

Agradecimento:

9,5 (nove e cinco)

hAm

Agradeço ao professor Dr. Diolino José dos Santos Filho pelos ensinamentos oportunos e dedicação na tentativa de passar os seus conhecimentos da metodologia aplicada no presente trabalho.

Agradeço aos praças do CCEMSP, pois, sempre que foi preciso, prestaram preciosos serviços no auxílio à confecção deste trabalho.

Enfim, agradeço a Deus por ter me dado serenidade, inteligência e paciência para transpor os obstáculos encontrados.

Márcio Rodrigues Pereira da Silva

## Resumo:

O processo de lançamento de avião, hoje vigente no NAeL Minas Gerais, é realizado tendo o homem como o elemento de realimentação da malha. Com isso, o processo torna-se por vezes lento, sem muita segurança para os operadores e altamente dependente do homem.

Baseado nisto, o presente trabalho propõe a automação do sistema catapulta do NAeL Minas Gerais baseado na metodologia MFG/PFS, uma vez que o processo se caracteriza ser do tipo SED (sistema a eventos discretos).

Utilizando esta metodologia, será proposto um controle para tornar o processo mais independente possível do homem para torná-lo mais eficaz e eficiente.

Para validar tal controle, será simulado, via software, o objeto de controle (baseado em programação orientada a objeto) que trocará sinais de comando e controle com o controlador.

E, por fim, será feito um tratamento estatístico dos resultados obtidos com o propósito de se alcançar a configuração otimizada, pois o software de simulação do objeto de controle permite a configuração dos elementos da planta para cada simulação realizada.

# Índice

<b>1</b>	<b>Introdução:</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Descrição da Operação:</b>	<b>4</b>
2.1	Sistema catapulta :	4
2.2	Defletor de Jatos :	9
<b>3</b>	<b>Seqüência de Lançamento:</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>Sistema de Comando e Controle Atual :</b>	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>Análise das Necessidades :</b>	<b>13</b>
<b>6</b>	<b>Definição das Funções de Controle :</b>	<b>14</b>
6.1	Os Tipos de Controladores :	14
6.2	Modelo Estrutural :	16
<b>7</b>	<b>Definição do Fluxo das Funções de Controle :</b>	<b>20</b>
7.1	Aplicação da Metodologia PFS/MFG no Sistema de Lançamento de Aeronaves do NAeL Minas Gerais:	20
7.1.1	[ ligar ]:	23
7.1.2	[ setup ] :	23
7.1.3	[ lançamento]:	25
7.1.4	[ finalização]:	27
<b>8</b>	<b>Objeto de Controle:</b>	<b>30</b>
8.1	Reservatório de Pressão:	31
8.2	Tira de Selagem:	32
8.3	Defletor de jatos:	33
8.4	Lançadeira:	34
8.5	Retrator:	35
8.6	Rede Hidráulica:	36
8.7	Sistema de Freio:	37
<b>9</b>	<b>Modelagem Dinâmica do Objeto de Controle:</b>	<b>38</b>
9.1	Reservatórios de Vapor:	38
9.2	Tiras de Selagem:	46
9.3	Defletor de Jatos:	48
9.4	Catapulta (shuttle):	53
9.5	Retrator:	58
<b>10</b>	<b>Sistema Simulador do Objeto de Controle:</b>	<b>60</b>
10.1	Estratégia Computacional para a Modelagem do Objeto de Controle:	60
10.2	Definição dos Objetos:	61
10.2.1	Tanques:	61
10.2.2	Catapulta (shuttle):	64

10.2.3	Retrator:	67
10.2.4	Tiras	69
10.2.5	Rede Hidráulica:	71
10.2.6	Defletor	72
10.2.7	Freio:	74
<b>11</b>	<b>Software Simulador da Planta:</b>	<b>76</b>
11.1	Principal:	76
11.1.1	Comunicação:	77
11.1.2	Estabelecimento dos Parâmetros:	79
<b>12</b>	<b>Implementação Computacional dos Elementos do Objeto de Controle:</b>	<b>82</b>
12.1	Reservatórios de Vapor:	82
12.1.1	Processo de Enchimento:	82
12.1.2	Processo de Esvaziamento:	85
12.2	Tiras de Selagem	86
12.3	Defletor:	88
12.4	Retrator:	90
12.5	Catapulta (lançadeira):	91
12.6	Freio:	95
12.7	Rede Hidráulica:	96
12.8	Xtimer:	97
<b>13</b>	<b>Metodologia para Transformação do Modelo PFS/MFG para a Linguagem LADDER:</b>	<b>99</b>
<b>14</b>	<b>Implementação da Linguagem LD:</b>	<b>102</b>
<b>15</b>	<b>Simulação:</b>	<b>105</b>
<b>16</b>	<b>Problemas Ocorridos na Simulação:</b>	<b>111</b>
<b>17</b>	<b>Conclusão:</b>	<b>112</b>
<b>18</b>	<b>Bibliografia:</b>	<b>114</b>

## 1 Introdução:

O NAeL (Navio Aeródromo Ligeiro) Minas Gerais é um navio da Marinha do Brasil, cuja função é realizar o lançamento de aeronaves, além de ter a função de ser o navio capitânia da esquadra, ou seja, ser o navio chefe. A história das guerras mostrou que, para se ter sucesso em combates, é necessário se obter, pelo menos, a superioridade aérea. Daí a importância do Minas Gerais no contexto naval.

Para cumprir a sua função principal, o navio dispõe de um sistema de lançamento de aeronaves, denominado *sistema de catapulta*. Tal sistema é de suma importância, ainda mais que o Brasil adquiriu, recentemente, novas aeronaves que necessitam de um sistema eficaz e eficiente.

O sistema que hoje perdura é realizado por operadores colocados em pontos estratégicos do navio para realizar o controle. Com isso o tempo de lançamento é, para os padrões atuais, elevado e altamente dependente da qualificação dos operadores.

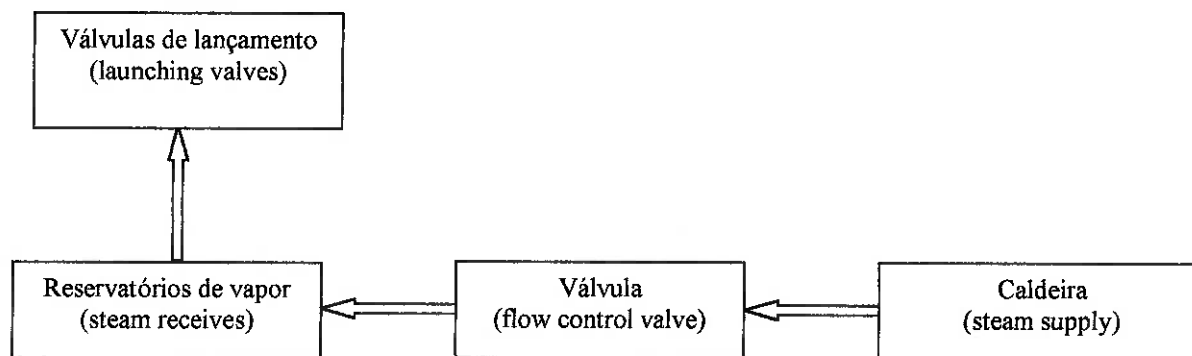
Com o objetivo de padronizar o tempo de lançamento, diminuir o tempo de lançamento e aumentar o nível de segurança do pessoal envolvido, o presente trabalho propõe o controle do lançamento de aeronaves do Minas Gerais.

## 2 Descrição da Operação:

Para realizar a tarefa de lançar aeronaves, o sistema de catapulta dispõe de vários dispositivos que serão responsável pelo lançamento dos aviões. Assim o sistema é composto da seguinte maneira:

### 2.1 Sistema catapulta :

a) a energia utilizada para lançar a aeronave, provém de um sistema de vapor superaquecido. Tal vapor é gerado em uma caldeira (steam supply) a uma determinada pressão e temperatura. Este vapor é direcionado para os reservatórios de vapor (steam receivers). Entre a caldeira e o reservatório existe uma válvula que permite a passagem do vapor para o reservatório (flow control valve). Esquema 1



Esquema 1 – Alimentação dos reservatórios de vapor.

b) o avião é lançado com auxílio de uma lançadeira (shuttle). Esta é fixa à ponta da haste do pistão e é engatada no trem de pouso do avião. Com a energia oriunda do vapor superaquecido, vindo do reservatórios de vapor, o pistão é empurrado arremessando a aeronave com uma alta aceleração para atingir a velocidade necessária para a decolagem. Este conjunto (pistão, lançadeira e aeronave) percorrerá sobre uma linha de cilindros (cylinders line) até a proa do navio.

c) entre o reservatório e os cilindros que receberão o vapor, existem duas válvulas de lançamento (launching valves) uma para cada pistão. Estas válvulas permitem a passagem do vapor para os cilindros e funcionam on / off, ou seja, ou estão totalmente fechadas ou totalmente abertas (elas são pilotadas eletricamente pelo sistema de solenóides). Vide esquema 2.



Esquema 2 – Vapor a alta pressão empurrando o pistão.

d) durante o lançamento do avião, para que o vapor admitido nos cilindros não seja perdido para o meio, existe um dispositivo denominado tira de selagem (sealing strip). Este dispositivo deve estar tracionado antes do lançamento do avião. O seu funcionamento é um pouco complexo. Esta tira posiciona-se, já tracionada, sobre pistas (em forma de rampa) existentes nas extremidades dos pistões. Conforme os pistões vão se deslocando no lançamento do avião, estas pistas, pelo seu formato, fazem com que estas tiras vedem fendas existentes entre a câmara, onde encontra-se o vapor a alta pressão, e a telha que é uma cobertura dos cilindros (cylinder cover). Quando do retorno da lançadeira para a sua posição de lançamento, este dispositivo vai abrindo as fendas liberando o vapor para o meio. O seu funcionamento é análogo ao zíper que são utilizados largamente na indústria têxtil, como por exemplo em calças. O dispositivo é ilustrado na figura 1.

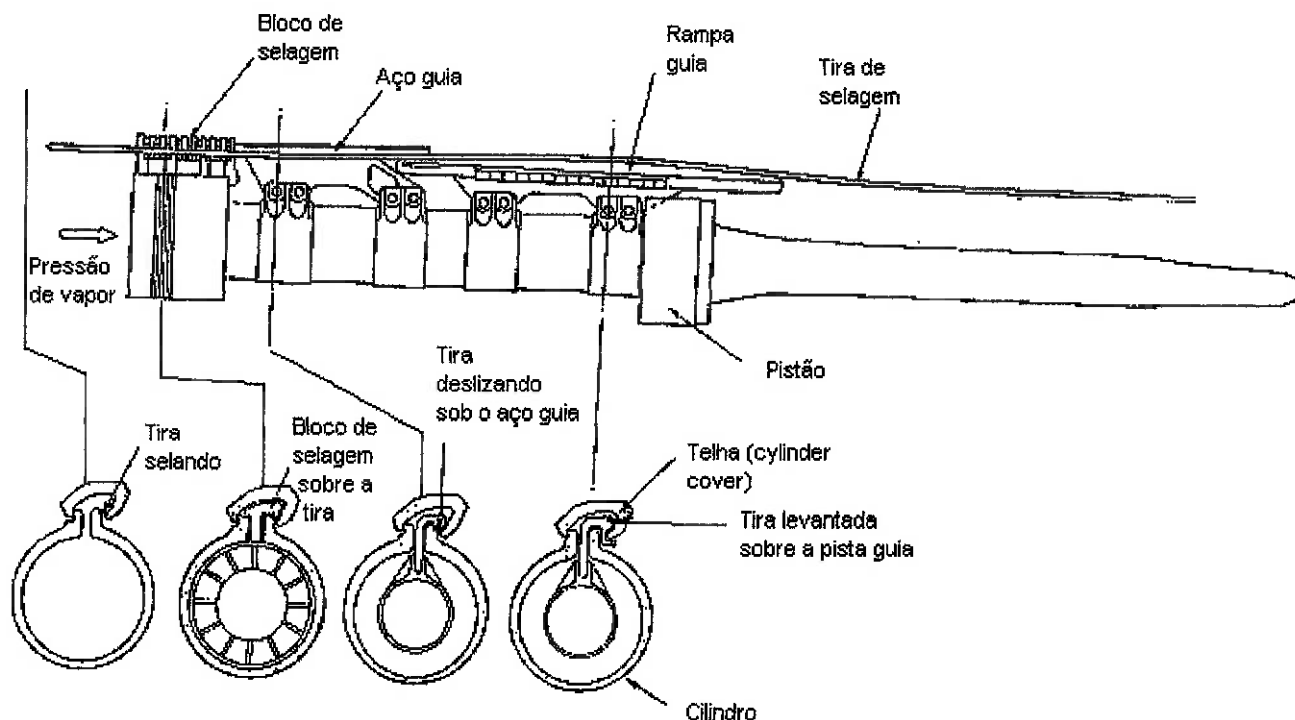
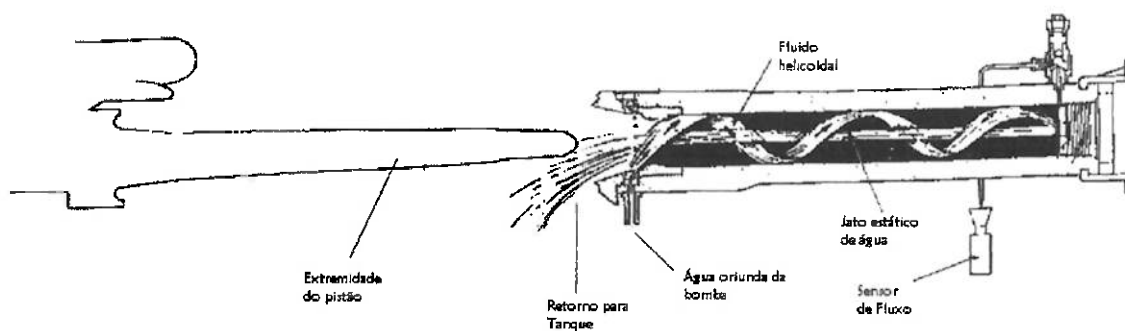


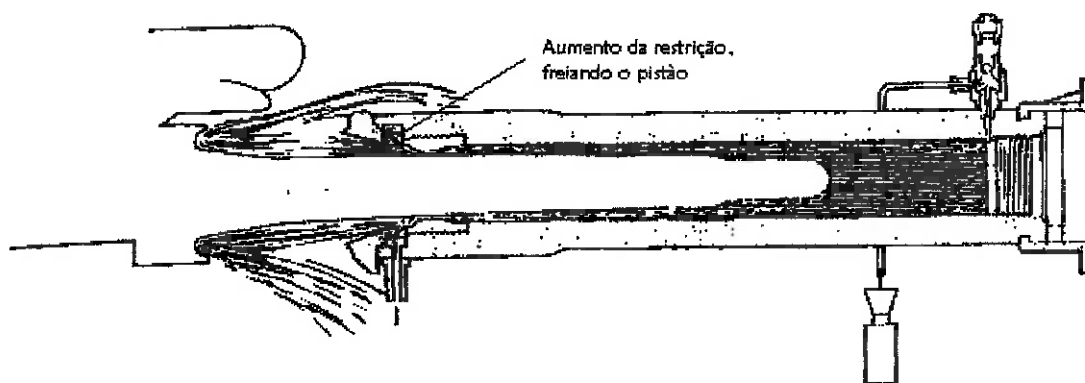
Figura 1 – Funcionamento da tira de selagem.

e) quando o conjunto pistões/lançadeira chegar ao fim de curso, final da linha de cilindros, encontra-se com uma velocidade extremamente elevada. Desta forma existe um sistema de freios no final da pista. Este freio deve estar ligado antes do lançamento da aeronave, pois a energia cinética do conjunto é elevada e necessita ser dissipada. Na figura 2 é ilustrado o sistema de freio. Observa-se que existe um jato de água helicoidal que será responsável pela frenagem do conjunto, e, devido ao formato da extremidade dos pistões, conforme estes vão adentrando no freio, a área pela qual a água sai para retornar ao tanque vai reduzindo, aumentando a restrição progressivamente, freiando assim o conjunto.



(a) Pistão se aproximando do freio



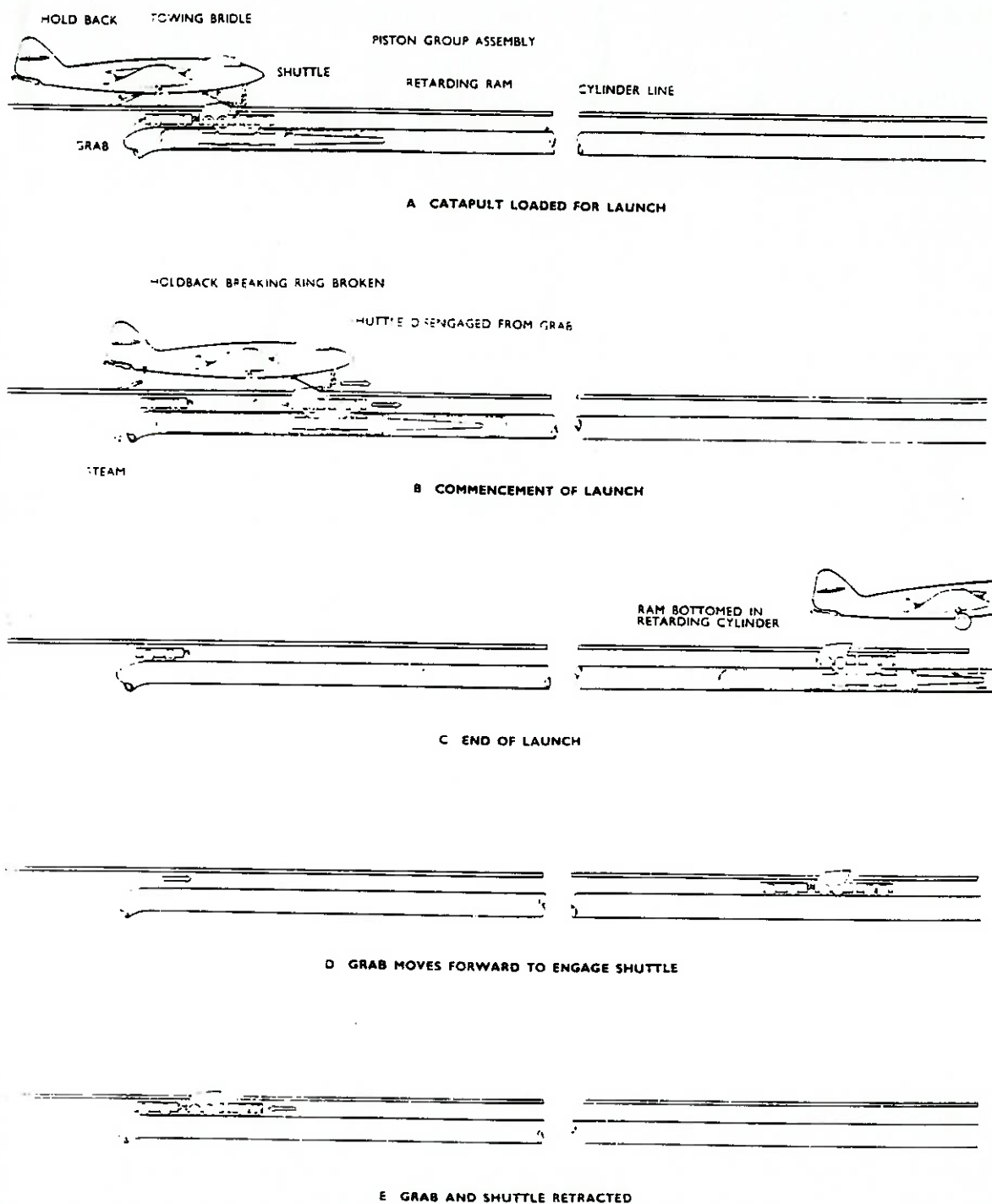


(b) Pistão adentrando o freio

Figura 2 – Sistema de freio.

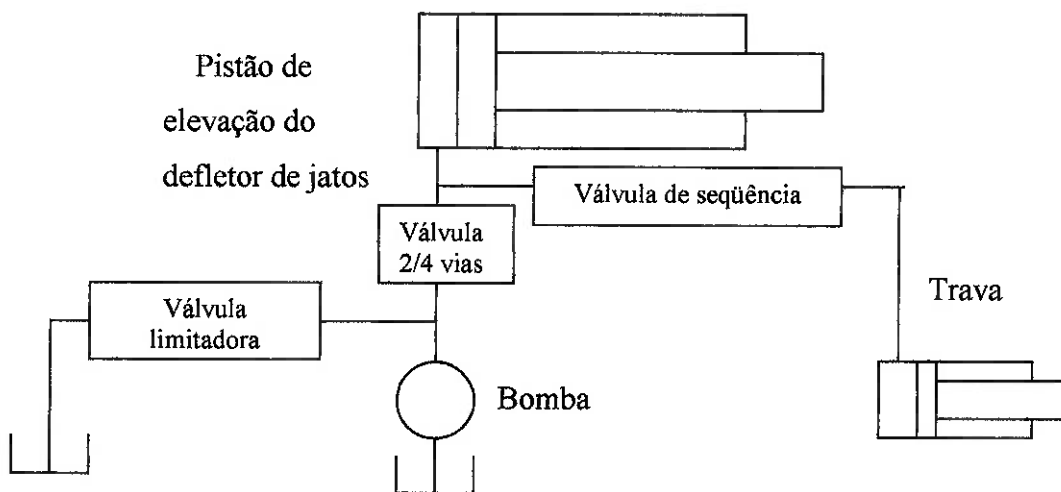
f) para trazer o conjunto pistões/lançadeira para a posição inicial, existe um dispositivo denominado retrator (grab) que após o lançamento da aeronave vai à frente, engata na lançadeira e a traz de volta à posição inicial. Figura 3.

Figura 3 – esquema de lançamento de aviões.



## 2.2 Defletor de Jatos :

Posicionado o avião para lançamento, são ligadas as turbinas do mesmo gerando altas temperaturas a sua ré, o que pode causar ferimentos e acidentes com o pessoal que se encontra no convão. Para evitar tal fato, são içados à ré da aeronave uma chapa de aço denominada defletor de jato. Esta chapa deve estar içada antes do lançamento da aeronave. Este dispositivo é independente do sistema de catapulta. Os atuadores são pistões hidráulicos. O seu funcionamento é da seguinte forma: na rede hidráulica existe uma válvula de seqüência, a qual é configurada para uma determinada pressão, e, quando os pistões atingem o fim de curso, ou seja, defletor levantado, a pressão na rede aumenta. Quando esta pressão ultrapassar o valor configurado na válvula de seqüência, esta válvula se abre direcionando, assim, o fluxo de óleo para duas travas, uma de cada lado, prendendo então o defletor na posição final, totalmente levantado. Depois de travados os defletores, a pressão na rede volta a aumentar até atingir o valor de pressão setado na válvula limitadora de pressão. Sendo atingido esta pressão limitadora, abre-se, desta vez, a válvula limitadora de pressão enviando o óleo de volta para tanque, mantendo, a partir daí, a pressão na rede num valor constante (pressão configurada na válvula limitadora de pressão).



Esquema 3 – Rede hidráulica do defletor de jatos.

### 3 Seqüência de Lançamento:

Antes do lançamento propriamente dito, devem ocorrer os “setup” necessários:

- abrir válvula de admissão de vapor (flow control valve): este comando libera a passagem de vapor da caldeira para o reservatório de vapor;
- fechar válvula de admissão de vapor (flow control valve): fecha-se então a válvula após atingir uma determinada pressão desejada de vapor no interior do reservatório;
- ligar sistema hidráulico: a rede é ligada até atingir uma determinada pressão. Esta rede vai alimentar o defletor de jatos;
- ligar sistema de freios: liga-se o jato d’água helicoidal para a frenagem do conjunto lançadeira/pistões;
- tracionar tiras de selagem: um motor é responsável pelo tracionamento que é desligado quando acende-se a luz no painel de controle que se encontra na praça de máquinas da catapulta;
- navio posicionado: este comando é dado pelo comandante ou encarregado do lançamento indicando que o navio encontra-se posicionado, com a velocidade relativa desejada (relativa em relação ao vento) e autorizado o lançamento ;
- posicionar avião para lançamento: nesta situação é feito o posicionamento da aeronave pelo piloto da mesma no local correto, afim de ser engatado pela lançadeira;
- lançadeira na posição inicial: comando que trás a lançadeira para a localização do avião que está na posição de lançamento;

As seqüências acima expostas são realizadas de forma independente, a menos do posicionamento da lançadeira (que depende do posicionamento do avião), e chegando ao final de todas as atividades, o sistema está pronto para realizar o lançamento. Assim é dado início ao processo de lançamento. São eles:

- levantamento do defletor de jatos: chavea-se uma válvula de quatro vias/duas posições que irá conduzir óleo para os atuadores do defletor de jato. Quando é atingido o final de curso do pistão, a pressão eleva-se abrindo então a válvula de seqüência que após aberta alimenta a trava que mantém o defletor levantado (conforme explicado anteriormente). ;
- lançamento: abre-se as válvula de lançamento (launching valves), afim de alimentar os pistões com o vapor oriundo dos reservatórios, o qual impulsionará a aeronave;

- avançar retrator (grab): após o conjunto pistões/lançadeira atingir o fim de curso e o repouso, é acionado o retrator para vante afim de trazê-lo;
- despressurizar reservatórios: são abertas válvulas de exaustão, com o objetivo de reduzir ao máximo a pressão exercida sobre os êmbolos dos pistões e consequentemente diminuir a força exercida nos pistões, resistência, quando do retorno dos mesmos;
- retornar retrator: o retrator, depois de engatado, retorna com o conjunto pistões/lançadeira para a posição inicial;
- abaixar defletor de jatos: chavea-se a válvula quatro vias/duas posições para que o óleo, que antes estava exercendo pressão sobre os atuadores do defletor de jatos, retorne para tanque;

Depois do lançamento, o sistema deve atingir o estado inicial, que são:

- despressurizar a rede hidráulica: desliga-se a bomba hidráulica até que atinja-se a pressão de tanque;
- destracionar as tiras de selagem: o motor que as tracionou agora gira no sentido oposto até que as tiras fiquem descarregadas;
- desligar freios: desligar o fluxo de água helicoidal no freio;

Após esta última sequência, o conjunto estará pronto para um novo lançamento de aeronaves.

