadamente conformados e decodificados segundo suas definições e calibrações. A partir desses registros o desempenho do veículo é analisado e comparado com suas especificações. Tiradas as conclusões, sugestões são feitas para uma nova experiência, se for o caso, ou o projeto é dado como concluído.

2.9 Homologação

De acordo com a complexidade do projeto e o nível de confiabilidade que se deseja para esta fase de desenvolvimento, deve ser definido um número de voos com sucesso, ou seja, atendendo as especificações propostas, após os quais o veículo é homologado.

3. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta as linhas básicas do desenvolvimento do projeto do sistema de controle para foguetes de sondagem e lançadores de satélites. Mostra como as informações devem ser aglutinadas para a realização do projeto e quais suas principais etapas.

Esta contribuição, sendo fruto de 20 anos de experiência com projetos de controle na área espacial, permite obter-se as diretrizes gerais para qualquer grupo ou empresa que deseje enveredar-se pela fascinante área espacial.

REFERÊNCIAS

- Griffin, M.D. & French, J.R., 1991, Space Vehicle Design, AIAA.
- Marty D., 1986, Conception des Véhicules Spatiaux, Masson.
- Malyshev V.V., Krasilshikov M.N., Bobronnikov V.T., Dishel V.D., Leite Filho W.C., Ribeiro T.S., 1996, Aerospace Vehicle Control - Modern Theory and Applications, Instituto de Aeronáutica e Espaço, São José dos Campos.

Flow Diagram for Space Vehicle Control Systems Design

Abstract. This work organizes, methodologically, the necessary tasks for the project of systems of control of rockets (sounding or satellite launchers). The objective is to identify the inter-relationship of the several areas that compose the construction of a rocket with the responsible section for the project of the control system. It focuses the development of the vehicle design from the point of view of the control system. The work presents a flow diagram, showing the essential activities for the accomplishment of the control system design and its interactions. A description of each one of those stages is also presented.

Keywords. Design Flow Diagram, Control System, Design Scheme, Satellite Launchers