Outro fator importante é o sistema de emergência do processo. Uma vez acionado o sistema de emergência, todo o processo, em quaisquer dos estados que se encontrar, retorna ao estado inicial, a menos que o processo esteja no estado de lançamento, ou seja, o avião está decolando do navio.

Atualmente o navio dispõe de sensores que indicam, através de sinais de monitoração, quando é terminada uma determinada tarefa. Estes sinais são luminosos ou até mesmo em forma de cursor, como é o caso do sensor do monitoramento da posição do retrator. Mas o sinal de comando é enviado pelos operadores, fechando-se, assim, a malha de controle. O navio dispõe de grande número de atuadores, vários deles citados acima, que podem ser utilizados, tanto quanto os sensores, por ocasião da automação do processo.

#### 4 Sistema de Comando e Controle Atual :

O controle realizado atualmente é realizado por basicamente três operadores que ficam localizados no convôo, praça de máquinas da catapulta e no passadiço (local onde fica localizado o responsável pela operação e/ou comandante do navio por ocasião do lançamento de aeronaves) , e se processa, de forma sucinta, da seguinte forma:

- *primeiro pronto*: é um sinal enviado pelo operador que se localiza na praça de máquinas para o operador que se encontra no convôo, informando que os reservatórios de vapor estão carregados com a pressão requerida, o freio está ligado, a válvula de exaustão está fechada, a válvula de lançamento está fechada, a tira de selagem encontra-se tracionada, a lançadeira (shuttle) e o retrator (grab) estão na posição inicial.
  
- *segundo pronto*: após serem enviados para o convôo os comandos acima citados, a comunicação é feita do convôo para a praça de máquinas da catapulta informando que o convôo está pronto para o lançamento, ou seja, o defletor de jato encontra-se levantado e o convôo está livre para o lançamento.
  
- *terceiro pronto*: é a comunicação da praça de máquinas para o convôo e para o passadiço informando que está pronto para realizar o lançamento.

A partir daí, o comando liberando a aeronave para a decolagem vem do passadiço, através do comando fire, quando então são abertas as válvulas de lançamento.

## **5 Análise das Necessidades :**

Atualmente, a sequência de operação do sistema de lançamento de aeronaves do NAEL Minas Gerais é realizado por operadores localizados no convão, praça de máquinas da catapulta e no passadiço. O sistema atual apresenta algumas deficiências como: a comunicação entre os operadores é realizada através de um sistema de telefonia, cuja fiação do mesmo percorre internamente o navio. Esta fiação está suscetível a rompimentos e a interferências proveniente do meio. Os operadores que se localizam na praça de máquinas e no convão estão submetidos a intensos barulhos externos, que podem dificultar o entendimento daquilo que está sendo comandado pelo sistema de telefonia; a válvula de enchimento dos reservatórios de vapor (flow control valve) é aberta e fechada manualmente, o que pode ter como consequência uma pressão indesejada nos reservatórios de vapor e ao mesmo tempo não fornece uma adequada segurança ao operador da válvula, já que a temperatura neste elemento é altíssima; e o sucesso do lançamento depende da qualificação dos operadores; entre outros.

Assim, o tempo necessário entre um lançamento e outro varia na faixa de 20 a 30 minutos, dependendo, basicamente, da experiência do operador. Além deste fato há também a questão da segurança do pessoal e do material de bordo.

Notoriamente este tempo é deveras elevado, tendo em vista a atual conjuntura bélica do mundo, onde são desenvolvidos equipamentos com uma extrema velocidade e capacidade de destruição. Para se citar um exemplo, um porta-aviões americano é capaz de lançar aviões num intervalo que varia de 2 a 5 minutos.

Com o intuito de se reduzir o intervalo de lançamento entre aeronaves e aumentar o nível de segurança do pessoal envolvido no lançamento, será proposto o controle do sistema de lançamento de aeronaves.

## **6 Definição das Funções de Controle :**

Devido a sua característica sequencial e repetitiva para a realização do processo de lançamento, a estratégia de controle estará baseada na execução de um programa que define a evolução dos processos. Além disto, o sistema em questão é assíncrono, ou seja, deve satisfazer as condições da evolução do processo. Outro fator a mencionar é que a evolução de alguns sub-sistemas não depende de outros sub-sistemas, o que caracteriza o paralelismo entre os mesmos. Como o processo possui características assíncronas e independência entre os sub-sistemas, pode-se considerar que o processo como um todo é eminentemente um sistema a eventos discretos (SED).

### **6.1 Os Tipos de Controladores :**

O sistema de lançamento de aeronaves do NAEL Minas Gerais possui as seguintes características:

- 1- sequência pré-determinada de passos;
- 2- constante de tempo de cada elemento do objeto de controle insignificantes para o processo;
- 3- operações padronizadas;

Assim, fica explícito que trata-se de um processo sequencial. Agora deve-se determinar a escolha de um controlador para automatizar o processo. Há vários tipos de controladores que podem ser implementados, entre eles:

- a) computadores;
- b) circuitos integrados;
- c) controlador programável;
- d) controlador por reles de contato.

Deve-se analisar qual é o controlador que reúne melhores características para exercer a função de controle:

- a) computadores: este tipo de controlador é o que se encontra em maior variedade, que vão desde microcomputadores até os atuais PC com alta capacidade de processamento. O controle realizados por estes é realizado através de programas, com amostragem de sinais do objeto de controle. Para tal são necessários alguns periféricos para realizar a comunicação do objeto



de controle com o computador. Geralmente há uma incompatibilidade entre o sinal do computador com o objeto de controle, necessitando de circuitos para torná-los compatíveis.

- b) circuitos integrados: É bem parecido, em termo de conceito, com o controlador por relês de contato, a diferença é que são utilizados CIs com funções lógicas para realizar o controle;
- c) controladores programáveis: é bem semelhante ao computador. Sua implementação é através de software, mas se caracteriza-se por ser um computador dedicado.
- d) controlador por relês de contato: os sinais são gerados por relês que fecham o contato permitindo o fluxo de energia. O controle é realizado pela combinação e seqüência de contatos. O inconveniente deste tipo de controlador é que, havendo estes contatos, os relês vão se desgastando (efeito Joule) e com o tempo apresentam mal contatos, tendo assim uma vida curta de utilização.

É mostrado a seguir uma tabela comparativa entre os controladores disponíveis:

<b>Requisitos</b>	<b>RELÊS</b>	<b>CLP</b>	<b>CI</b>	<b>COMPUTADORES</b>
tempo de vida	dependente do número de chaveamento (operação)	longo	longo	longo
confiabilidade	baixa	alta	alta	alta
manutenção	inexistentes	existente	inexistente	existente
modificação do controle	difícil	fácil	difícil	fácil
implementação do hardware (projeto)	depende do projeto	padronizado	depende do projeto	padronizado
implementação do hardware (alteração)	realizável pelo usuário	realizável pelo usuário	realizável pelo usuário	impossível pelo usuário

Tabela 1 – Comparação entre os diversos tipos de controladores

Analisando as características de cada controlador, e comparando com o sistema a ser controlado, tem-se:

- os CIs cumprem os quesitos de confiabilidade, sendo difícil a alteração do controle, pois, uma vez projetado o controle com CI, alterá-lo significa que deve-se alterar o circuito que implementa a lógica do controle;
- os relês, pelo fato de se desgastarem pelo número de contatos realizados, devem ser utilizados para controles que possuem pouca frequência de utilização; além de possuírem uma baixa confiabilidade, o que é requisito muito importante para um sistema controlado, ainda mais para o sistema em questão;
- os CLPs superam os relês nos quesitos confiabilidade e de tempo de vida, mas em contrapartida possuem dificuldades de manutenção;
- os computadores são semelhantes aos CLPs, mas a implementação do hardware (alteração e projeto) estão indisponíveis ao usuário;

Observando acima os tipos de controladores citados, descartam-se os CIs, pelo fato de que cada sistema teria uma lógica de controle, o que implica um circuito para cada lógica adotada. Assim não se atingiria uma produção de escala industrial, e consequentemente, uma grande dificuldade de obtenção.

Os relês apresentam facilidade de manutenção e baixos custos, mas o fator confiabilidade fica a desejar, uma vez que apresentam falhas para sistemas com grande frequência de operação. Assim pode-se descartar este tipo de controle.

Os CLPs por serem dedicados e trabalhando em tempo real, atingem características superiores ao computador genérico. Aliado a este fato, os CLPs apresentam facilidades de programação, boa confiabilidade e foram desenvolvidos para superar os relês.

Para tal será escolhido o CLP como controlador do sistema.

## **6.2 Modelo Estrutural :**

Antes de se partir para o sistema de controle propriamente dito, deve-se conhecer bem a estrutura do modelo, como ocorre o fluxo de informação desde o operador até o objeto de controle.

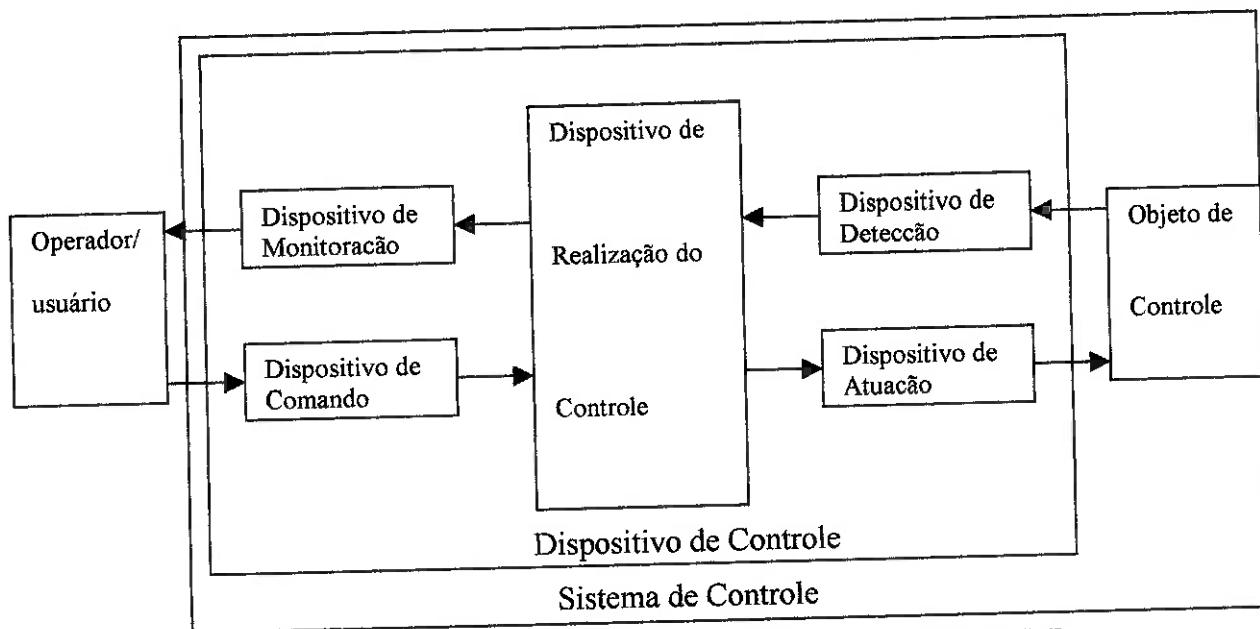
Basicamente, o sistema é composto pelos seguintes componentes:

- a) usuário/operador;
- b) dispositivo de controle;
- c) objeto de controle;

O dispositivo de controle se divide em:

- dispositivo de comando;
- dispositivo de realização;
- dispositivo de atuação;
- dispositivo de detecção;
- dispositivo de monitoração.

Para que “a aplicação de uma ação pré-planejada para que aquilo que se considera objeto de controle atinja certos objetivos” seja satisfeita em um controle SED devem-se realizar as execuções de operações conforme um procedimento preestabelecido. Assim o diagrama conceitual básico do sistema de controle de SED é mostrado a seguir:



Esquema 4- Diagrama conceitual básico do sistema de controle de SED.

Os dispositivos utilizados em controle de SED são do tipo:

- dispositivo de comando: botoeiras, chaves rotativas, chaves selecionadoras, etc.;
- dispositivo de atuação: válvulas solenóides, contactores, servo-motores, etc.;
- dispositivo de detecção: chaves-limites, potenciômetros, chaves-fotoelétricas, termostatos, tacômetros, revólveres, etc.;
- dispositivo de monitoração: lâmpadas sinalizadoras, buzinas, alarmes, buzinas, registradores, etc.;
- dispositivo de realização: circuitos elétricos, contadores, CPs, etc.

Fazendo um paralelo com os dispositivos existentes no sistema de lançamento de aeronaves, os seguintes dispositivos são utilizados:

1. dispositivo de comando: é composto por um dial que fica situado na praça de máquinas da catapulta, conforme figura 4.

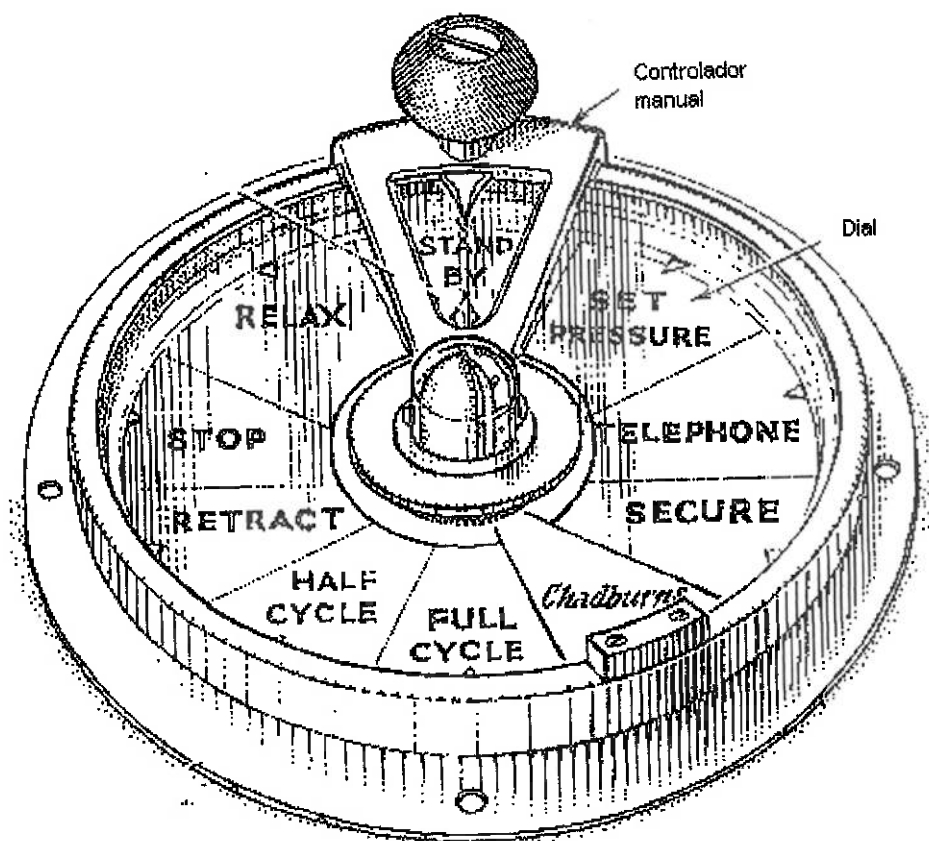


Figura 4 – Controlador manual. Atualmente no navio.

2. dispositivo de atuação: são o motor de tracionamento da tira de selagem, pistões de elevação do defletor de jatos (conforme esboçado no esquema 3), as válvulas de lançamento, válvula de enchimento dos reservatórios (flow control valve), o motor responsável pelo avanço e recuo do retrator e o freio de fim de curso.
3. dispositivo de detecção: como o navio é de arquitetura antiga, alguns detetores são bastante primários, como é o detetor de posicionamento do retrator. Figura 5.

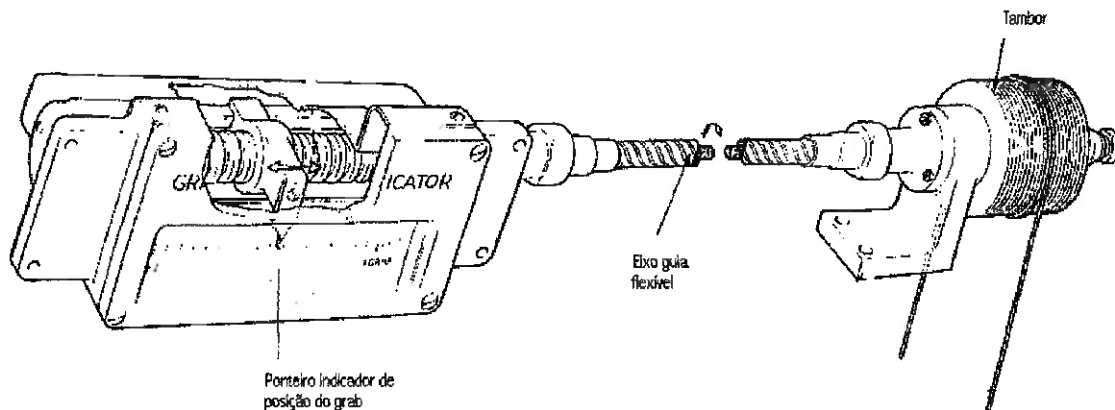


Figura 5 – Exemplo de sensor existente atualmente.

Já os indicadores de pressão, tração das tiras (são basicamente strain gage), freio ativado, estado das válvulas de lançamento e etc., são monitorados pelo painel localizado na praça de máquinas da catapulta, conforme figura 6.

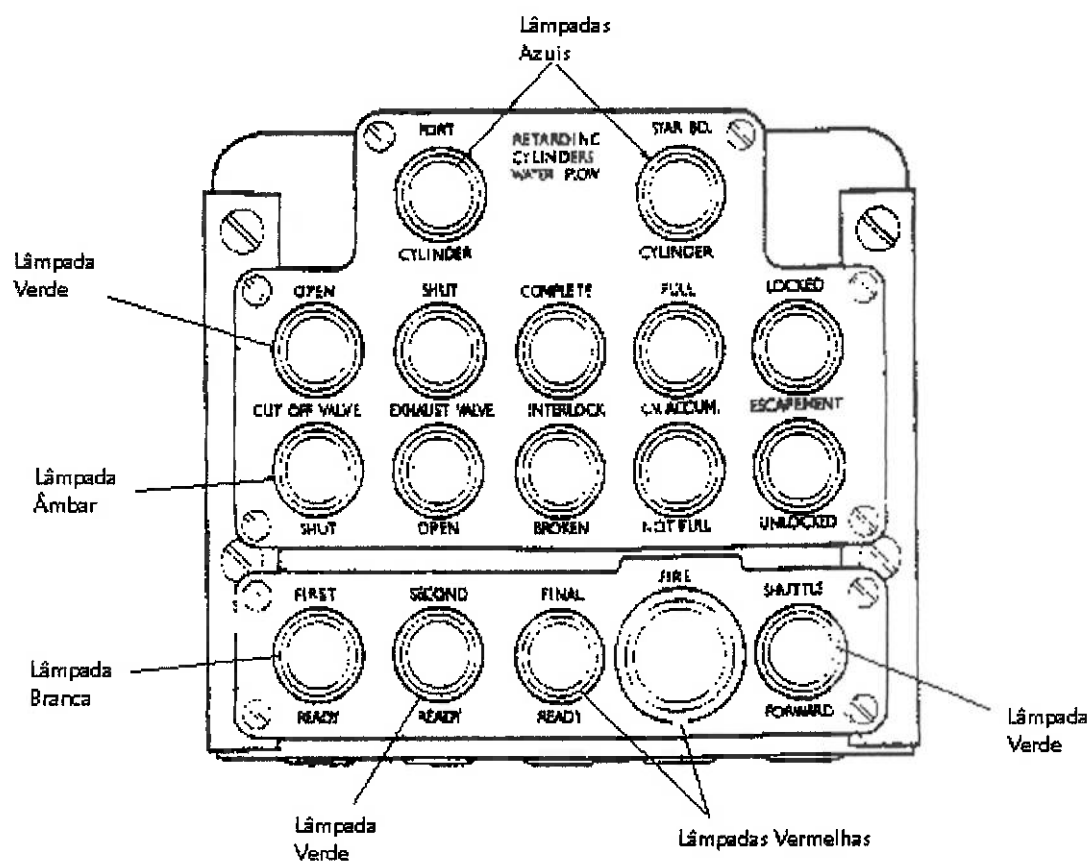


Figura 6 – Painel de monitoração da praça de máquinas da catapulta.

## 7 Definição do Fluxo das Funções de Controle :

Para se desenvolver um controle de SED, é importante desenvolver técnica para a modelagem da evolução do processo e de como o controle deve interagir com o objeto de controle, o qual deve apresentar um número finito de estados. Para representar o fluxo de controle são utilizados fluxograma, carta de tempo, representação em PFS/MFG, entre outros.

No fluxograma, pode-se visualizar o controle, condições, etc., mas quando ocorrem processamentos paralelos, característica presente em um controle de SED, são difíceis de serem representados. Na carta de tempos, a evolução do objeto de controle e a evolução do controle podem ser representadas, mas uma vez sendo representado o fluxo de controle por este método, fica difícil de compreender a estruturação do controle por parte de quem vai analisar o fluxo e que não seja o próprio projetista. O PFS/MFG permite uma representação da evolução do processo passo a passo, e podem ser representados desde uma visão macro (PFS) até uma visão mais detalhada (MFG), evoluindo de um para outro de forma gradativa. Além disso, este método permite visualizar os sinais de controle com a planta (sinais para os dispositivos de monitoração ou atuação e sinais oriundos dos dispositivos de comando ou detecção). Baseados nestes fatos, será utilizada a metodologia PFS/MFG ("Production Flow Schema"/"Mark Flow Graph") para representar os passos do processo.

### 7.1 *Aplicação da Metodologia PFS/MFG no Sistema de Lançamento de Aeronaves do NAeL Minas Gerais:*

A evolução do processo será apresentada de forma gradual, partindo-se de uma visão global (macroscópica- PFS) até atingir uma visão detalhada do processo (MFG). A descrição do processo em uma única etapa é bastante complexa e arriscado, uma vez que a possibilidade de se cometer erros é muito grande. Aliado a isto está o fato de que não fica claro para outras pessoas, a não ser o próprio projetista do controle, compreender a evolução do processo e o próprio sistema de controle.

A visão global será inicialmente apresentado em PFS, o qual é composto pelos seguintes elementos:

- Elementos correspondentes a atividades :

[ ATIVIDADE ]

- Elementos correspondentes a distribuição:

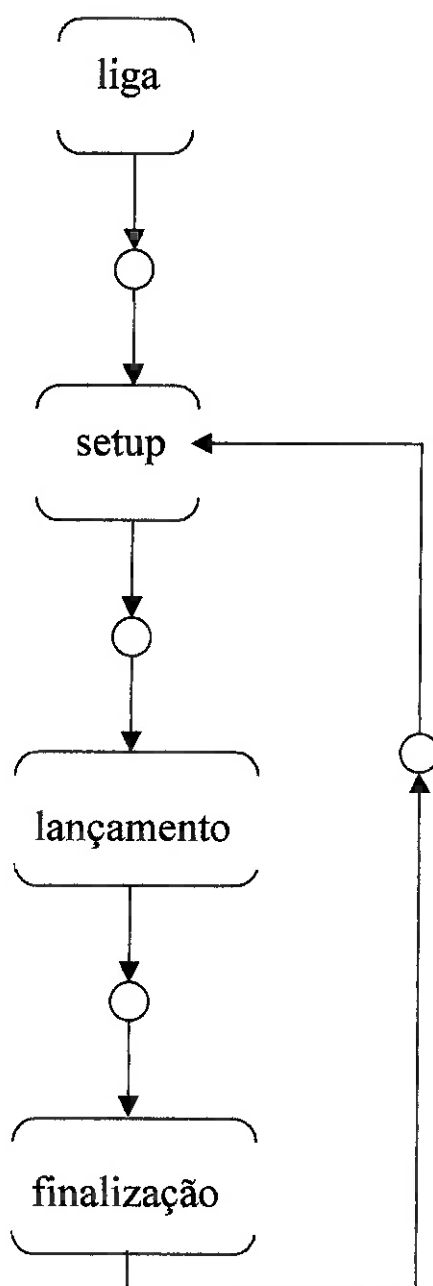


- Arcos:



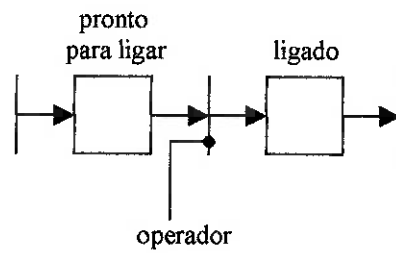
A medida em que vão se refinando as atividades e sub-atividades, vai se detalhando mais o processo e assim prossegue até atingir a representação em MFG, onde aí irão aparecer condições de controle. O refinamento das atividades devem ser realizados de forma clara e correta, pois o modelo funcional, que é o MFG, depende diretamente deste detalhamento.

Nos modelos MFG, que servirá de orientação para o programa a ser executado, são mostrados apenas o controle e os sinais externos que serão enviados para planta (objeto de controle) e os sinais oriundos dos sensores (dispositivo de detecção), bem como sinais de monitoramento e comando.

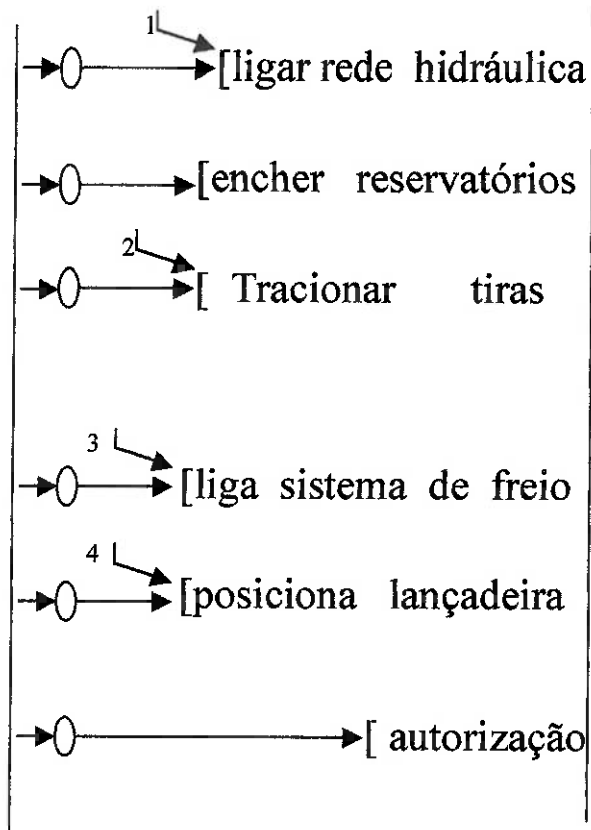




### 7.1.1 [ ligar ]

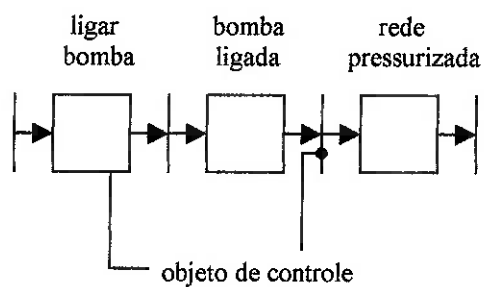


### 7.1.2 [ setup ]

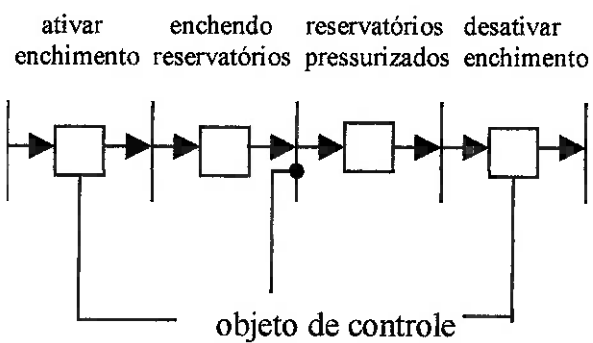


Antes de cada transição dos itens do setup, existem arcos oriundos da reinicialização . Para cada setup há uma respectiva reinicialização. A numeração indicada acima, possui a sua correspondente indicado no item 7.1.4.

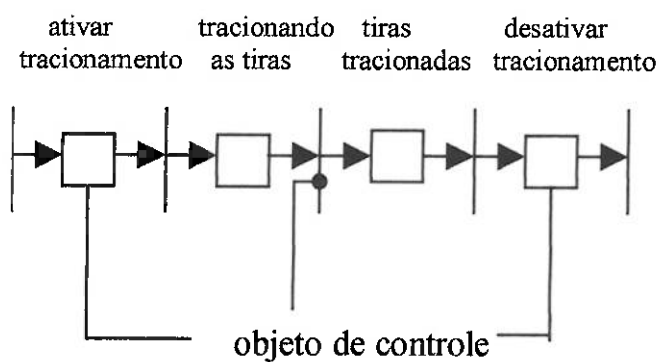
### 7.1.2.1 [ ligar rede hidráulica ]



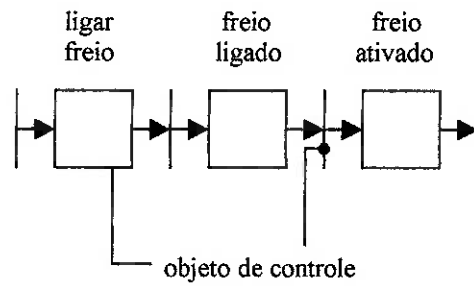
### 7.1.2.2 [ encher reservatórios ]



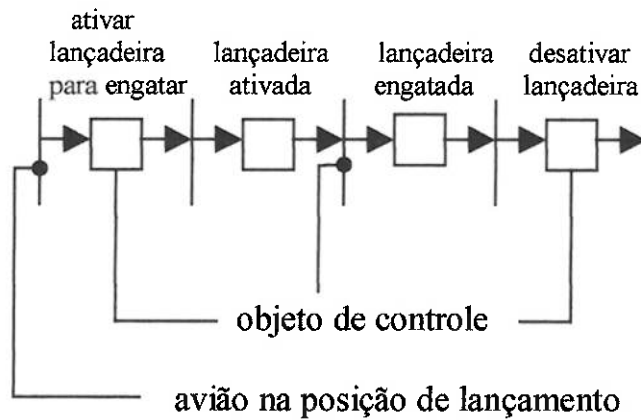
### 7.1.2.3 [ tracionar tiras ]



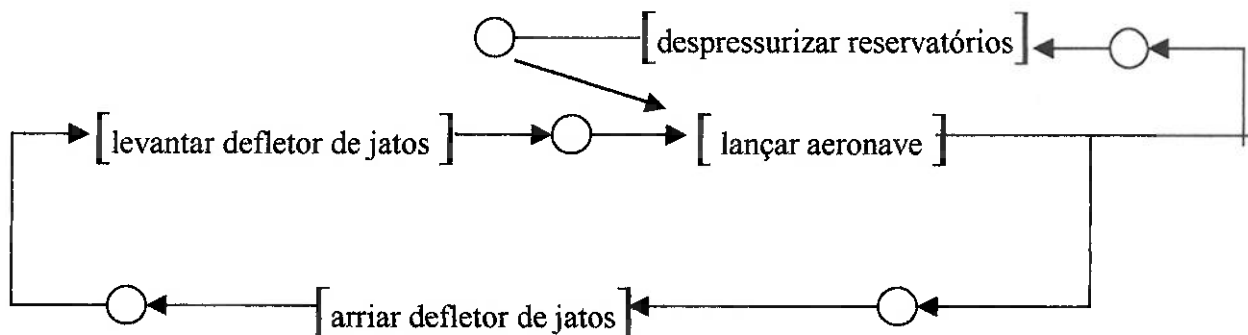
#### 7.1.2.4 [ ligar sistema de freio ]



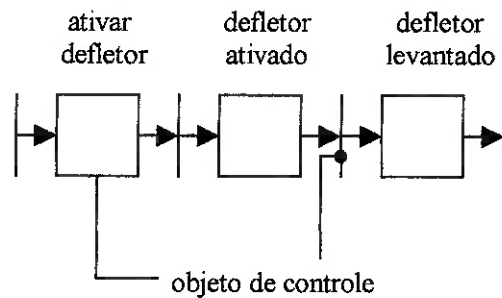
#### 7.1.2.5 [ posiciona lançadeira ]



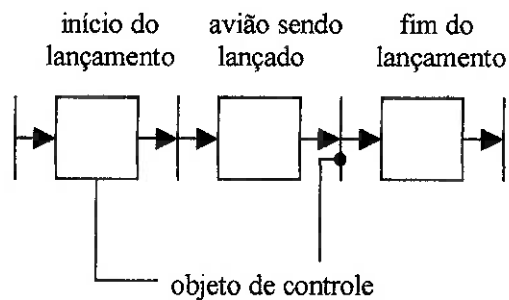
#### 7.1.3 [ lançamento ]



### 7.1.3.1 [levantar defletor de jatos]

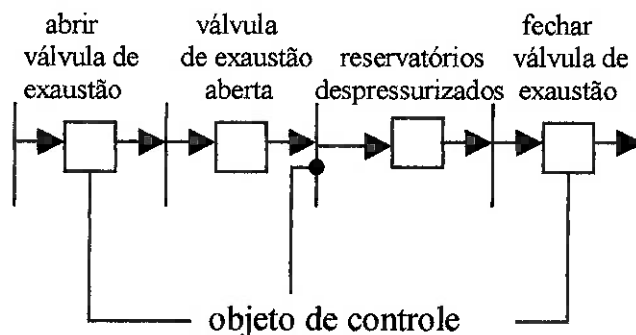


### 7.1.3.2 [lançar aeronave]

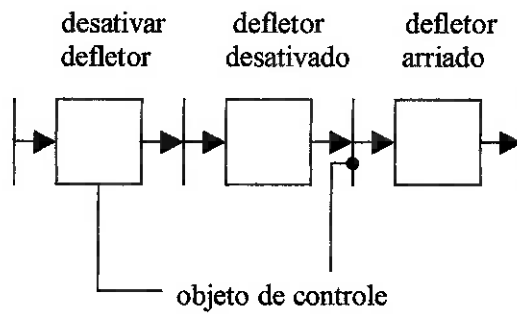


Entende-se por início de lançamento a abertura da válvula de lançamento. Por sua vez fim do lançamento significa a parada total da lançadeira.

### 7.1.3.3 [despressurizar reservatórios]



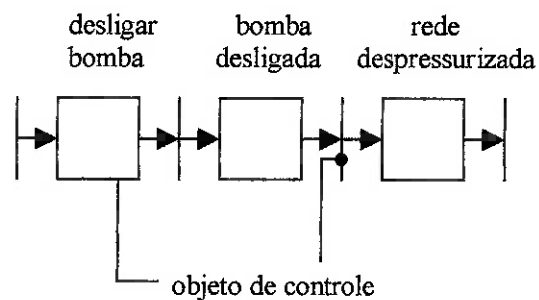
#### 7.1.3.4 [arriar defletor de jatos]



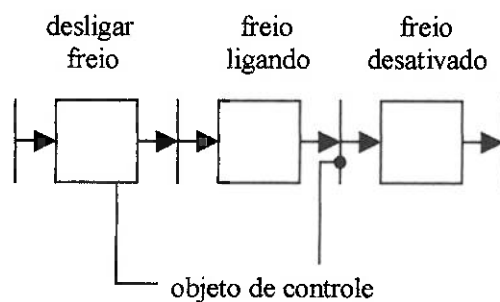
#### 7.1.4 [finalização]

desligar rede hidráulica	]	1
desligar freio	]	2
destracionar tiras	]	3
reinicializar lançadeira	]	4

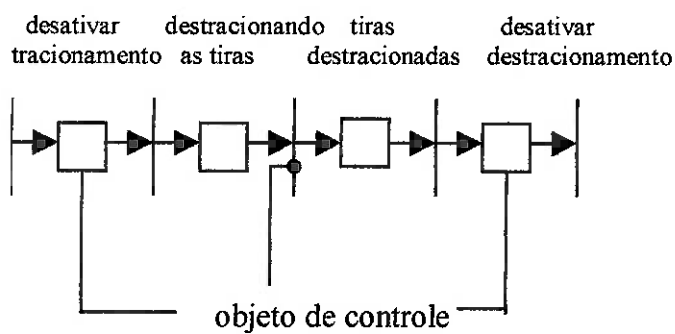
#### 7.1.4.1 [ desligar rede hidráulica ]



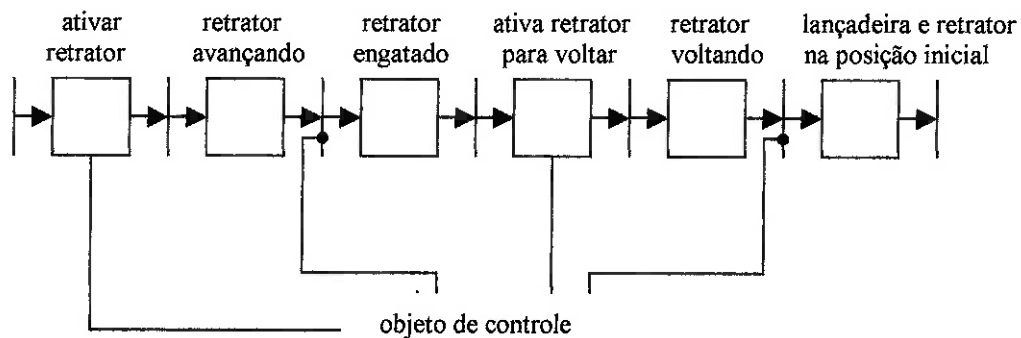
#### 7.1.4.2 [ desligar freio ]



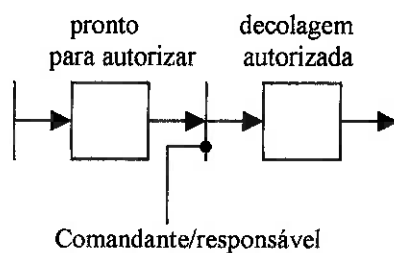
#### 7.1.4.3 [ destracionar tiras ]



#### 7.1.4.4 [ reinicializar lançadeira ]



A autorização será dada pelo comandante do navio ou do responsável pela operação. Assim a modelagem da autorização será:



## 8 Objeto de Controle:

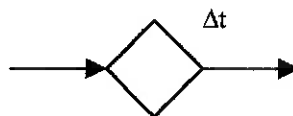
Definida a modelagem do controle, deve-se modelar o objeto de controle, ou seja, a planta. Antes de tal modelagem, é importante ressaltar os elementos do objeto de controle que serão modelados:

- a) reservatórios de pressão;
- b) tira de tração;
- c) defletor de jatos;
- d) lançadeira (shuttle);
- e) retrator (grab);
- f) rede hidráulica;
- g) freio; e

Para a modelagem destes elementos, será utilizada a mesma metodologia, qual seja, PFS/MFG. Assim, cada elemento terá a seguinte configuração. Nota-se que nesta modelagem entra o conceito de tempo, ou seja, entra a dinâmica de cada elemento. Esta dinâmica indica o tempo que cada componente vai levar até atingir o seu estado seguinte.

Na metodologia PFS/MFG, esta dinâmica é representada por um box temporizado, isto é, quando uma marca surge neste box, a transição seguinte só fica disparável após decorrer um certo intervalo de tempo  $\Delta t$ .

A representação deste tipo de box é da seguinte maneira:

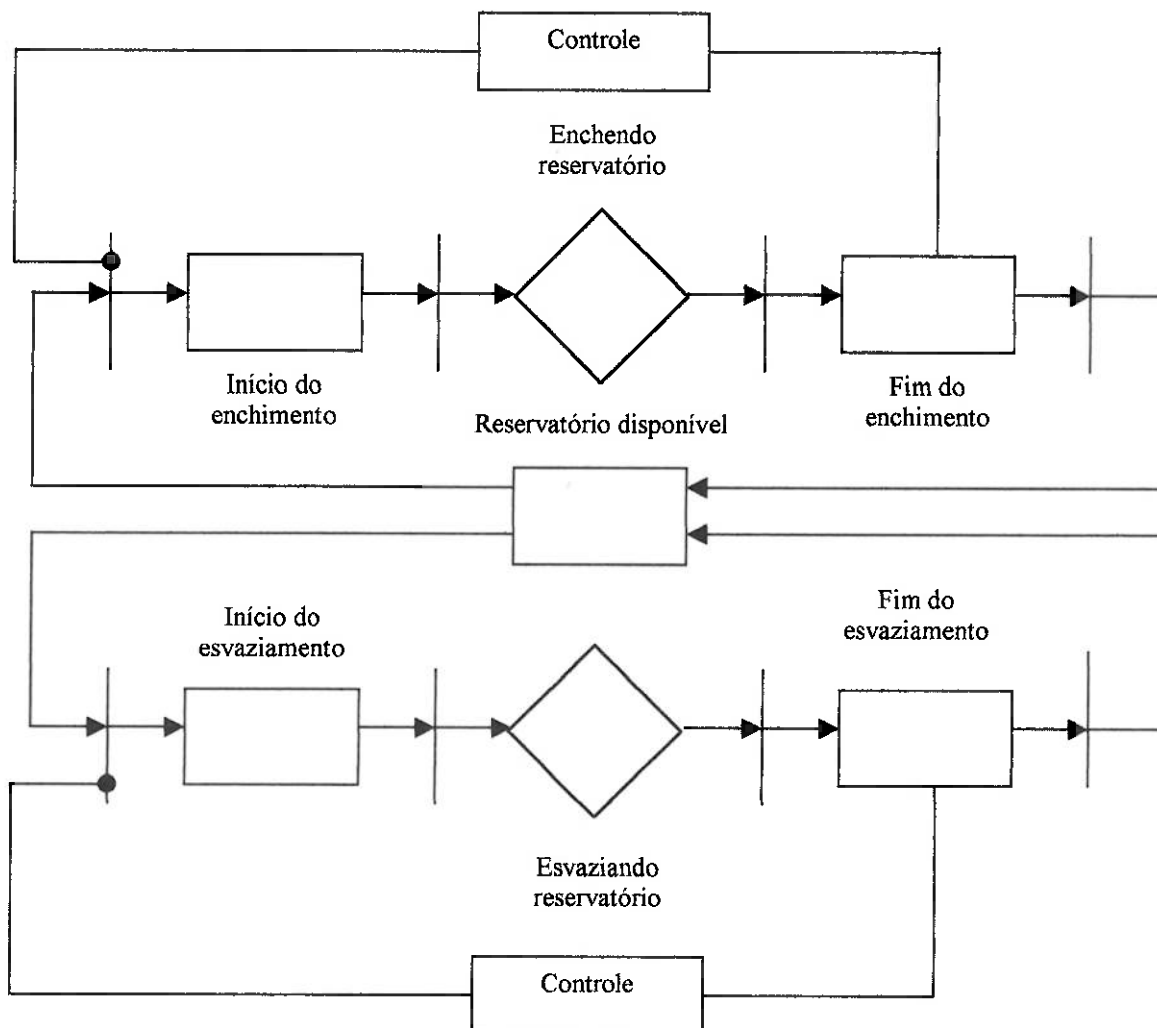


Com este conceito introduzido, serão representados os elementos do objeto de controle.



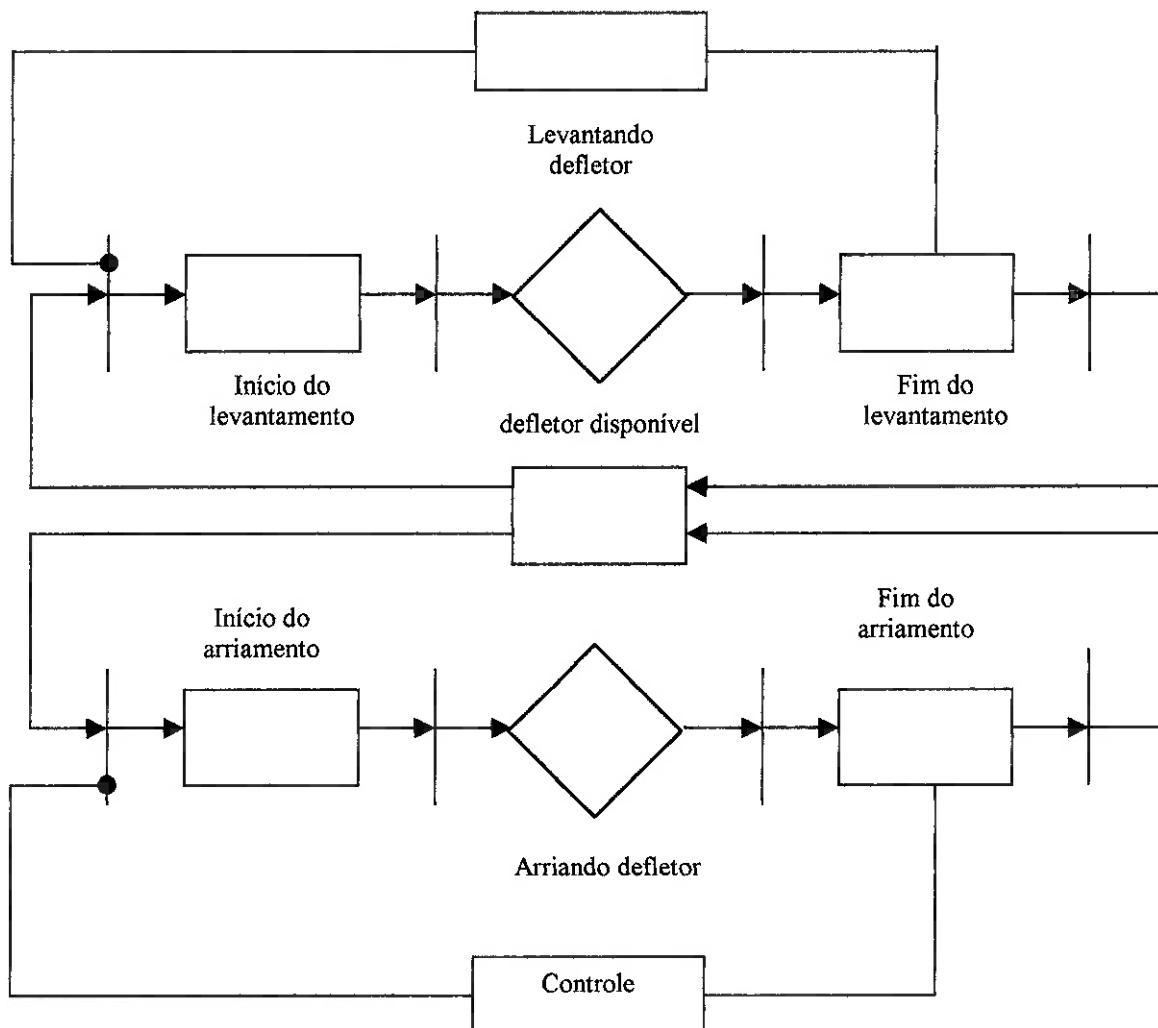
### 8.1 Reservatório de Pressão:

Como já descrito acima, este componente é o que armazena energia do vapor superaquecido para o lançamento.



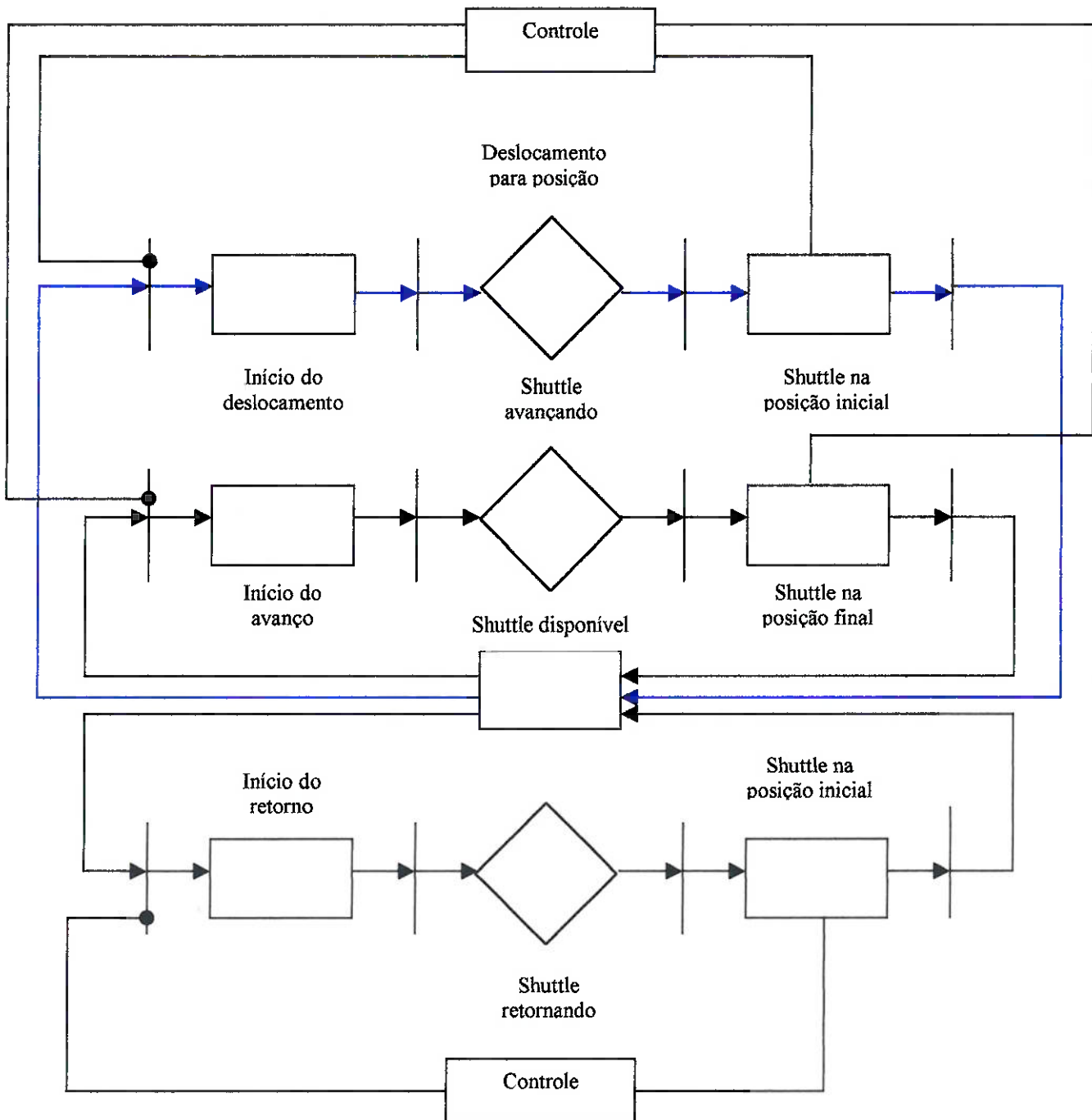


### 8.3 Defletor de jatos:



Neste exemplo, quando ocorre o fim do içamento do defletor, o desvio do fluxo de óleo é dirigido para o tanque de forma puramente mecânica, ou seja, o óleo vai para tanque quando a válvula de sequência é aberta quando se atinge a pressão que é “setada” na válvula. Logo, não há necessidade do controle enviar o sinal para a planta para enviar o fluxo para tanque.

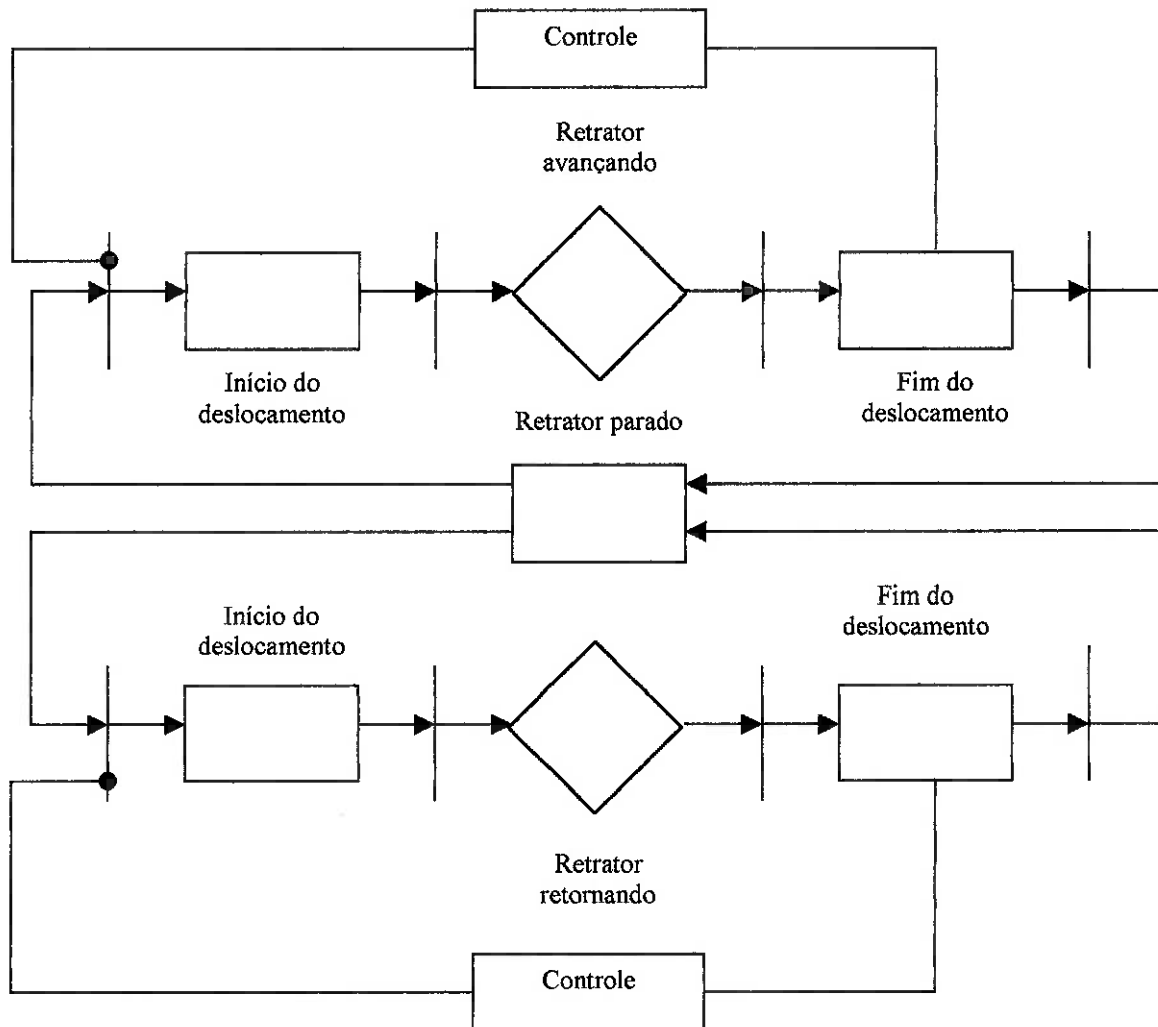
#### 8.4 Lançadeira:



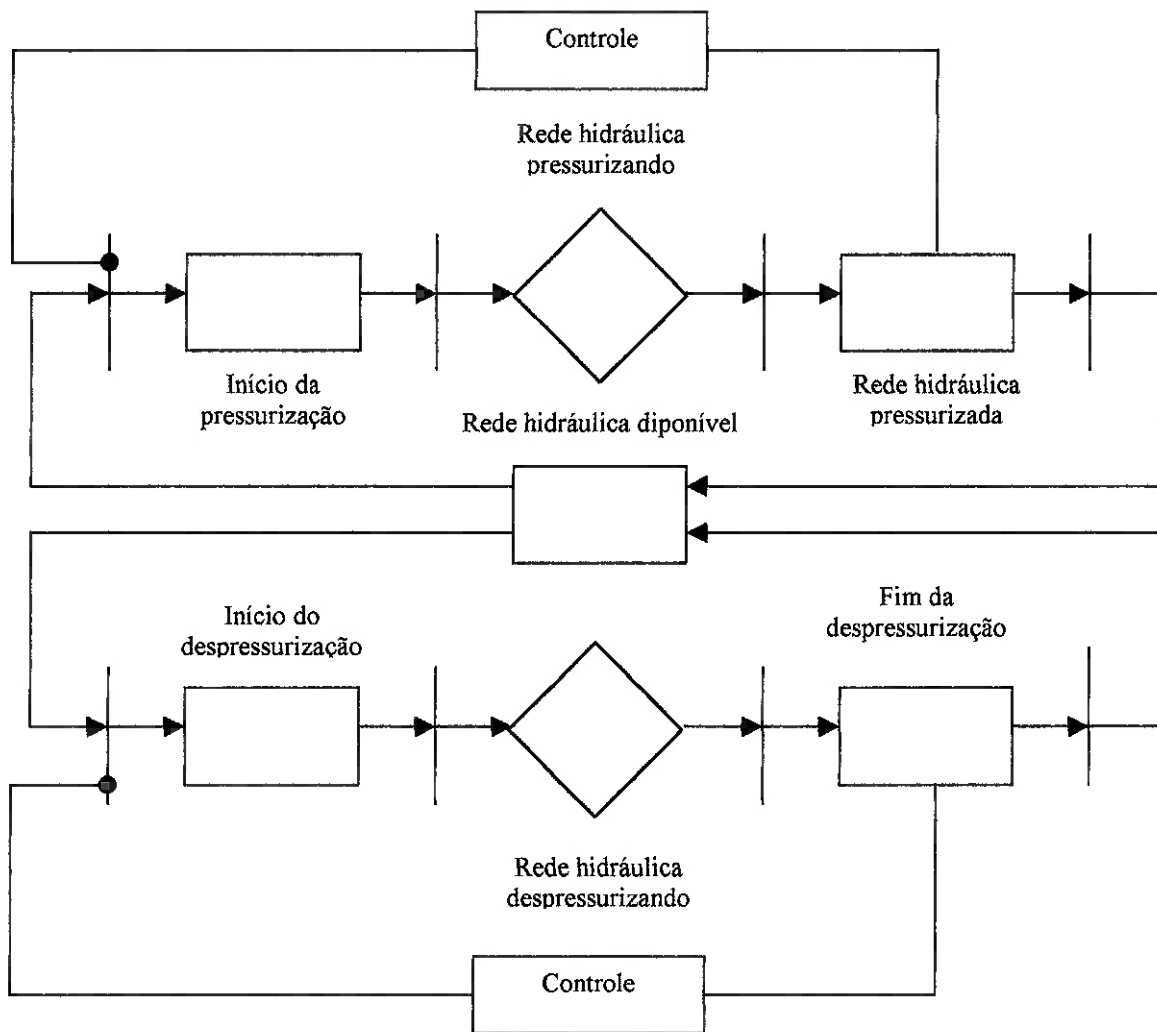
Nota-se que este componente do objeto de controle apresenta uma modelagem um pouco diferente dos demais. Isto ocorre, porque a lançadeira deve ser inicializada na posição inicial (início da pista de decolagem) onde a aeronave será encaixada a mesma. Esta inicialização é garantida pelo caminho de arcos de cor azul.

### 8.5 Retrator:

Este elemento é o responsável pelo retorno da lançadeira. Assim pode-se concluir que o ramo que representa o retorno da lançadeira coincide com o retorno do retrator, uma vez que estes estão encaixados.

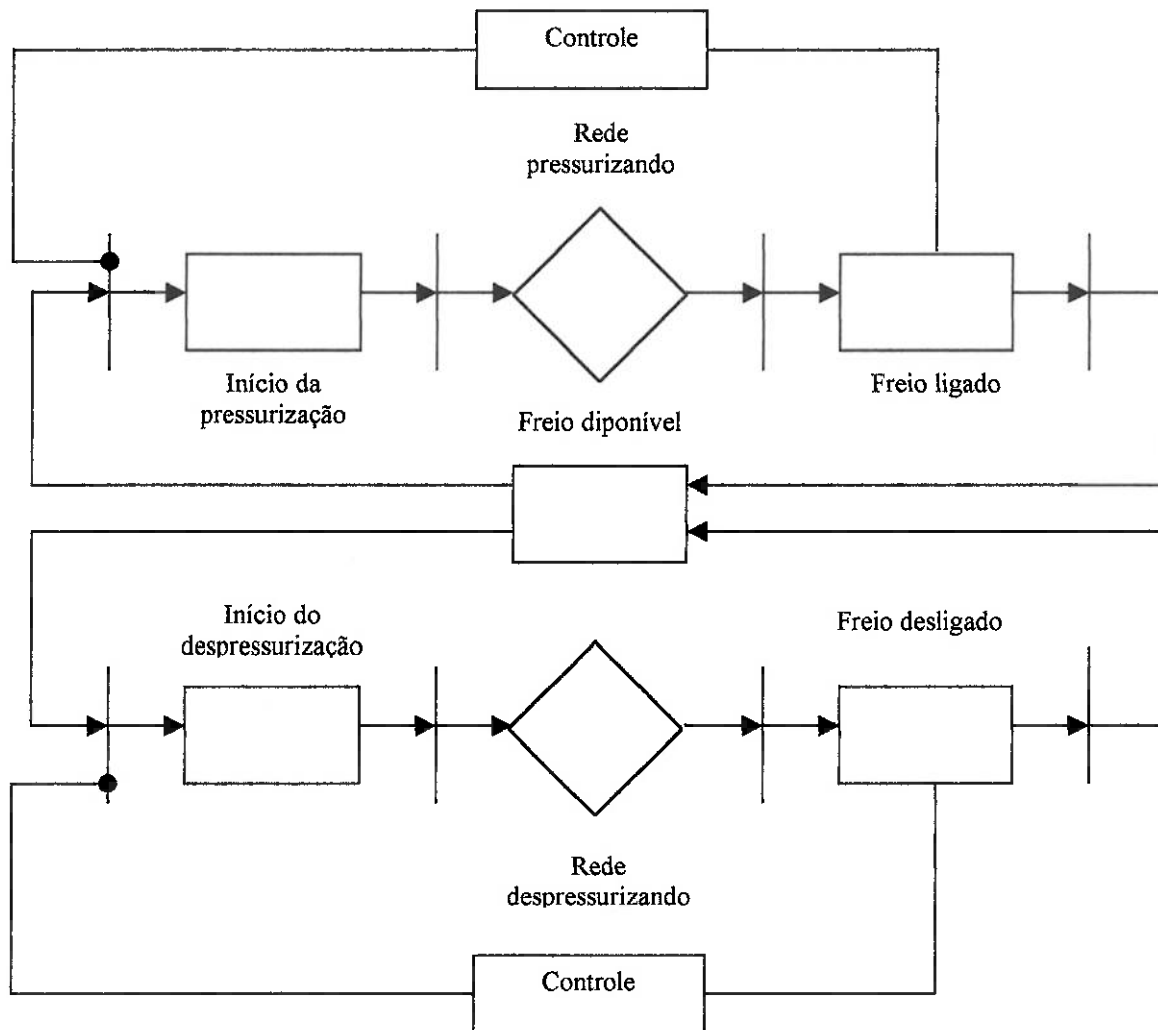


## 8.6 Rede Hidráulica:



A dinâmica aqui representada não deve ser desprezada, ou seja, não deve ser considerado como uma transição instantânea. Isso se deve ao fato de que a rede é extensa, e além disto, o tempo de pressurização da rede (esta pressão é parâmetro de entrada) depende da capacidade de vazão da bomba instalada, que para este modelo, a priori, pode ser qualquer uma.

## 8.7 Sistema de Freio:



Para este elemento, vale o mesmo comentário feito para a rede hidráulica.

Nota-se que as marcas podem percorrer nos elementos do objeto de controle, pelo menos, dois caminhos diferentes. A determinação do caminho a ser percorrido vem do controlador, pois observa-se que os gates são habilitados pelo controle, ou seja, o controle deve garantir que as duas transições não sejam disparadas simultaneamente para evitar conflito de saída.

Para se determinar o comportamento dinâmico de cada box temporizado, com o objetivo de se realizar a simulação do sistema controlado, deve-se modelar cada elemento do objeto de controle, sendo que para cada elemento existem pelo menos dois blocos temporizados. Assim, a seguir serão feitas as modelagens para cada um dos blocos temporizados.

## 9 Modelagem Dinâmica do Objeto de Controle

Para validar o sistema de controle, se faz necessário modelar a planta como um todo, uma vez que não é possível validar o controlador na planta real. Então se faz necessário particionar o objeto de controle, uma vez que cada um dos elementos do objeto de controle possui a sua particular dinâmica, e, posteriormente, modelar um a um.

Esta modelagem se faz importante para se analisar o desempenho do sistema como um todo e, de acordo com a alteração dos parâmetros de cada elemento do objeto, ter-se-á uma estimativa bem aproximada das consequências desta alteração. Portanto, pode-se realizar varias simulações com o propósito de determinar a combinação ótima de parâmetros, sem que seja necessária a construção de modelos, reduzindo o custo de uma eventual alteração da planta real.

Analisando a modelagem MFG para o objeto de controle, tem-se que este se divide, basicamente em:

- a) reservatórios de vapor;
- b) tiras de selagem;
- c) defletor de jatos;
- d) rede hidráulica;
- e) sistema de freio;
- f) retrator;
- g) lançadeira.

### 9.1 *Reservatórios de Vapor:*

Como já mencionado anteriormente, os reservatórios de vapor são alimentados com vapor superaquecido oriundo da caldeira (steam supply). Este vapor é comunicado através da válvula “flow control valve” conforme figura a seguir.



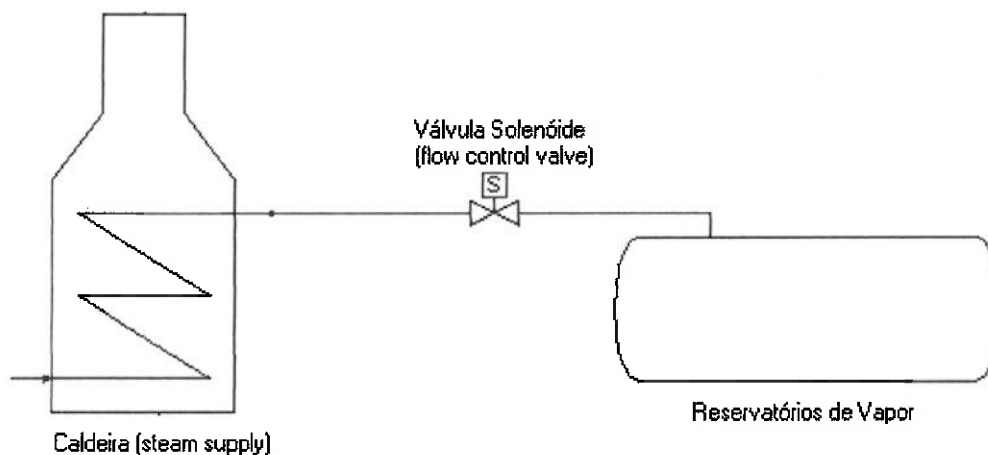


Figura 7 – Esquema de alimentação dos reservatórios de vapor.

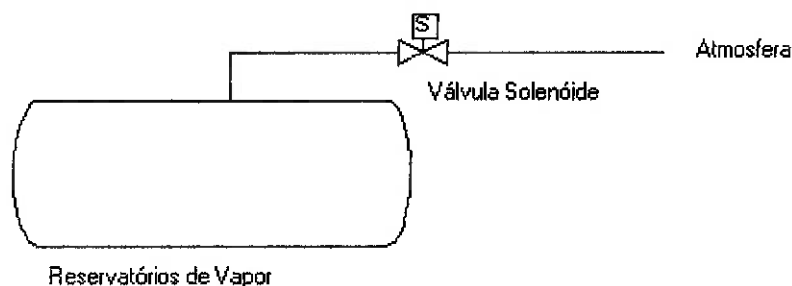


Figura 8 – Esquema de descarga do vapor para a atmosfera.

Nos esquemas acima, quando o solenóide de um dos lados da válvula é energizado, a válvula é comutada e permite a passagem do vapor para os reservatórios ou para a atmosfera, quando o solenóide energizado é do lado oposto, a passagem de vapor é bloqueada.

Algumas considerações para a modelagem da dinâmica do enchimento/esvaziamento dos reservatórios devem ser enumeradas:

- o escoamento será considerado unidimensional;
- o processo será considerado adiabático, pois devido a elevada velocidade do vapor no duto, não haveria tempo para uma determinada partícula de vapor trocar calor com as paredes do duto;
- o processo será considerado reversível, isto é, isentrópico;
- devido ao fato do vapor se encontrar superaquecido, será feita uma aproximação para gás perfeito, que neste caso será o ar;

- e) notadamente, a válvula é uma restrição à passagem de vapor, mesmo quando totalmente aberta. Assim a mesma pode ser modelada como um bocal (restrição à passagem de vapor).

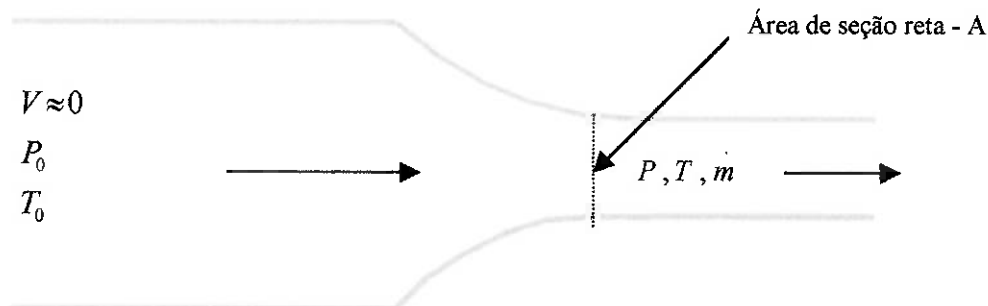


Figura 9 – Esquema de escoamento do fluido através de um bocal.

Considerando inicialmente um bocal conforme a figura 9, as condições à montante são admitidas constantes, uma vez que o estado do vapor oriundo da caldeira não terá sua pressão e temperatura alterados durante o processo de enchimento dos reservatórios de vapor.

Pode-se concluir, a partir da primeira lei da termodinâmica, que para um processo em regime permanente que:

$$h + \frac{V^2}{2} = h_0 \quad (1)$$

Para um gás perfeito, que apresenta calor específico constante, a Eq. 1 pode ser escrita na seguinte forma:

$$V^2 = 2C_{p0}(T_0 - T) = 2 \frac{kRT}{k-1} \left( \frac{T_0}{T} - 1 \right) \quad (2)$$

Para um processo isoentrópico,

$$\left( \frac{T_0}{T} \right)^{\frac{k}{k-1}} = \frac{P_0}{P} \quad \left( \frac{T_0}{T} \right)^{\frac{1}{k-1}} = \frac{\rho_0}{\rho}$$

Portanto:

$$\frac{P_0}{P} = \left( \frac{\rho_0}{\rho} \right)^k = \left( \frac{T_0}{T} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (3)$$

Onde  $k$  é a relação entre o calor específico a pressão constante ( $c_{p0}$ ) e o calor específico a volume constante ( $c_{v0}$ ). Também é conhecido que:

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot V \quad (4)$$

Na análise da vazão mássica acima, é necessário ressaltar a importância do número de Mach neste escoamento. O número de Mach é dado por:

$$M = \frac{V}{c} \quad (5)$$

onde  $V$  é a velocidade do escoamento e  $c$  é a velocidade do som no fluido no estado em que ele se encontra. Quando  $M > 1$  o escoamento é dito supersônico, quando  $M < 1$  o escoamento é dito subsônico e quando  $M=1$  o escoamento é sônico. O número de Mach é muito importante na análise da dinâmica de enchimento/esvaziamento dos reservatórios de vapor, pois quando o número de Mach =1 tem-se:

$$\frac{T^*}{T_0} = \frac{2}{k+1} \quad (6)$$

$$\frac{P^*}{P_0} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)} \quad (7)$$

$$\frac{\rho^*}{\rho_0} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{1/(k-1)} \quad (8)$$

Neste caso as propriedades são chamadas de temperatura crítica, pressão crítica e massa específica crítica. Então as relações dadas pelas Eqs. 6, 7 e 8 são chamadas de relação crítica de temperatura, pressão e massa específica. Para cada estado do gás a montante do bocal, ter-se-ão temperatura, pressão e massa específica críticas diferentes, ou seja, estes valores de pressão, temperatura e massa específica críticas dependerão única e exclusivamente do estado do gás à montante. Estes valores de propriedades críticas serão muito importante na análise da dinâmica do enchimento dos reservatórios de vapor.

Para a determinação da vazão mássica, Eq. 4, parte-se da equação Eq.3:

$$\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^k = \frac{P}{P_0}$$

$$\rho = \left(\frac{P}{P_0}\right)^{1/k} \rho_0 \quad (9)$$

Partindo da equação universal dos gases,

$$\rho_0 = \frac{P_0}{RT} \quad (10)$$

As Eq. 9 e Eq. 10 fornecem:

$$\rho = \frac{P_0}{RT} \left(\frac{P}{P_0}\right)^{1/k} \quad (11)$$

As Eq. 2 e Eq. 11 em Eq. 4, tem-se:

$$\dot{m} = AP_0 \left\{ \frac{2k}{(k-1)RT_0} \left[ \left(\frac{P}{P_0}\right)^{2/k} - \left(\frac{P}{P_0}\right)^{k+1/k} \right] \right\}^{1/2} \quad (12)$$

Dependendo do número de Mach (supondo não haver alteração no estado do gás à montante), as condições à jusante permanecerão constante e, conseqüentemente, a vazão mássica é constante. A explicação mais detalhada vem a seguir:

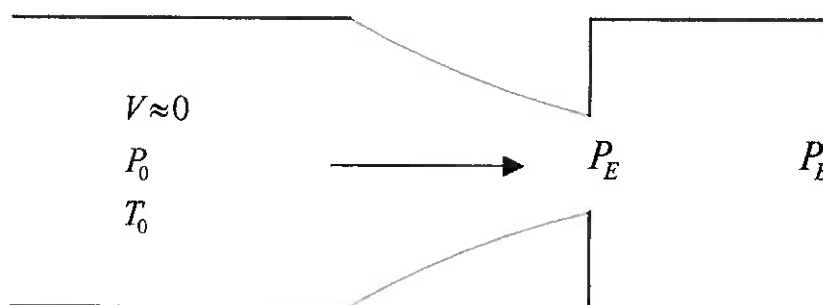


Figura 10 – Esquema de um bocal convergente.

Considere, inicialmente um bocal convergente como mostrado na figura 10. Como já comentado anteriormente, as condições à montante (vapor oriundo da caldeira) são de estagnação, são admitidas constantes. A pressão de saída do bocal é designada  $P_E$  e a pressão à jusante é  $P_B$ . Será considerado como se comportam a descarga e a pressão de saída,  $P_E/P_0$ , quando a pressão à jusante  $P_B$  é diminuída. Estes valores são indicados na figura 11.

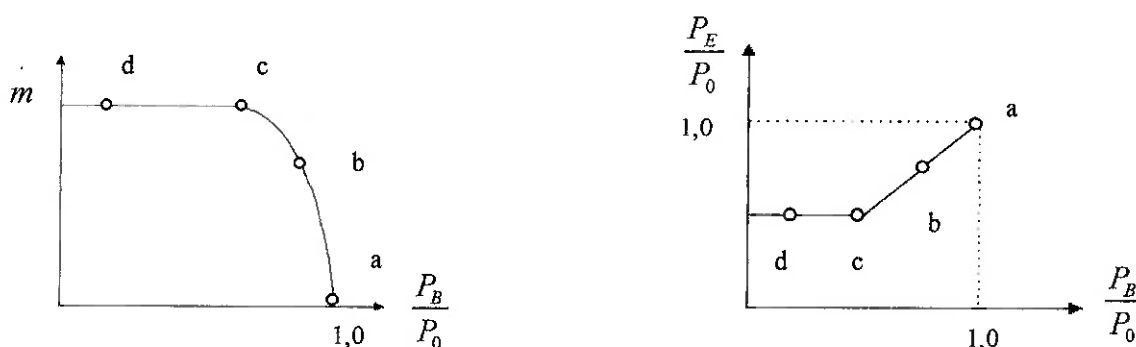


Figura 11 – Descarga e pressão de saída em função da pressão à jusante para um bocal convergente.

Quando  $P_B/P_0 = 1$  certamente não existirá escoamento e  $P_E/P_0 = 1$  como indicado pelo ponto  $a$ . Deixando a pressão à jusante,  $P_B$ , ser abaixada até o valor indicado pelo ponto  $b$ , de tal forma que  $P_B/P_0$  seja maior do que a relação de pressão

crítica. A descarga terá um certo valor e  $P_E = P_B$ . O número de Mach na saída será menor que 1. Deixa-se que a pressão à jusante se reduza até a pressão crítica indicada pelo ponto c. O número de Mach na saída agora é unitário e  $P_E = P_B$ . Quando  $P_B$  cai abaixo da pressão crítica, indicada pelo ponto d, não haverá portanto aumento na descarga, e  $P_E$  permanece constante, com valor igual ao da pressão crítica, e o número de Mach na saída é unitário. A queda de pressão de  $P_E$  a  $P_B$  ocorre externamente ao bocal. Nessas condições, diz-se que o bocal está bloqueado, o que significa que, para as condições de estagnação dadas, está passando pelo bocal a maior descarga possível. Fisicamente falando, quando um escoamento está bloqueado, nenhuma perturbação à jusante do bocal é “percebida” por um ponto localizado à montante do mesmo.

No caso dos reservatórios de vapor, durante o enchimento, o estado do gás a montante é considerado constante. Assim a vazão mássica dependerá apenas do estado do gás a jusante (vide Eq. 12) uma vez que este é alterado, pois conforme aumenta a massa de gás interna ao reservatório, o estado no interior do reservatório muda. Então no início do enchimento, a vazão mássica é a máxima, ou seja, o bocal está bloqueado e pressão interna vai aumentando. Quando o estado do vapor interno aos reservatórios ultrapassar o estado crítico (o estado crítico vai depender do estado do vapor da caldeira), a descarga começará a diminuir e a válvula solenóide se fechará quando atingir a pressão desejada.

No processo de esvaziamento, ocorre o inverso, pois agora estado do gás à jusante não se altera, pois está o gás está sendo lançado numa pressão atmosférica. Com isso, quem varia agora é a pressão  $P_0$  e não a pressão  $P_B$ , que neste caso é constante. Nesta situação, a pressão interna vai diminuindo e como a vazão mássica depende do estado do gás à montante (vide Eq. 12) a vazão mássica vai sendo alterada constantemente, isto é, para o caso de esvaziamento dos reservatórios não ocorre o fenômeno de bloqueio da vazão. O comportamento da vazão mássica em função da variação de pressão é dada no gráfico abaixo:

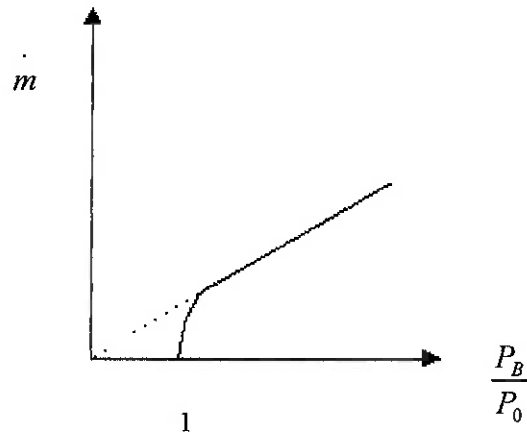


Figura 12 – Descarga de gás para um meio em que a pressão à jusante de um bocal convergente é constante.

Em última análise, a mudança do estado do vapor interno aos reservatórios de vapor, vai depender diretamente da vazão mássica que entra ou sai do reservatório, pois para um gás perfeito é conhecido que:

$$PV_{\text{volume}} = mRT \quad (13)$$

Diferenciando a Eq. 13 em relação ao tempo, tem-se:

$$\frac{dP}{dt}V_{\text{volume}} = RT\frac{dm}{dt} + mR\frac{dT}{dt} \quad (14)$$

Para o caso de esvaziamento do tanque, as equações são as mesmas, mas os sinais da vazão mássica e da variação da temperatura são negativos, o que gera um decréscimo na pressão interna.

É importante ressaltar que a velocidade do som no gás depende da temperatura do mesmo, conforme equação abaixo:

$$c = \sqrt{kRT} \quad (15)$$

Consequentemente,  $c$  também varia com o tempo.

Tal modelagem só foi possível levando-se em consideração as simplificações adotadas e citadas na página 35, pois verifica-se na prática que, em escoamentos de gases, os efeitos de compressibilidade só são importantes quando há mudanças grandes de velocidade, temperatura, etc. Na grande maioria das vezes, isto só acontece em

situações bem locais, em trecho curto do escoamento como bocais, válvulas, frente de ondas, etc. Nestes casos, o fluxo de entalpia é muito maior que a transmissão de energia na forma de calor através da pequena área da parede do envoltório disponível. Isto significa que nestes escoamentos “pontuais”, o processo isotérmico são quase impossíveis. É muito mais coerente modelar o escoamento como sendo adiabático com energia constante, o que facilitou grandemente os cálculos.

Na frente de onda sonora, as mudanças de velocidade, pressão, etc. acontecem numa distância bem pequena. Portanto, é muito razoável admitir que o processo é adiabático. Como as variações de pressão, densidade, temperatura, etc. são muito pequenos, podendo-se admitir ainda que são reversíveis. Isto justifica plenamente a hipótese de escoamento isoentrópico.

## 9.2 Tiras de Selagem:

As tiras de selagem são responsáveis pela vedação do cilindro, por dentro do qual, o pistão que impulsiona a aeronave se desloca. Então, para uma perfeita vedação, é necessário tracionar as tiras. Como comentado anteriormente, o atuador responsável por este tracionamento é um motor que fica posicionado na proa do navio.

Para a modelagem deste elemento do objeto de controle, foi considerado que a tira se comporta como um elemento elástico, pois as trações exercidas não devem ultrapassar a tensão de escoamento do material e, conseqüentemente, manter-se na região elástica de acordo com o diagrama Tensão X Deformação mostrada na figura 12.

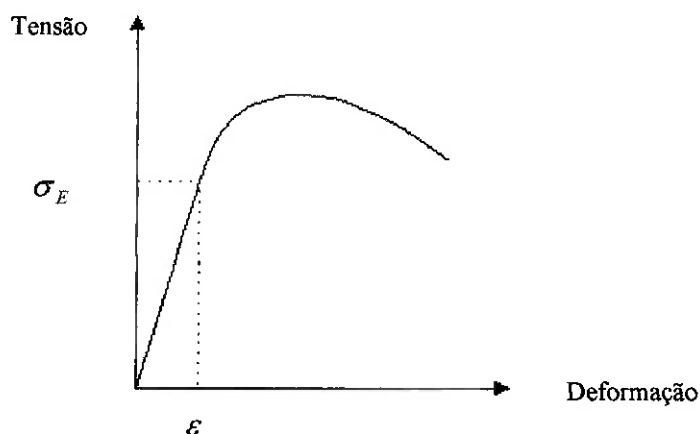


Figura 12 – Diagrama tensão/deformação para materiais dúcteis.

No diagrama acima  $\sigma_E$  é o limite de tensão limite de escoamento e  $\epsilon$  é dado por:



$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (14)$$

Ou seja,  $\varepsilon$  se refere à alteração (de forma) proporcional produzida em um material sob influência de tensão. É uma relação numérica, medida como o número de milímetros de alteração para cada milímetro do comprimento original.

Como o elemento em questão pode ser modelado como um elemento mola, o seu equivalente mecânico pode ser dado por:

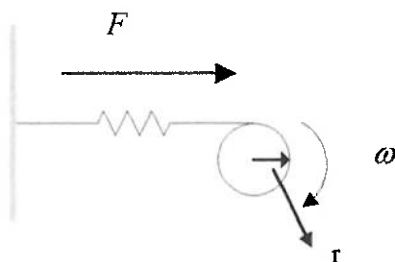


Figura 13 – Equivalente mecânico do elemento tira.

A força na mola é dado por:

$$F = KX \quad (15)$$

e

$$\frac{dF}{dt} = K \frac{dX}{dt} \quad (16)$$

Considerando que não haja escorregamento do motor, a taxa de variação da deformação da mola é:

$$\frac{dX}{dt} = \omega r \quad (17)$$

Substituindo a Eq. 17 na Eq. 16:

$$\frac{dF}{dt} = K \omega r \quad (18)$$

Como:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (19)$$

Onde A é a área da seção reta da tira.

Substituindo a Eq. 19 na Eq. 18:

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{K\omega r}{A} \quad (20)$$

Na Eq. 20, pode-se concluir que a dinâmica da tira está diretamente relacionada com a velocidade angular  $\omega$  do motor e com o raio r do disco acoplado ao motor.

### **9.3 Defletor de Jatós:**

Encontrando-se o avião na posição de decolagem, este elemento a planta deve-se erguer para proteger os operadores que se encontrarem a ré da aeronave, ou até mesmo outras pessoas que, porventura, estejam a uma distância que possa causar algum dano à sua integridade física quando ligados os motores a sua máxima potência para a decolagem do avião.

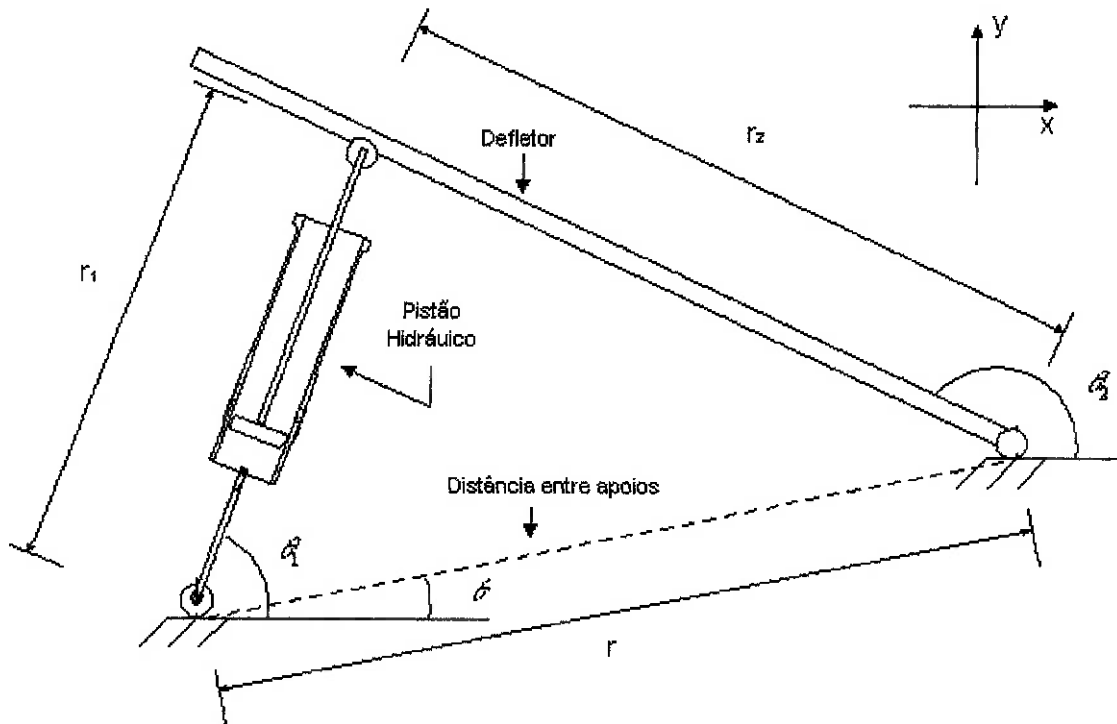


Figura 14 – Mecanismo responsável pela elevação do defletor de jatos.

Como já transcrito anteriormente e mostrado o esquema deste elemento, vide esquema 3, o atuador é um pistão hidráulico. O esquema mais detalhado deste elemento encontra-se na figura 14. Para se erguer o defletor de jatos, o óleo entra no pistão hidráulico fazendo o pistão avançar e, conseqüentemente, levantando o defletor de jatos. Para se abaixar o defletor, a válvula 2/4 vias é comutada desviando o fluxo do fluido fazendo com que o óleo entre pela outra extremidade do atuador, recolhendo a haste e arriando o defletor.

Este elemento é um tipo clássico de mecanismo articulado, conhecido também como mecanismo biela - manivela na sua segunda inversão. Mas antes de se realizar a modelagem do sistema defletor de jatos, convém obter o seu esquema cinemático, como indicado a seguir (figura 15).

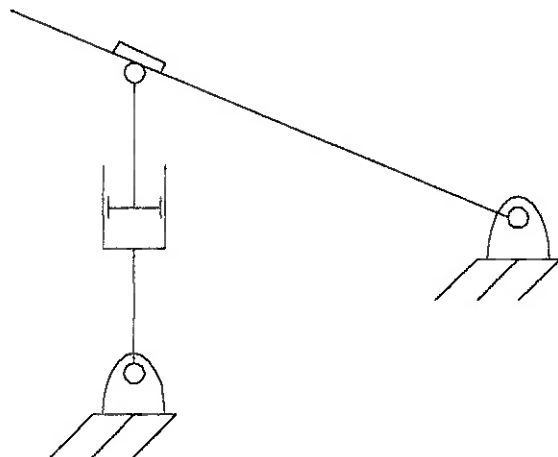


Figura 15 – esquema cinemático do defletor de jatos.

Analisando o esquema cinemático acima, pode-se obter a seguinte configuração vetorial:

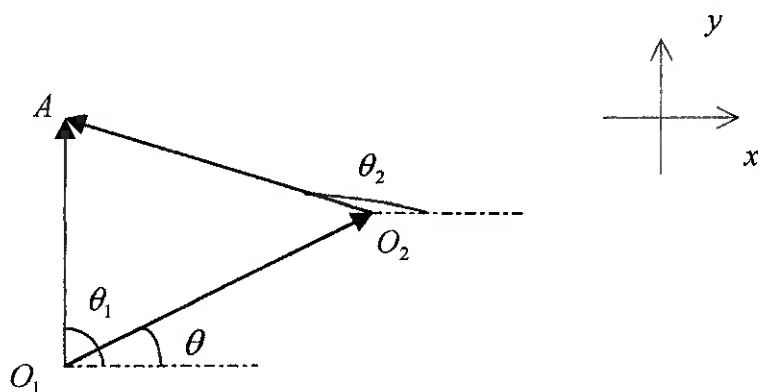


Figura 16 – esquema vetorial do defletor de jatos.

A equação vetorial é dada por:

$$\vec{r}_1 = \vec{r} + \vec{r}_2 \quad (22)$$

onde :

$$\begin{cases} \vec{r} = \vec{O_1O_2} \\ \vec{r}_2 = \vec{O_2A} \\ \vec{r}_1 = \vec{O_1A} \end{cases}$$

Para simplificar os cálculos na determinação do comportamento dinâmico do defletor de jatos, será realizada a analogia de números complexos com vetores. Assim, sendo dado um número complexo da seguinte forma:

$$z = |z|e^{j\theta} = |z|(\cos \theta + j \sin \theta) \quad (23)$$

Sendo que um vetor genérico é dado por:

$$\vec{V} = |\vec{V}|(i \cos \theta + j \sin \theta) \quad (24)$$

Observando a Eq. 23 e Eq. 24, nota-se que existe uma certa analogia na representação do número complexo e o vetor. Esta analogia permite que a componente  $i$  do vetor seja equivalente à parte real do número complexo e a componente  $j$  do vetor seja equivalente à parte imaginária do número  $z$ . Baseado nisto pode-se escrever:

$$\vec{V} = |\vec{V}|e^{j\theta} \quad (25)$$

Percebe-se que a parte real deste “vetor” é a componente  $i$  do vetor  $V$  original, o mesmo ocorrendo para a parte imaginária em relação à componente  $j$  do vetor original. Tendo sido feita tal analogia, a Eq. 22 pode ser rescrita da seguinte forma:

$$r_1 e^{j\theta_1} = r e^{j\theta} + r_2 e^{j\theta_2} \quad (26)$$

Derivando a Eq. 26 tem-se:

$$\dot{r}_1 e^{j\theta_1} + j \dot{\theta}_1 r_1 e^{j\theta_1} = j \dot{\theta}_2 r_2 e^{j\theta_2} \quad (27)$$

onde  $\dot{r}_1$  é a velocidade relativa do ponto A em relação a um referencial que gira junto com o segmento  $\overline{O_1 A}$ ,  $r_1$  é a dimensão do segmento  $\overline{O_1 A}$  (que neste caso é variável)  $\dot{\theta}_1$  é a velocidade angular do segmento  $\overline{O_1 A}$ ,  $\dot{\theta}_2$  é a velocidade angular do segmento  $\overline{O_2 A}$ ,  $r_2$  é a dimensão do segmento  $\overline{O_2 A}$  (constante).

As variáveis de entrada são os módulos iniciais de todos os vetores e a vazão Q de óleo que entra no pistão.

Separando, na Eq. 26, em parte imaginária e real, tem-se:

$$\begin{cases} r_1 \cos \theta_1 = r \cos \theta + r_2 \cos \theta_2 \\ r_1 \sin \theta_1 = r \sin \theta + r_2 \sin \theta_2 \end{cases} \quad (27.1)$$

Fornecendo os valores dos módulos, podem-se calcular a inclinação de cada vetor. Tendo sido calculados as inclinações e separando a Eq. 27 em parte real e imaginária, tem-se:

$$\begin{cases} -r_2 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 + r_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 = \dot{r}_1 \cos \theta_1 \\ r_2 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 - r_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 = \dot{r}_1 \sin \theta_1 \end{cases} \quad (28)$$

$$\dot{\theta}_2 = \frac{\begin{vmatrix} \dot{r}_1 \cos \theta_1 & r_1 \sin \theta_1 \\ r_1 \sin \theta_1 & -r_1 \cos \theta_1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -r_2 \sin \theta_2 & r_1 \sin \theta_1 \\ r_2 \cos \theta_2 & -r_1 \cos \theta_1 \end{vmatrix}} \quad \dot{\theta}_1 = \frac{\begin{vmatrix} -r_2 \sin \theta_2 & \dot{r}_1 \cos \theta_1 \\ r_2 \cos \theta_2 & r_1 \sin \theta_1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -r_2 \sin \theta_2 & r_1 \sin \theta_1 \\ r_2 \cos \theta_2 & -r_1 \cos \theta_1 \end{vmatrix}}$$

Para se determinar a dinâmica pode-se supor, que, para um intervalo de tempo muito reduzido, a velocidade angular é constante (isto é bem razoável, uma vez que como são mecanismos que possuem massas relativamente elevadas, e consequentemente grande inércia de velocidade), com isso é possível realizar a seguinte aproximação:

$$\theta_1(i+1) = \theta_1(i) + \dot{\theta}_1(i)\Delta t \quad \theta_2(i+1) = \theta_2(i) + \dot{\theta}_2(i)\Delta t \quad (29)$$

Calculadas as novas inclinações, volta-se nas Eq. 28 e calculam-se as novas velocidades angulares. Este processo vai se repetindo até que se atinja a inclinação desejada do defletor.

Sendo a vazão constante o valor de  $\dot{r}_1$  assume dois valores distintos, um no avanço do pistão e outro no retorno. Então,  $\dot{r}_1$  será dado por:

$$\begin{aligned}\dot{r}_{1(\text{avanço})} &= \frac{Q}{A_{\text{embolo}}} \\ \dot{r}_{1(\text{retorno})} &= \frac{Q}{(A_{\text{embolo}} - A_{\text{haste}})}\end{aligned}\quad (29.1)$$

Outro fator importante que a ser considerado neste elemento do objeto de controle, é a velocidade angular que este atingirá durante o seu erguimento (e consequentemente a energia cinética atingida pelo mesmo), pois uma brusca variação na velocidade angular terá como consequência uma grande variação no momento angular do defletor. Este fato é importante, pois o defletor apresenta uma massa relativamente elevada que traz, como consequência, uma grande inércia. Uma vez que o momento angular de um corpo é dado por:

$$\vec{H}_0 = I_0 \cdot \vec{\omega}$$

onde  $\vec{\omega}$  é a velocidade angular do corpo e  $I_0$  matriz de inércia do corpo em relação ao seu polo. Também da mecânica é sabido que:

$$\vec{H}_0 = \vec{M}_0 = I_0 \cdot \vec{\omega} \quad (30)$$

onde  $\vec{M}_0$  é o momento das forças externas. Uma brusca variação do momento angular irá causar um grande momento externo (vide Eq. 30), o que, para a estrutura que suporta o mecanismo, pode causar pode ser extremamente danoso.

#### 9.4 Catapulta (*shuttle*):

Este elemento do objeto de controle é um dos mais importante elemento do sistema estudado. A lançadeira é quem efetivamente lança o avião, ou seja, ela auxilia a força de empuxo do avião com a finalidade de fornecer energia cinética suficiente para a decolagem do mesmo (a força de empuxo do avião sozinha, não é capaz de fornecer

energia suficiente). Esta energia cinética deve ser tal que a velocidade do aeronave, em relação ao ar, seja suficiente para causar a força de “lift” da aeronave, uma vez que esta força é função da velocidade. Como explicado anteriormente, este elemento é composto, basicamente, por dois pistões que recebem o vapor oriundo dos reservatórios de vapor e impulsionam o avião.

O esquema de forças que atuam neste elemento pode ser modelado, simplificadaamente, conforme a figura abaixo:

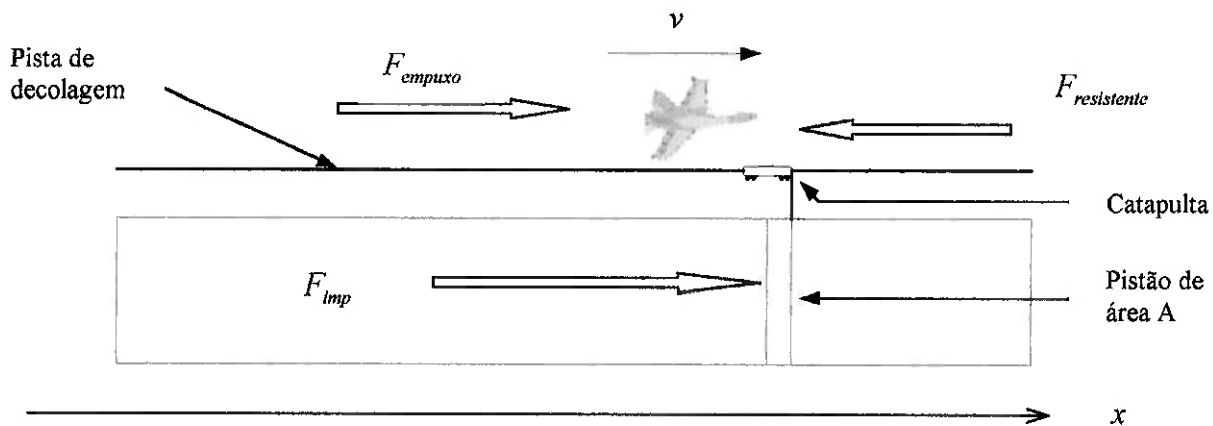


Figura 17 – esquema de forças atuantes durante a decolagem de aviões do NAeL Minas Gerais.

onde:  $F_{imp}$  é a força que impulsiona a aeronave e  $F_{resistente}$  é o somatório das forças resistentes ao avanço (será melhor detalhada mais adiante).

A força  $F_{imp}$  é dada por:

$$F_{imp} = P \cdot A \quad (31)$$

onde  $P$  é a pressão oriunda dos reservatórios (conforme explicado no capítulo 3 *Seqüência de Lançamento*). Assim, a pressão  $P$  é função da posição  $x$  do pistão (êmbolo), uma vez que conforme o pistão se desloca o volume, ao qual o vapor está confinado, aumenta da seguinte forma:

$$\int_{V_0}^V dV(x) = \int_0^x dx A \quad \text{ou} \quad V(x) = V_0 + xA \quad (32)$$

onde:  $A$  é a área do êmbolo,  $x$  é a posição do êmbolo e  $V_0$  volume dos reservatórios.



De acordo com a Eq. 13, equação que modela um gás perfeito, tem-se que:

$$P(x) = \frac{mRT}{V(x)} \quad (33)$$

Como a expansão do volume é feita a uma grande velocidade, uma boa aproximação é considerar que o processo de expansão volumétrica se dá de forma adiabática (não haveria tempo suficiente para realizar a troca de calor com o meio). Desta forma, a temperatura também varia com a posição do êmbolo. Então, substituindo a Eq.32 na Eq. 33, esta pode ser rescrita da seguinte forma:

$$P(x) = \frac{mRT(x)}{V_0 + A \cdot x} = \frac{CT(x)}{V_0 + Ax} \quad (34)$$

onde: C é um valor constante.

Para se realizar a atualização da temperatura e pressão a cada ponto x, basta resolver a seguinte equação:

$$\frac{P(i)V(i)}{T(i)} = \frac{P(i+1)V(i+1)}{T(i+1)} \quad (35)$$

Além da força  $F_{imp}$  que realiza trabalho, pois o trabalho realizado por esta força produz uma variação na energia cinética do conjunto avião-catapulta, existe também a força  $F_{resistente}$  que se oporá ao deslocamento do conjunto supracitados. Pode-se dividir a força  $F_{resistente}$  em basicamente duas forças, que são elas: a força de atrito  $F_{at}$ , causada pelo atrito entre a catapulta e a pista, e a força  $F_{av}$ , causada pela resistência do ar ao deslocamento do avião.

A força  $F_{av}$  é, resumidamente, a força de arrasto. Para um corpo que se desloca com uma determinada velocidade em relação ao ar, a força de arrasto é dada por:

$$F_{av} = F_{arr} = KV^2 \quad (36)$$

onde:  $K$  é uma constante de forma do corpo e do fluido no qual este corpo se desloca, e  $V$  a velocidade relativa entre o corpo e o ar.

Obviamente, o valor de  $K$  muda de acordo com o modelo do avião que será “catapultado” (no caso em questão, o meio em que o avião se desloca é sempre é o ar, com isso o valor de  $K$  é praticamente dependente da forma do corpo, logicamente considerando que a densidade do ar não varia com a posição que o navio se encontra na superfície terrestre). Então, este valor é obtido empiricamente em túneis de vento utilizando a técnica da Análise Adimensional.

A outra força que compõe a  $F_{resistente}$ , a força  $F_{at}$ , é bem mais complexa e difícil de calcular, pois esta força envolve um número muito grande de variáveis, e por sua vez não se sabe de que forma cada variável contribui para esta força. Uma maneira de se determinar esta força seria fazer ensaios de campo para diversas situações (partes móveis com níveis diferentes de lubrificação, diferentes massas a serem “catapultadas”, etc.) e velocidades. A partir de então, seriam levantados gráficos de comportamento da  $F_{at}$  e ter-se-ia uma aproximação desta força de maneira empírica. Uma afirmação que se pode fazer desta força é que uma das variáveis que influenciam no seu valor final é a tensão aplicada às tiras de selagem, pois estas, como mostrado no capítulo 2 - figura 1, deslizam por sobre uma rampa guia, o que certamente irá causar uma resistência ao avanço. Outra afirmação que se pode fazer é que a  $F_{at}$  depende também da massa do avião que está sendo lançado, pois as forças de contato aumentam, aumentando assim o atrito resultante. Mas de qualquer forma, não é possível calcular qual a contribuição da tensão aplicada às tiras de selagem e contribuição da massa do avião no valor final da  $F_{at}$ , pois estes valores seriam obtidos nos ensaios de campo. Para uma primeira aproximação da  $F_{at}$  seria:

$$F_{resistente} = F_{ar} + F_{at} \quad (37)$$

Mas,

$$F_{at} = K_1 \sigma + F \quad (38)$$

onde:  $K_1$  é uma constante e  $\sigma$  tensão aplicada às tiras de selagem e  $F$  a parcela da  $F_{at}$  independente da tiras.

A relação linear entre a tensão nas tiras e a  $F_{at}$  foi estimada, uma vez que sempre para uma primeira aproximação é razoável linearizar os efeitos, afim de facilitar a primeira interação dos cálculos e a partir de então partir para um sistema não linear para refinar o modelo. Sabe-se ainda, que a maior parcela da  $F_{at}$  atuante é devido à tensão nas tiras (informações obtidas no próprio navio). Então, de acordo com a Eq. 36 e Eq. 37, a  $F_{resistente}$  pode ser, de forma bem simplificada, dada por:

$$F_{resistente} = KV^2 + K_1\sigma \quad (39)$$

Outra força atuante no sentido da velocidade do avião, é a  $F_{empuxo}$  que é a força gerada pela variação da quantidade de movimento do ar que entra e sai das turbinas do avião durante a sua decolagem. Esta força é característica de cada avião, por isto será encarada como um dado de entrada e é fornecido por cada fabricante de aviões. De um modo geral, esta força é dada por:

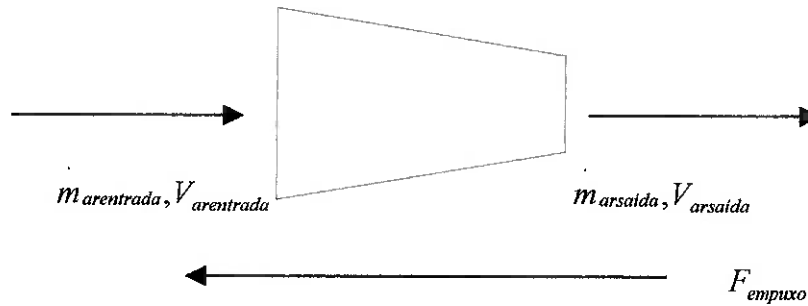


Figura 18 – esboço da força de empuxo que atua numa turbina.

$$F_{empuxo} = m_{arsaída} V_{arsaída} - m_{areentrada} V_{areentrada} \quad (40)$$

O momento causado pela força  $F_{imp}$  em relação à aeronave será suportado pela parede da câmara por onde se desloca o pistão. Então, as forças atuantes no avião serão dadas por:

$$ma = F_{empuxo} + F_{imp} - F_{resistente} \quad (41)$$

onde:  $m$  é a massa do avião  $a$  é a aceleração do avião.

É importante ressaltar que para cada aeronave ter-se-á um valor de velocidade em relação ao ar. Assim, deve-se atentar para a velocidade que o avião atingirá ao final da pista, pois, obviamente, deve ser superior o valor de velocidade fornecido pelo fabricante da aeronave. Outro fator a mencionar é o valor da máxima velocidade atingida pelo avião. Sabe-se que o ser humano é extremamente sensível a bruscas acelerações e desacelerações (o mesmo não ocorre para velocidade), logo se torna importante também, a monitoração deste valor que sendo muito elevado pode até causar o desmaio do piloto durante a decolagem.

Em suma, a catapulta irá funcionar como se fosse um êmbolo, com uma das faces pressurizada, em expansão volumétrica.

### 9.5 Retrator:

Este elemento é o responsável por retornar a catapulta a sua posição original após o lançamento da aeronave.

Tendo sido lançado o avião, a catapulta encontra-se na proa do navio, ou seja, no final da pista, então o retrator é responsável por trazê-la a posição original.

O seu acionamento é feito através de um motor que se encontra no convés inferior ao da pista (convão). Entre o motor e o retrator existem algumas polias que conduzem um cabo de aço que irá, através de seu tracionamento, posicionar o retrator. Logo, a velocidade de avanço e retorno deste elemento está diretamente relacionado com a velocidade de rotação do motor.

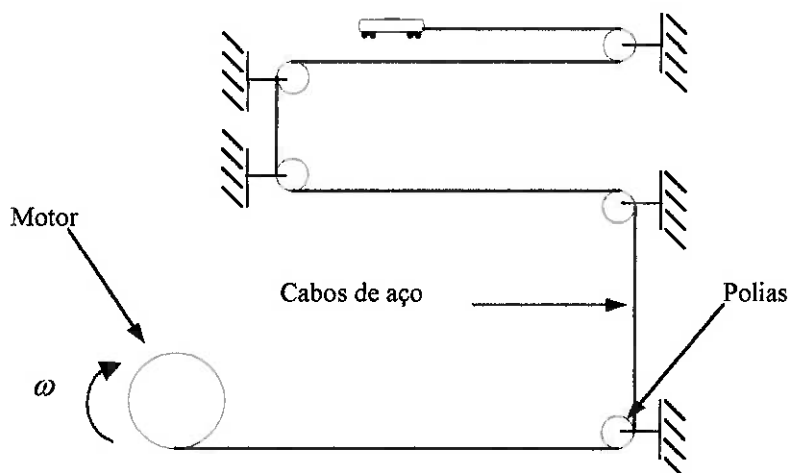


Figura 19 – esboço do mecanismo do retrator para o avanço.

A velocidade  $v$  é dada por:

$$v = r \cdot \omega \quad (42)$$

onde:  $r$  o raio do tambor do motor e  $\omega$  é a velocidade angular do motor.

Para se determinar o tempo que o retrator levará para sair da sua posição inicial até a sua posição final:

$$t = \frac{s}{v} \quad (43)$$

Para o retorno do retrator, pode-se utilizar o mesmo raciocínio a diferença reside no fato de que o mecanismo de atuação é simétrico ao apresentado na fig. 19 , porém utiliza-se o mesmo motor para tracionar o cabo de aço. Convém ressaltar que na fig. 19 é apresentado apenas um esboço, uma vez que o sistema de polias na planta real é bem mais complexo e em três dimensões, não apenas em duas como foi esboçado na figura.

## **10 Sistema Simulador do Objeto de Controle:**

A principal dificuldade deste projeto é justamente validar o controle para a planta, conforme discutido no capítulo 9, pois para que isso ocorra é necessário ter o objeto de controle para efetivamente poder controlá-lo. No capítulo anterior, foi feita a modelagem matemática de cada elemento do objeto de controle, de tal forma que possa viabilizar uma simulação da planta, como um todo, através de software que terá inserido em sua programação, justamente os elementos do objeto e suas respectivas equações de modelagem.

Para a modelagem do objeto de controle, foi realizada a teoria de programação orientada a objetos, sendo que cada objeto representa um elemento do objeto de controle com suas propriedades, eventos e métodos. Tais conceitos serão abordados no tópico seguinte.

### **10.1 Estratégia Computacional para a Modelagem do Objeto de Controle:**

A modelagem do objeto de controle será feita utilizando-se a técnica de modelagem baseada em objetos. Este tipo de abordagem é um modo de estudar problemas com utilização de modelos fundamentados em conceitos do mundo real. A estrutura básica é o objeto, que combina a estrutura e o comportamento de dados em uma única entidade. Os modelos baseados em objetos são úteis para a compreensão de problemas, para a comunicação com peritos em aplicações, para modelar empresas, preparar documentação e projetar programas e banco de dados.

Ao se estruturar um software baseando-se no conceito de objetos, entende-se que haverá estruturas de dados que vão descrever componentes (objetos) reais, em grande parte das vezes representando elementos físicos, e no decorrer da análise serão criadas novas estruturas utilizando os objetos já desenvolvidos, sempre procurando fazer analogias com o mundo real. Então, como na planta real, os objetos vão ter algumas características (que na implementação serão chamados de propriedades) que seria por exemplo pressão de trabalho, volume, tração máxima, etc. terão também ações que esses objetos podem realizar (que na implementação serão chamados de métodos) que seria por exemplo encher tanque, ligar freio, abrir válvula, etc., e por último, na planta existirão as transições de um estado para outro, que caracteriza o SED (que na implementação serão chamados de eventos).

Neste trabalho procurar-se-á desenvolver um modelo computacional para baseado no sistema de lançamento (catapulta) de aviones do porta aviones Minas Gerais. Para isso serão classes de objetos que representarão os elementos da planta, e em seguida, serão agrupados para representar o objetos de controle. Existem vários sistemas de lançamento de aviones no mundo, mas utilizou-se o sistema do Minas Gerais pelo fato de ser um sistema de interesse da Marinha e, conseqüentemente, do Brasil. A modelagem, dentro do sistema do Minas Gerais, deve ser a mais genérica possível, ou seja, embora baseado num sistema existente, as propriedades podem ser alteradas pelo usuário do programa, afim de determinar a combinação de parâmetros ótima para o lançamento de aviones. Esta preocupação é pertinente, pois com a aquisição de novas aeronaves, poderá ser necessário alterar a planta para se conseguir o efeito desejado. Durante a modelagem e implementação serão seguidos os conceitos da análise orientada a objeto.

Outro fator, que deve ser fornecido pelo software que simula a planta, é um tratamento estatístico através de gráficos e valores máximos de velocidade, aceleração, enfim, de todos os parâmetros importante para se analisar os efeitos da simulação com uma determinada configuração da planta.

O outro objetivo de criar objetos de forma mais genérica possível, é possibilitar a utilização destes objetos em uma planta que seja totalmente diferente da analisada neste trabalho. Assim, se futuramente se desejar simular uma planta que contenha um tanque que será enchido e esvaziado por gases ou vapor superaquecido, estes objetos, já prontos, podem ser utilizados. Por exemplo, uma usina de fabricação de gás natural que terá tanques. Estes certamente terão características bem semelhantes ao tanque aqui modelado o que significa alterar apenas as propriedades, uma vez que as ações (métodos) e transições (eventos) serão o mesmo.

## **10.2 Definição dos Objetos:**

Neste item serão abordados os eventos, métodos e parâmetros envolvidos em cada elemento do objeto de controle, isto é, a definição dos objetos. Esta definição deve ser feita de maneira cuidadosa, pois o objetivo é criar os objetos mais genéricos possíveis. Portanto as definições dos objetos foram realizados da seguinte forma:

### **10.2.1 Tanques:**

Para este objeto foi adotada a seguinte definição:

## PROPRIEDADES:

### 1) Volume

2) Pressão Trabalho

3) Pressão de Alimentação

4) Temperatura do Gás/Vapor de alimentação

5) Temperatura do Meio em que o Tanque está

descarregando

6) Pressão do Meio em que o Tanque está descarregando

7) Área da seção reta do duto de alimentação

8) Área da seção reta do duto de saída

9) Pressão Máxima

10) Pressão

Como visto no item 9.1, as propriedades de 1 a 8 estão diretamente ligadas à vazão mássica, quer de saída quer de entrada. A propriedade *pressão* é o valor da pressão no instante  $t$ , ou seja, e o valor da pressão instantânea no tanque. A propriedade *pressão máxima* é o valor máximo que o tanque pode suportar e, obviamente, nunca deve ser menor que a pressão de trabalho.

## MÉTODOS:

1) Pressuriza tanque

2) Despressuriza tanque

O método *pressuriza tanque* é a ação responsável pelo enchimento do tanque e o método *despressuriza tanque* é a ação responsável pelo esvaziamento do tanque. Nestes métodos é que estão embutidos a dinâmica do elemento do objeto de controle (no modelo MFG é representado pelo box temporizador). É justamente através destes métodos que é calculada a propriedade *pressão*, até que esta atinja a pressão de trabalho.

## EVENTOS:

1) Pressurizou Tanque

2) Atingiu Pressão Zero

3) Mudou Pressão



O evento *pressurizou tanque* é o responsável por enviar o sinal para o controle de que a pressão do tanque atingiu o estado de pressão de trabalho e o evento *atingiu pressão zero* é o responsável por enviar o sinal para o controle de que a pressão atingiu a pressão zero (efetiva). Na planta real estes eventos, *pressurizou tanque* e *atingiu pressão zero*, irão possibilitar o fechamento da válvulas de alimentação (flow control valve) e de exaustão, respectivamente, pelo controle. Estes eventos, no modelo MFG, são os responsáveis por disparar os gates habilitando a transição para o próximo estado no controle. Isto pode ser melhor visualizado na figura abaixo.

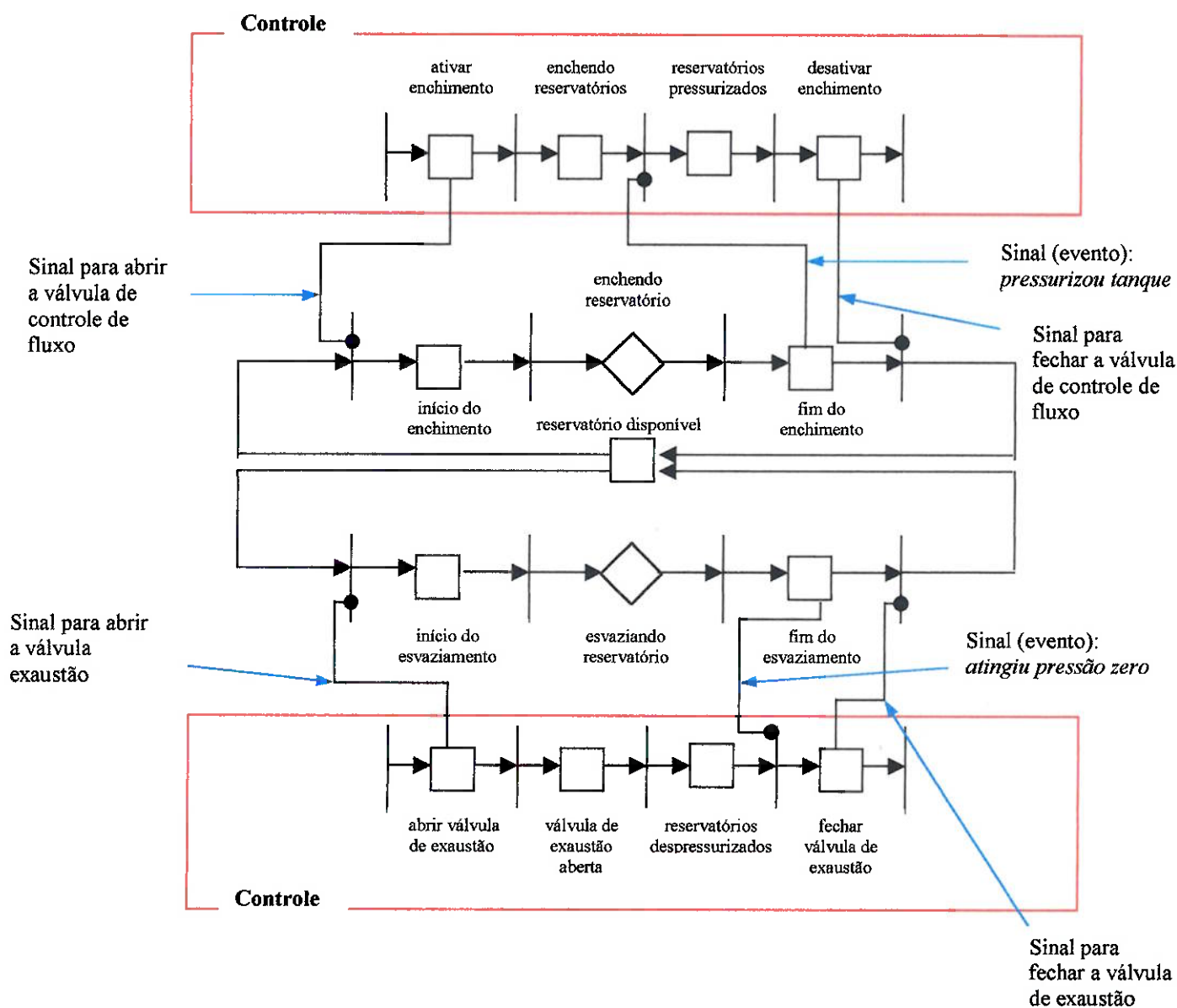


Figura 20 – modelo MFG do objeto tanque e o controle deste objeto.

Na figura acima, os métodos estão *pressuriza tanque* e *despressuriza tanque* estão representados, respectivamente, pelos boxes *início do enchimento* e *início do esvaziamento*.

O evento *mudou pressão* é o responsável pela monitoração no painel de controle do operador. Com este evento, é possível mostrar para o operador, deste painel, o valor da pressão a cada instante  $t$ , e, desta forma, fazer o monitoramento do processo.

### 10.2.2 Catapulta (shuttle):

Para este objeto foi adotada a seguinte definição:

#### PROPRIEDADES:

- 1) Área dos Pistões
- 2) Posição
- 3) Velocidade
- 4) Aceleração
- 5) Posição Mínima
- 6) Posição Máxima
- 7) Coeficiente Aerodinâmico

Dentre as propriedades acima, nas propriedades *posição máxima* e *posição mínima* irão constar o comprimento da pista de decolagem, ou seja, a posição final e a posição inicial, respectivamente. As propriedades *velocidade* e *aceleração* serão atualizadas a cada posição da catapulta, com a finalidade de se obterem os gráficos de velocidade e aceleração do conjunto catapulta-avião, que serão de grande importância para a análise do desempenho do processo. As propriedades *massa*, *posição*, *coeficiente aerodinâmico* e *área dos pistões*, são propriedades que irão influenciar na dinâmica deste elemento. A *massa* irá influenciar na *aceleração* e consequentemente na *velocidade* do conjunto catapulta-avião. A *posição* e a *área dos pistões* estão diretamente relacionadas com a  $F_{imp}$ , que varia com a mudanças destas propriedades (vide Eq.31 e Eq.34). Já o *coeficiente aerodinâmico* influencia na  $F_{resistente}$ , bem como a propriedade *velocidade* (vide Eq.36, item 9.4).

## MÉTODOS:

- 1) Posicionar Shuttle
- 2) Parar
- 3) Andar

Como o catapulta é essencialmente um elemento passivo, pois o que faz a catapulta avançar é a pressão dos tanques, e o que faz ela retornar e se posicionar na cabeceira da pista é o retrator. Assim estes métodos foram criados para funcionar como ferramentas para disparar eventos. Desta forma, o método *andar* e *parar* foram criados para disparar o relógio (será explicado mais a frente) e o método *posicionar shuttle* é um método que será relacionado com uns dos métodos do retrator que será o próximo objeto em questão.

## EVENTOS:

- 1) Atingiu Fim
- 2) Atingiu Início
- 3) Mudou Posição

Os eventos *atingiu fim* e *atingiu início* são, respectivamente, quando a catapulta está na cabeceira e no final da pista de decolagem. Estes eventos são importante, pois informará ao controle os seguintes estados: *atingiu início* informará que a catapulta está na posição a ser engatado pelo avião e *atingiu fim* indica que a catapulta já está na sua posição final, o que quer dizer que o avião já decolou e ocorreu o lançamento. Após esta informação é que o objeto de controle começa a retornar para o seu estado inicial, ou seja, arria defletor, avança retrator para buscar a catapulta (lançadeira), começa a esvaziar o tanque, etc. Esta etapa no controle está identificado, no capítulo 7 como LANÇAMENTO no modelo PFS. O evento *mudou posição* irá disparar eventos, para que o operador consiga monitorar o posicionamento da catapulta durante o processo de lançamento. Este monitoramento é importante, pois vai indicar como está se comportando o deslocamento do avião durante a sua decolagem. A figura a seguir ilustra os sinais de comando e controle:

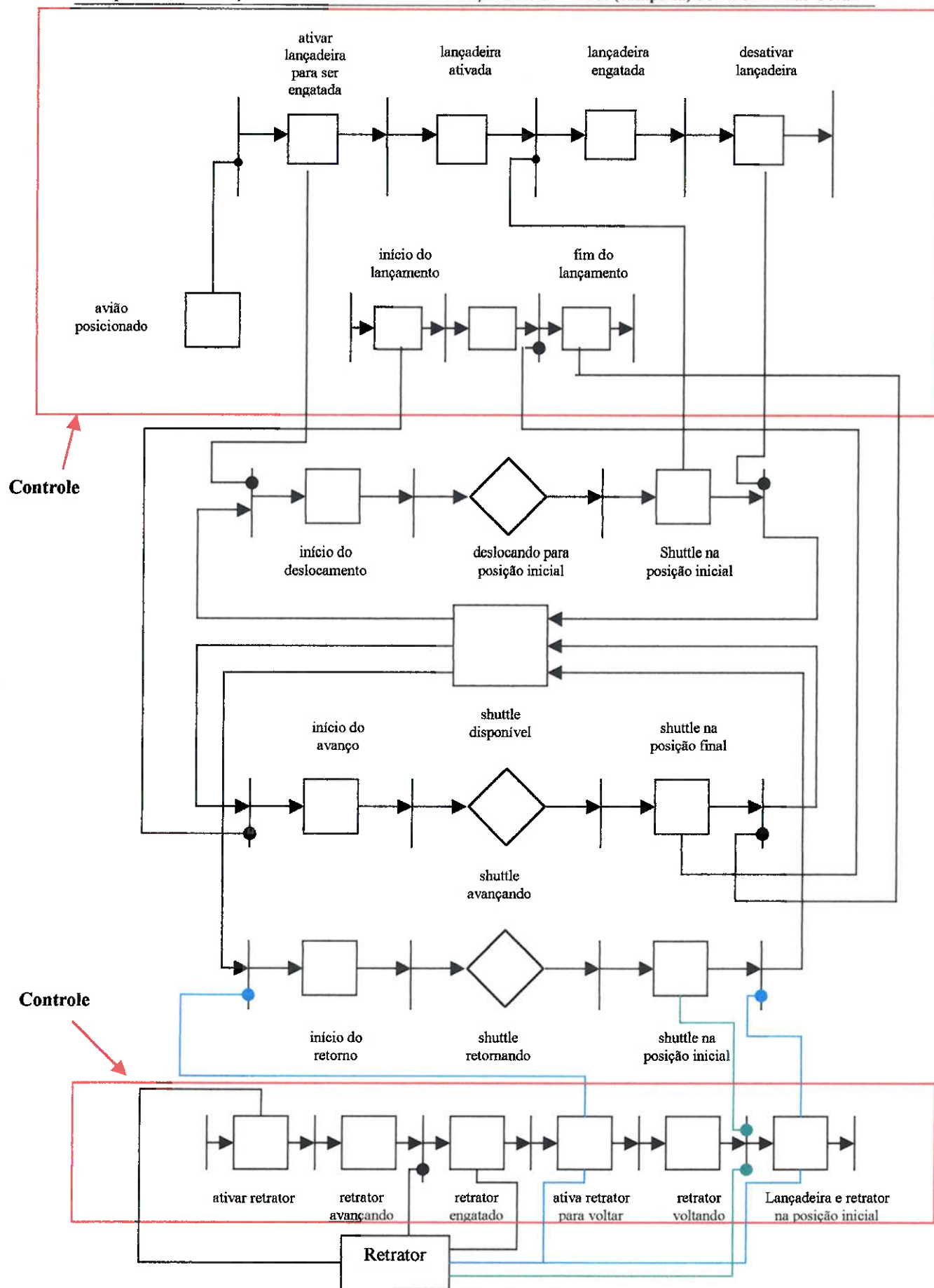


Figura 21 - modelo MFG do objeto lançadeira e o controle deste objeto.

Nota-se que na figura anterior uma parte do controle está se referindo ao retrator. Isto ocorre devido ao fato do retrator, quando do seu retorno, está encaixado com a catapulta, fazendo com que o controle envie um sinal único para os dois elementos (estes sinais estão indicados pelos ligamentos em azul. Existe um sinal saindo também para o retrator conforme será visto adiante), e recebe dois sinais habilitadores, vindo um da lançadeira e outro do retrator (indicado pelo ligamento verde. Existem sinais para habilitar o gate, tendo, como consequência, a função lógica AND).

#### 10.2.3 Retrator:

Para este objeto foi adotada a seguinte definição:

##### PROPRIEDADES:

- 1) Posição
- 2) Posição Inicial
- 3) Posição Final
- 4) Velocidade
- 5) Direção

As propriedades acima são bem semelhantes as já citadas com relação à catapulta. A propriedade *posição* se diferencia um pouco, pois neste caso a posição do retrator só coincidirá com a da catapulta por ocasião do retorno da mesma (o retrator está encaixado com a catapulta, ou seja, a posição deles é a mesma durante esta parte do processo de lançamento), quando do avanço do retrator a posição, obviamente, deste elemento não coincidirá, pois a catapulta está na posição final da pista esperando ser engatada pelo retrator que avança para tal. A propriedade *velocidade* vai depender, como explicado no item 9.5, da velocidade de rotação do motor que é o atuador. Pode-se considerar que esta velocidade é constante para uma dada rotação do motor. As propriedades *posição final* e *posição inicial* seguem o mesmo raciocínio utilizado para a catapulta. A propriedade *direção* servirá para indicar para o método *anda* se o retrator está avançando ou retornando, isto ficará mais claro a seguir.

##### MÉTODOS:

- 1) Anda
- 2) Para

3) Prende

4) Solta

Como já mencionado anteriormente, um mesmo método será utilizado para avançar ou retornar o retrator. A propriedade *direção* assumirá valores 1 ou -1 conforme o retrator se desloca. Desta forma, não há necessidade de criar dois métodos. Enfim, o método *anda* comandará a ação para o deslocamento e a propriedade *direção* indicará a direção do movimento. O método *prende* será utilizado para comandar a ação de prender a catapulta, quando o retrator for buscá-la na sua posição final, e o método *solta* comandará a ação de desencaixar a catapulta do retrator quando já se encontrarem na posição inicial

#### EVENTOS:

1) Avançou

2) Voltou

3) Encaixou

4) Desencaixou

5) Mudou Posição

O evento *mudou posição* possui as mesmas características e função de monitoramento descritos para a catapulta. Os eventos *avançou* e *retornou* vão gerar para o controlador informação que o retrator se encontra na sua posição final e inicial, respectivamente. Os eventos *encaixou* e *desencaixou* vão gerar para o controlador sinais de que a catapulta está encaixada (quando ambos se encontram na posição final), e que a catapulta está desencaixada (quando ambos se encontram na posição inicial), respectivamente.

Na figura a seguir ficará ilustrada os sinais de comando e controle necessários.

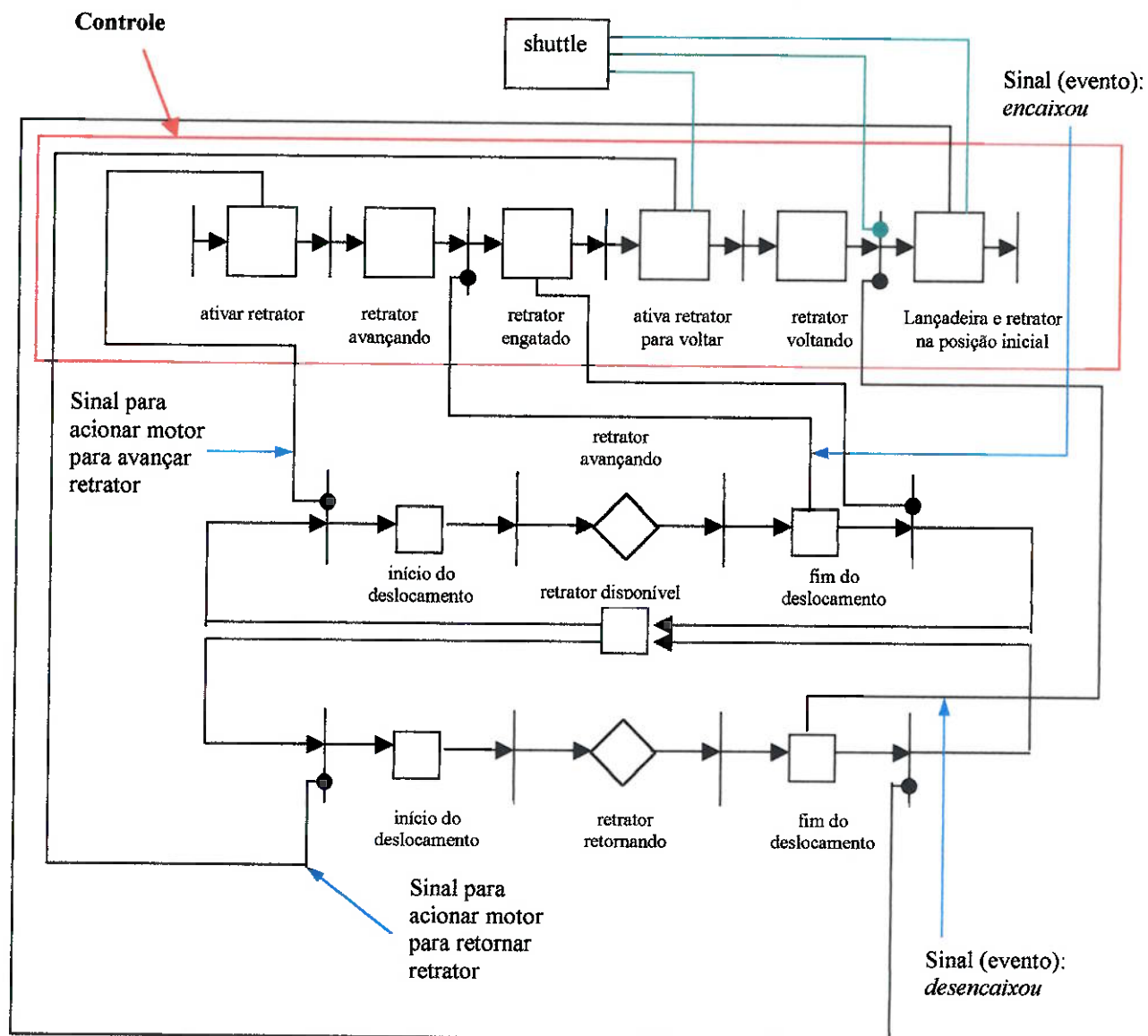


Figura 22 - modelo MFG do objeto retrator e o controle deste objeto.

Observa-se que o retrator compartilha mesmos sinais de controle, conforme explicado anteriormente (ver arcos em verde).

#### 10.2.4 Tiras

Para este objeto foi adotada a seguinte definição:

##### PROPRIEDADES:

- 1) Tração
- 2) Ttrab
- 3) Tmax
- 4) Velocidade
- 5) Direção

A propriedade *tração* representa o valor da tração na tira a cada instante  $t$ .  $T_{trab}$  é o valor que a tração de trabalho da tira e  $t_{max}$  a tração máxima que a tira pode suportar. Logicamente a  $t_{trab}$  deve ser menor que  $t_{max}$ . A propriedade *velocidade* contém o valor da velocidade que a tira está sendo tracionada (vide Eq.20, item 9.2). Para a propriedade *direção*, vale o mesmo raciocínio utilizado no caso do retrator.

#### MÉTODOS:

##### 1) Traciona

Como este elemento do objeto de controle só possui a ação de tracionar ou destracionar as tiras, apenas um método foi alocado para ele. A propriedade *direção* é que vai determinar se as tiras estão sendo tracionadas ou destracionadas assumindo valores 1 ou -1, semelhante ao que foi visto para o retrator.

#### EVENTOS:

##### 1) Atingiu TTrab

##### 2) Destracionou

Estes eventos acima dispostos pelos auto explicativos. Ao atingir a tração de trabalho dispara-se o evento *atingiu ttrab*, e ,quando as tiras são destracionadas, dispara-se o evento *destracionou*. Esta troca de sinais pode ser melhor visualizado a seguir:



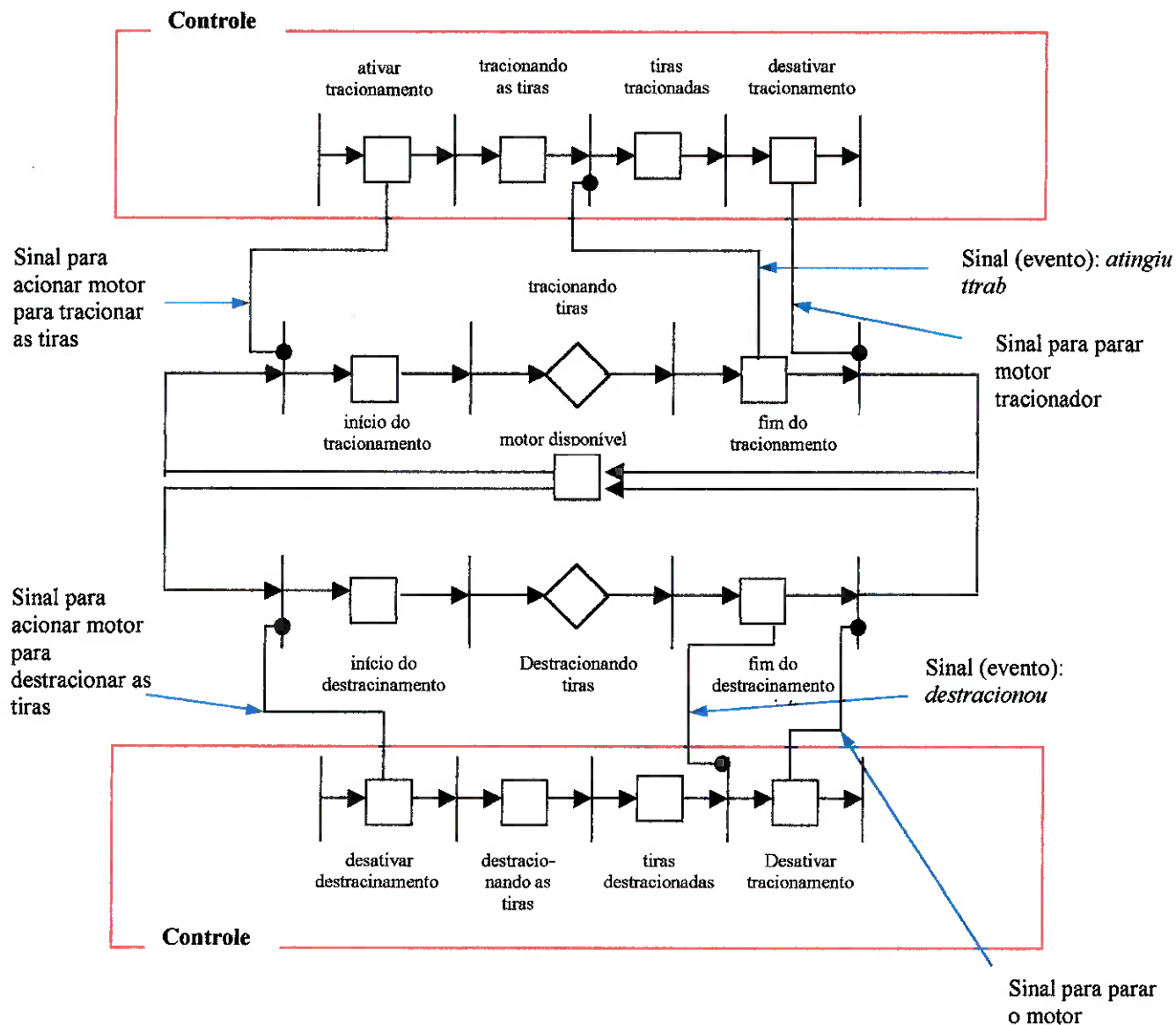


Figura 23 - modelo MFG do objeto tiras e o controle deste objeto.

#### 10.2.5 Rede Hidráulica:

Para este objeto foi adotada a seguinte definição:

##### PROPRIEDADES:

- 1) Bomba Ligada
- 2) Pressão Máxima
- 3) Pressão de Trabalho
- 4) Pressão
- 5) Rede Pressurizada

Para as propriedades acima listadas, as propriedades *bomba ligada* e *rede pressurizada* são variáveis booleanas, que indicarão quando a bomba está ligada (true para ligada e false para desligada) o mesmo para *rede pressurizada* que indica se a rede está pressurizada ou não (true para pressurizada e false para despressurizada). As propriedades *pressão máxima* e *pressão de trabalho* são propriedades que guardam o valor da pressão máxima e de trabalho, respectivamente, da rede hidráulica. A propriedade *pressão* é semelhante ao descrito para o elemento tanque.

#### MÉTODOS:

- 1) Liga Bomba
- 2) Desliga Bomba
- 3) Pressuriza Rede
- 4) Despressuriza Rede

Os métodos acima, pelo próprio nome, são auto explicativos. Um adendo deve ser feito em relação aos métodos *pressuriza rede* e *despressuriza rede*. Estes dois métodos vão comutar a válvula 2/4 vias para que o fluxo do óleo se dirija para o atuador pistão (*pressuriza rede*) ou para tanque (*despressuriza rede*).

#### EVENTOS:

- 1) Ligou Bomba
- 2) Desligou Bomba
- 3) Pressurizou Rede
- 4) Despressurizou Rede
- 5) Mudou Pressão

O evento *mudou pressão* é análogo ao elemento tanque. Os demais eventos, por si só, dispensam maiores comentários.

O MFG deste elemento é semelhante ao MFG do enchimento do tanque, conforme mostrado na figura 20.

#### 10.2.6 Defletor

Para este objeto foi adotada a seguinte definição:

#### PROPRIEDADES:

- 1) Defletor Elevado
- 2) Defletor Baixo
- 3) Posição
- 4) Velocidade
- 5)  $r$
- 6)  $r_1$
- 7)  $r_2$
- 8) teta
- 9) Vazão
- 10) Área do Pistão
- 11) Área da Haste

Este elemento envolve muitas propriedades pelo fato de exigir muita informações. As propriedades *defletor elevado* e *defletor baixo* são variáveis booleanas que serão utilizadas para determinar se o defletor está em cima ou em baixo, respectivamente. As propriedades  $r$ ,  $r_1$  e  $r_2$  são características geométricas do defletor, conforme a figura 16 (item 9.3). O valor de  $r_1$  fornecido inicialmente é do pistão recolhido. A propriedade *teta* é a inclinação do vetor  $r$  em relação à horizontal (vide figura 16). As propriedades *vazão*, *área do pistão*, *área da haste* irão definir a velocidade de avanço do pistão (vide item 9.3). A propriedade *posição* indica a inclinação do defletor, em relação à horizontal, a cada instante  $t$ . E a propriedade *velocidade* indica a velocidade angular do defletor, conforme citado anteriormente no item 9.3, é importante para a verificação da variação da quantidade de movimento.

#### MÉTODOS:

- 1) Ativar Defletor
- 2) Desativar Defletor

Estes métodos *ativar defletor* e *desativar defletor* são responsáveis pela ação de içar e arriar o defletor, respectivamente.

#### EVENTOS:

- 1) Atingiu Alto
- 2) Atingiu Baixo

São eventos que gerarão sinais para o controle para indicar quando o defletor atingiu seu estado de fim de curso, quer na içamento ou no arriamento.

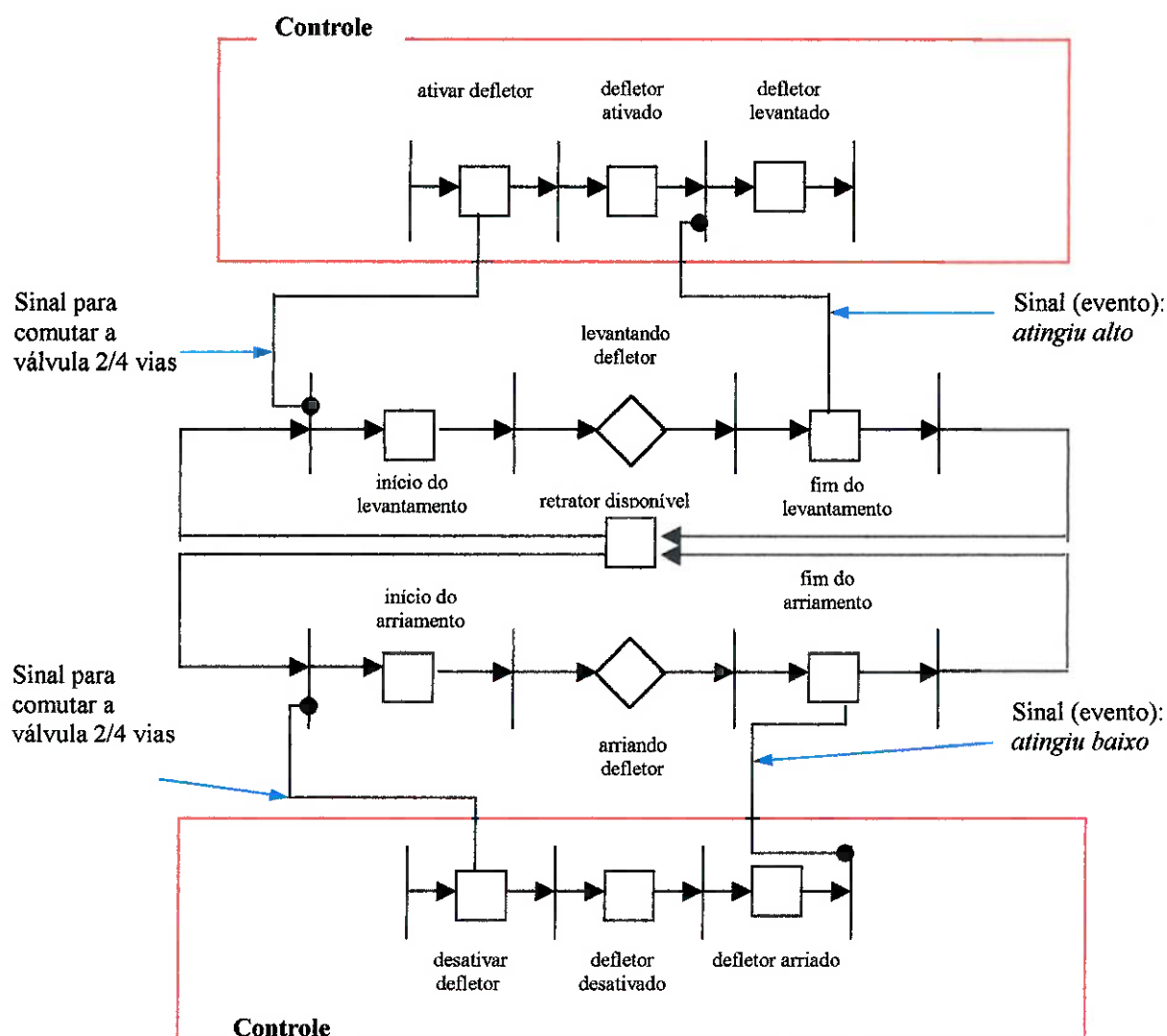


Figura 24 - modelo MFG do objeto defletor e o controle deste objeto.

#### 10.2.7 Freio:

Para este objeto foi adotada a seguinte definição:

##### PROPRIEDADES:

- 1) Freio Ligado
- 2) PMáxima
- 3) PTrabalho
- 4) Pressão

Estas propriedades são análogas às já comentadas para os demais elementos do objeto de controle. A única novidade é a propriedade *freio ligado*, que vai indicar se a pressão atingiu a pressão de trabalho (variável booleana). Esta pressão de trabalho é a pressão da rede que alimenta o freio.

#### MÉTODOS:

- 1) Ligar Freio
- 2) Desligar Freio

#### EVENTOS:

- 1) Ligou
- 2) Desligou
- 3) Atingiu Pressão de Trabalho
- 4) Atingiu Pressão Nula

Estes métodos e eventos acima, pelo seus próprios nomes, já definem quais são as suas características. O esquema de sinais, entre o modelo MFG deste elemento e o seu respectivo controlador, é bem semelhante ao desenvolvido para o defletor (figura 24).

Todos os objetos acima descritos terão, em comum, um evento, que atualiza os valores das propriedades como *pressão*, *posição*, etc., pois a simulação deve se realizar em tempo real. Desta forma, a cada, aproximadamente, 50ms serão atualizados estes valores. Na realidade, o que vai gerar este evento de atualização é um objeto chamado Xtimer (este objeto já existe no software de programação utilizado) que contém um evento chamado *tick*, e este objeto será chamado pelos outros, de forma que, toda a propriedade, método e eventos deste objeto pertencerão ao elemento do objeto de controle. Esta frequência de atualização é configurável para cada elemento e de forma independente, possibilitando, assim, um menor período para os elementos mais importantes e um maior para os menos importantes.

## 11 Software Simulador da Planta:

Como já comentado anteriormente, o software para a simulação deve ser orientado a objetos. Para tal será utilizado o Visual Basic versão 5.0 (VB 5.0). Esta versão, diferentemente da anterior, é voltada para programação orientada a objetos. A versão anterior deste software apenas servirá para fornecer algumas bibliotecas que não existem no VB 5.0.

Primeiramente foram criados todos os objetos que fazem parte da planta em análise (sempre de forma mais genérica possível). Após esta fase, foi criado um “form”, o qual foi chamado de *principal*, para unir todos estes objetos formando a planta como um todo, e, a partir daí, começar a simulação do objeto de controle. Além do *principal*, foram criados outros “forms” para: configuração e estabelecimento de comunicação (será visto mais a diante), ajuda, resumo da simulação. Tais “foms” integrados vão formar o simulador da planta.

### 11.1 Principal:

Este “form” representa o painel de controle e monitoração. Nele foram criados os dispositivos de monitoramento de cada elemento do objeto de controle. Os sinais de fim de curso, pressão de trabalho atingida, etc., pode ser vistos neste “form”. Dentro deste, também foi criado um “frame” que informa ao operador a última operação ocorrida ou o que está ocorrendo.

No modelo PFS, tem-se uma atividade denominada “setup”, que se caracteriza por condições que devem estar satisfeitas para o lançamento do avião. Assim, foi criado, ainda neste “form”, um “frame” que reúne todas as pré condições para que devem estar satisfeitas para o lançamento, de tal forma a facilitar o operador visualizar se todas as pré condições estão validadas.

Quando se carrega o “form” principal, não é possível realizar a simulação. É necessário se configurar todos os parâmetros da planta, bem como, determinar os elementos de comunicação que serão estabelecidos.

Após terem sido configurados os parâmetros acima descritos, o “form” irá calcular, de acordo com os valores configurados, o angulo inicial que o defletor faz com a horizontal. Isto foi feito, pois dependendo das dimensões iniciais adotadas para  $r$ ,  $r_1$  e

$r_2$ , ter-se-á valores de  $\theta$  diferentes. Logo, se faz necessário o cálculo deste ângulo antes da simulação.

A seguir tem-se a ilustração do que foi explicado.

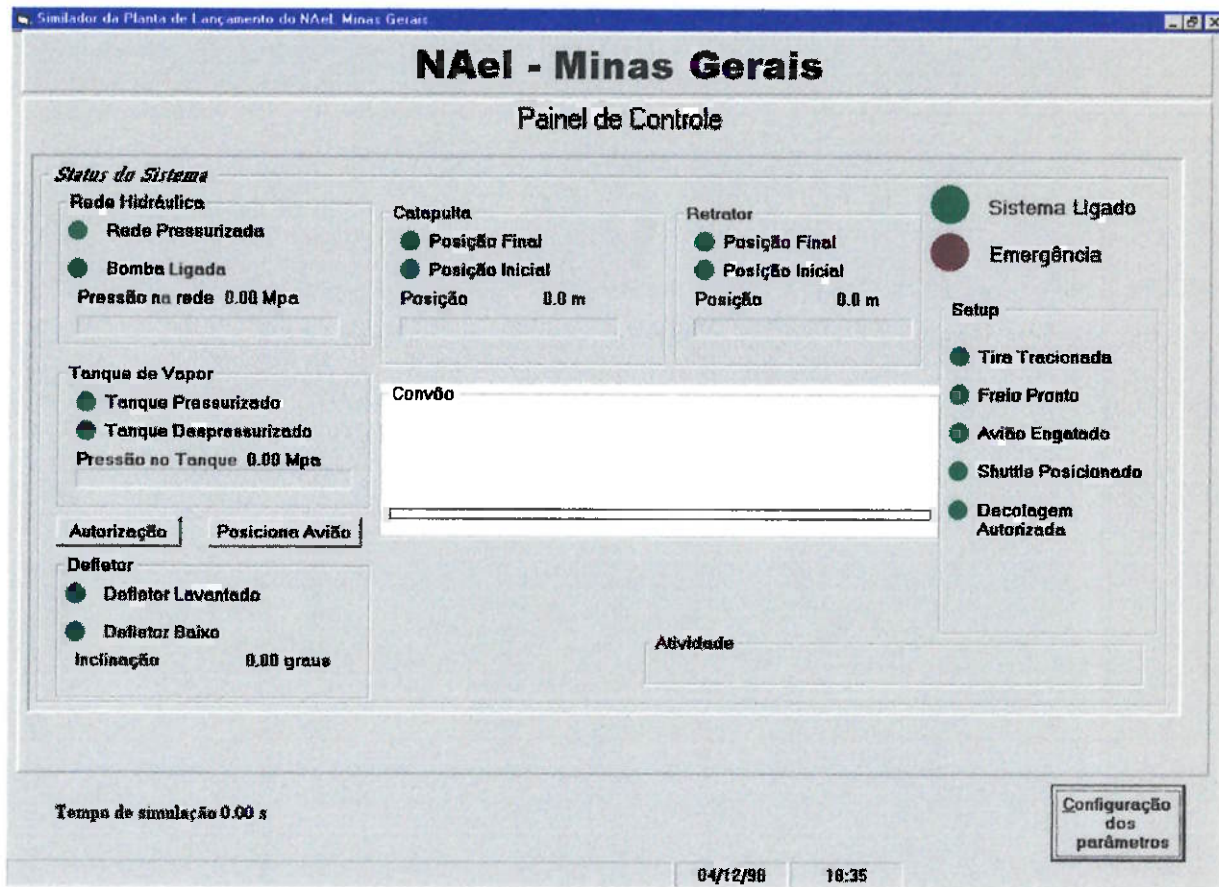


Figura 25 – painel de controle (form principal).

O valor de 0,00 grau para a inclinação do defletor é que foram estabelecidas as dimensões “default” do defletor ( $r$ ,  $r_1$  e  $r_2$ ), próximos ao valor da planta real.

Outro item a se notar é que só se pode inicializar a simulação após a configuração dos parâmetros.

#### 11.1.1 Comunicação:

Para simular e controlar a planta modelada, é necessário que seja estabelecida uma comunicação com o controlador, quer ele seja um software de controle ou o CLP. Esta comunicação deve ser capaz de trocar informações entre o controle e a planta. Foi escolhido, então, a comunicação DDE (Dynamic Data Exchange) disponível nos aplicativos for Windows.

Para se estabelecer a comunicação DDE com o VB 5.0, não é uma tarefa difícil, bastando apenas estabelecer o item (nome do aplicativo que será feita a comunicação), através da propriedade LinkItem, e o tópico (elemento deste aplicativo que irá receber ou enviar o valor transmitido ou recebido), através da propriedade LinkTopic.

Após terem sido estabelecidos o item e o tópico para a comunicação, o simulador começa a se comunicar com o controlador de forma automática, pois o VB 5.0 disponibiliza um modo automático de comunicação através da propriedade "LinkMode". Um exemplo de comunicação estabelecida de modo automático está transcrito a seguir:

**'Recebe comando para Ligar Bomba de Rede Hidráulica**

**DDEReceive(0).LinkMode = vbLinkNone**

**DDEReceive(0).LinkTopic = "Excel[Pasta1]Plan1"** (indica o aplicativo)

**DDEReceive(0).LinkItem = "L2C1"** (indica o item)

**DDEReceive(0).LinkMode = vbLinkAutomatic** (indica o modo de comunicação)

Onde o objeto DDEReceive é um textbox.

O modo automático será utilizado para todos os sinais que irão ser enviado do controlador para planta, pois, à priori, não se sabe quando todas as pré condições serão satisfeitas para que se energize o atuador.

Para enviar sinal para o controlador utilizou-se o modo manual, pois são estados que a planta vai atingir no decorrer do processo e que são as pré condições para energizar os atuadores. Como é a planta que envia o sinal pode-se criar uma função única que apenas são passados os parâmetros item e tópico, como na sintaxe abaixo:

**Private Sub EnviaSinalPlc(valor As Single, Item As String, Topico as string )**

**DDESend.LinkMode = vbLinkNone**

**DDESend.Text = valor**

**DDESend.LinkTopic = Topico**

**DDESend.LinkItem = Item**

**DDESend.LinkMode = vbLinkManual** (estabelece comunicação manual)

**DDESend.LinkPoke**

**End Sub**



Estabelecidas as funções de comunicação acima descritas, basta preencher os textboxes da tela de comunicação para proceder a simulação a seguir.

The screenshot shows a software window titled 'Comunicação DDE/Parâmetros'. It has two tabs: 'Comunicação' and 'Parâmetros do Objeto de Controle'. The 'Comunicação' tab is active, showing two main sections: 'Recebe Sinal da Planta' (Receives Signal from the Plant) and 'Envia Sinal para a Planta' (Sends Signal to the Plant). Each section contains a grid of controls for DDE communication, with fields for 'Tópico' (Topic) and 'Item' (Item).

Recebe Sinal da Planta			Envia Sinal para a Planta		
Ligar Sistema	Avião na Posição	Automação	Ligar Rede Hidráulica	Desligar Rede Hidráulica	Pressurizar Tanques
Tópico: DDEIsucoma	Tópico: DDEIsucoma	Tópico: DDEIsucoma	Tópico: DDEIsucoma	Tópico: DDEIsucoma	Tópico: DDEIsucoma
Item: MW8	Item: MW15	Item: MW22	Item: MB52	Item: MB52	Item: MB42
Emergência	Tanques Pressurizados	Tanques Despressurizados	Despressurizar Tanques	Pressurizar Freio	Despressurizar Freio
Tópico: DDEIsucoma	Tópico: DDEIsucoma	Tópico: DDEIsucoma	Tópico: DDEIsucoma	Tópico: DDEIsucoma	Tópico: DDEIsucoma
Item: MW10	Item: MW20	Item: MW26	Item: MB46	Item: MB50	Item: MB50
Freio Desligado	Freio Ligado	Tire Trecionada	Levar Shuttle p/ Pos. Inicial	Avançar Retrator	Retornar Retrator
Tópico: DDEIsucoma	Tópico: DDEIsucoma	Tópico: DDEIsucoma	Tópico: DDEIsucoma	Tópico: DDEIsucoma	Tópico: DDEIsucoma
Item: MW36	Item: MW36	Item: MW14	Item: MB54	Item: MB62	Item: MB64
Tire Destrecionada	Retrator ao Início	Retrator ao Fim	Avançar Defletor	Levantar Defletor	Tacionar Tires
Tópico: DDEIsucoma	Tópico: DDEIsucoma	Tópico: DDEIsucoma	Tópico: DDEIsucoma	Tópico: DDEIsucoma	Tópico: DDEIsucoma
Item: MW32	Item: MW34	Item: MW38	Item: MB48	Item: MB56	Item: MB44
Rede Hid. Pressurizada	Rede Hid. Despressurizada	Defletor Levantado	Destacionar Tires	Lançar Avião	
Tópico: DDEIsucoma	Tópico: DDEIsucoma	Tópico: DDEIsucoma	Tópico: DDEIsucoma	Tópico: DDEIsucoma	
Item: MW12	Item: MW12	Item: MW24	Item: MB60	Item: MB58	
Defletor Arriado	Shuttle na Posição Inicial	Shuttle na Posição Final			
Tópico: DDEIsucoma	Tópico: DDEIsucoma	Tópico: DDEIsucoma			
Item: MW28	Item: MW18	Item: MW30			

Figura 25 – tela (“form”) de comunicação/parâmetros da planta.

Na figura acima, os tópicos e itens são relativos ao CLP, o que pode ser alterado para que a comunicação seja estabelecida com outro controle que admite a troca de dados via DDE. Os tópicos e itens foram relativos ao CLP, pois, para validar o controle e software simulador da planta, era necessário utilizar um controlador, que na ocasião, só havia o CLP.

Foi também importante dividir os sinais entre aqueles que serão enviados da planta para o controlador e vice-versa. Assim, torna-se mais fácil para o operador/usuário visualizar os sinais que partem do software para o controlador e vice-versa.

### 11.1.2 Estabelecimento dos Parâmetros:

Desde o início uma das maiores preocupações era fazer os objetos mais genéricos possível. Então, os parâmetros dos elementos dos objetos de controle podem

ser configurados para cada diferente simulações (embora possa-se alterar os valores dos parâmetros, o software simulador está baseado no processo existente no NAeL Minas Gerais). Para que isso fosse possível, criou-se uma tela de configuração de parâmetros dos elementos do objeto de controle.

**Comunicação ODE/Parâmetros**

**Tanque**

- Volume: 14 m3
- P<sub>trab</sub>: 1.5 Mpa
- P<sub>max</sub>: 3 Mpa
- P<sub>rede</sub>: 3 Mpa
- Varredura: 100 ms
- Constante do gás (R): 0.287 kJ/Kg K
- Temperatura do gás de alimentação: 360 K
- Constante K do gás: 1.4
- Área da seção de entrada do tanque: 126000 mm²
- Área da seção de saída do tanque: 126000 mm²

**Rede Hidráulica**

- P<sub>trab</sub>: 0.1 Mpa
- P<sub>máx</sub>: 0.5 Mpa
- Constante: 0.05
- Varredura: 100 ms

**Lançadeira**

- Área do pistão: 141371 mm²

**Pistão**

- Tamanho da Pistão: 100 m

**Aeronave**

- Massa: 10000 Kg
- Coefficiente de arrasto aerodinâmico: 1 Kg/m

**Tira**

- T<sub>máx</sub>: 1 Mpa
- T<sub>trab</sub>: 0.8 Mpa
- Constante elástica da tira: 19360 N/m
- Velocidade de tracionamento da tira: 0.1 m/s

**Defletor de Jatos**

- Vazão: 1 l/s
- Área do Pistão: 31416 mm²
- Dimensão do Pistão Recolhido (r1): 0.58 m
- Distância entre Apoios (r): 1 m
- Dimensão do Defletor (r2): 0.58 m
- Inclinação da reta que une os apoios (teta): 60 graus
- Inclinação final do defletor de jatos (teta3): 90 graus
- Área da seção reta da haste: 6361 mm²

**Ajuda**

**OK**

Figura 26 - tela ("form") de comunicação/parâmetros da planta.

Neta tela, preocupou-se em dividi-la em termos dos elementos do objeto de controle.

Aqui, novamente, os valores preenchidos nos textboxes são os valores próximos ao da planta real. Com relação à massa e coeficiente de arrasto aerodinâmico da aeronave, são valores que não foram verificados se são compatíveis com o avião que atualmente é lançado do Minas Gerais, mas se não houver correspondência com os valores reais, basta alterar os valores destas variáveis e realizar a simulação.

No "frame" do defletor de jatos, encontram-se os parâmetros necessários para a sua simulação. A determinação de alguns parâmetros é de difícil visualização, como por exemplo  $r$ ,  $r_1$ ,  $r_2$ , etc. Para sanar qualquer dúvida em relação a estes parâmetros, basta "clique" em "Ajuda" que um esquema da disposições dos parâmetros são visualizados,

mostrando todas as relações entre as variáveis indicadas por  $r$ ,  $r_1$ ,  $r_2$ , etc. e as dimensões do refletor.

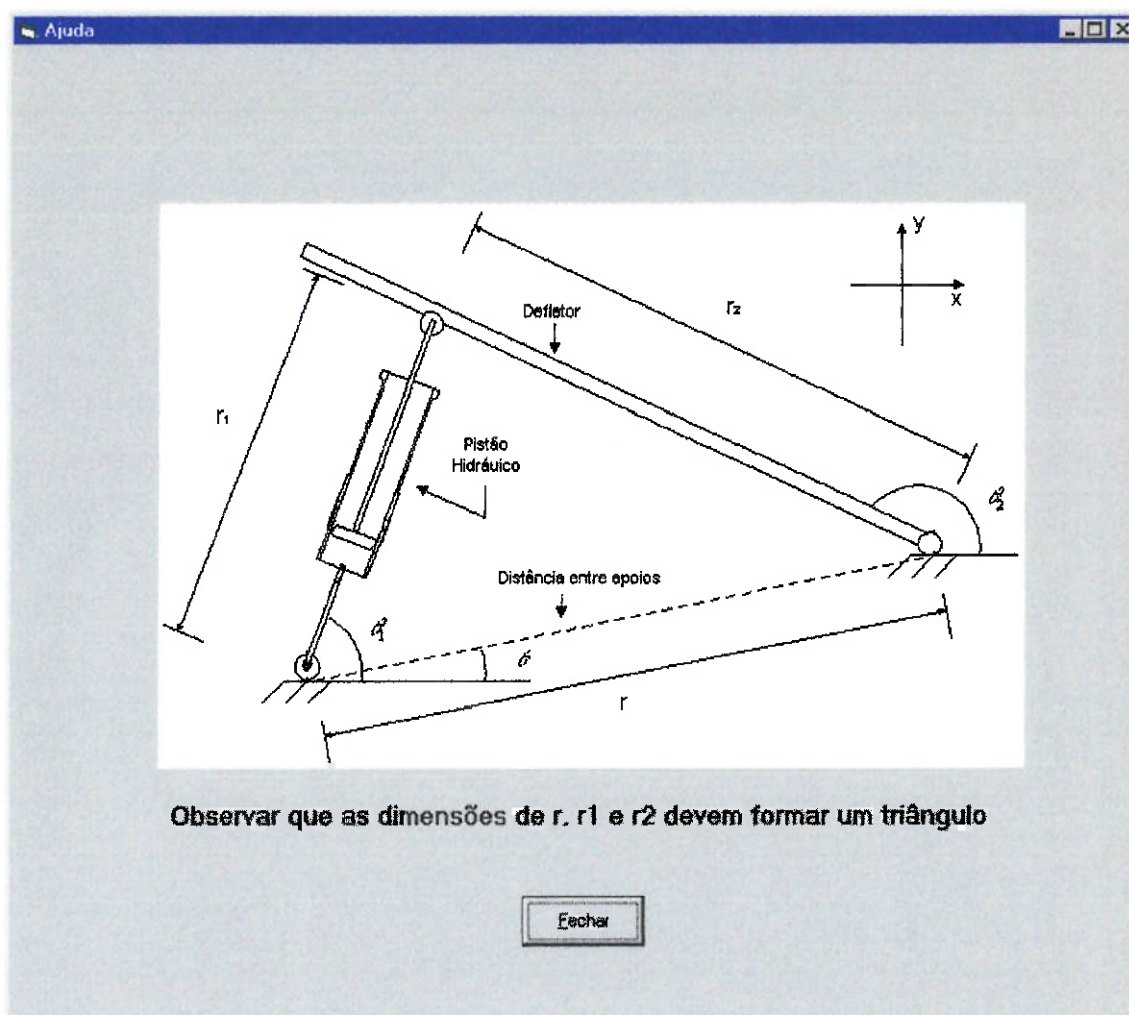


Figura 27 - tela ("form") de Ajuda na determinação dos parâmetros a serem inseridos na configuração.

Com esta tela de Ajuda é possível visualizar os parâmetros do defletor que são requeridos pela tela de Comunicação/Configuração dos parâmetros da planta.

## 12 Implementação Computacional dos Elementos do Objeto de Controle:

No capítulo 9 foi feita a modelagem dos principais elementos do objeto de controle de forma contínua, ou seja, na forma diferencial representado pelo elemento diferencial  $dt$ . Aqui, o elemento infinitesimal  $dt$ , que tende a zero, será substituído pelo elemento finito  $\Delta t$ , que nesta simulação será de aproximadamente 50ms. Durante este intervalo de tempo  $\Delta t$ , as propriedades serão consideradas constantes. Isto será melhor explicado a seguir.

### 12.1 Reservatórios de Vapor:

Este elemento se caracteriza por duas situações bem distintas que são o enchimento e o esvaziamento dos reservatórios. Cada situação terá sua característica peculiar, conforme visto no item 9.1.

#### 12.1.1 Processo de Enchimento:

Neste processo ocorre o fenômeno da blocagem da vazão mássica, já explicado no item 9.1. Enquanto a pressão no interior dos reservatórios não atingir a pressão crítica, a vazão mássica permanece constante. Então, a primeira providência é determinar, de acordo com o estado do vapor de alimentação, qual é a pressão crítica. Ao se iniciar o enchimento (quando a planta recebe do controlador o sinal para abertura da válvula de fluxo – vide fig. 20 item 10.2.1), o método *pressuriza tanque* é chamado, e em sendo chamado, este método calcula a pressão crítica e a vazão mássica para a condição de enchimento bloqueado.

#### Public Sub PressurizaTanque()

If RelogioHabilitado = False Then     'Liga relógio

Set Relogio = New XTimer

Relogio.Interval = 50

Relogio.Enabled = True

RelogioHabilitado = True

setado = True

End If



```

Pmax = 0.101325 + Pmax
K1 = (K / (K - 1))
K2 = (K - 1) / 2
PressaoNaLinha = 0.101325 + PressaoNaLinha 'Pressão de alimentação
PressaoCritica = PressaoNaLinha * (2 / (K + 1)) ^ K1 'Cálculo da pressão crítica
TemperaturaCritica = Temperatura * (2 / (K + 1))
massaponto = areaent * PressaoNaLinha * 1000000 * (2 * K / ((K - 1) * R * 1000
* Temperatura) * ((PressaoCritica / PressaoNaLinha) ^ (2 / K) - (PressaoCritica /
PressaoNaLinha) ^ ((K + 1) / K)) ^ 0.5)
enche = True
End Sub

```

Porém antes de calcular tais valores, este método "cria" um relógio que será disparado de um intervalo  $\Delta t$ , para atualizar o estado interno do vapor a cada  $\Delta t$  milissegundos. Então, a cada  $\Delta t$  o valor da massa no interior dos reservatórios será:

$$m(i+1) = m(i) + AP_0 \left\{ \frac{2k}{(k-1)RT_0} \left[ \left( \frac{P(i)}{P_0} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P(i)}{P_0} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \Delta t \quad (44)$$

Como comentado anteriormente, a vazão mássica durante o intervalo  $\Delta t$  é considerado constante, pois na Eq. 44 essa é multiplicada por  $\Delta t$ . Para se atualizar a pressão interna:

$$P(i+1) = m(i+1) \cdot R \cdot T(i) \quad (45)$$

Como o processo foi considerado que é adiabático, logo terá variação na temperatura interna do tanque. Esta nova temperatura será dada por:

$$T(i+1) = \frac{P(i+1) \cdot m(i)}{P(i) \cdot m(i+1)} \quad (46)$$

A Eq. 46 vem da equação universal dos gases perfeitos:

$$R = \frac{P_1 V_1}{m_1 T_1} = \frac{P_2 V_2}{m_2 T_2} \quad \text{ou} \quad T_2 = \frac{P_2 m_1}{P_1 m_2} \quad (47)$$

Este cálculo vai sendo realizado iterativamente até que a pressão interna ultrapasse a pressão crítica.

**If enche = True Then**

**If Pressao <= PressaoCritica Then** 'Enquanto a pressão interna não ultrapassa a pressão crítica

**massa = massa + (massaponto \* varredura) / 1000**

**Pressao = massa \* R \* TemperaturaCritica / (1000 \* Volume)**

**TemperaturaInt = TemperaturaCritica**

**Else** 'Quando a pressão interna ultrapassa a pressão crítica

**pressaoant = Pressao**

**massaant = massa**

**massaponto = areaent \* PressaoNaLinha \* 1000000 \* (2 \* K / ((K - 1) \* R \* 1000 \* Temperatura) \* ((Pressao / PressaoNaLinha) ^ (2 / K) - (Pressao / PressaoNaLinha) ^ ((K + 1) / K)) ^ 0.5)**

**massa = massa + (massaponto \* varredura) / 1000**

**Pressao = massa \* R \* TemperaturaInt / (1000 \* Volume)**

**TemperaturaInt = Pressao \* TemperaturaInt \* massaant / (pressaoant \* massa)**

**End If**

VARREDURA é o intervalo de tempo em que esta rotina será disparada. Como a unidade está em ms, divide-se por 1000 para transformar em seg.

Quando a pressão interna ultrapassa a pressão crítica, os valores de vazão mássica deve ser recalculado a cada intervalo de tempo  $\Delta t$ . Atingindo a pressão de trabalho, dispara-se o evento *pressurizou tanque* sendo este sinal enviado ao controlador (vide fig. 20, item 10.2.1).

**If Pressao >= Ptrab Then**

**Relogio.Enabled = False** 'Desliga relógio

**Set Relogio = Nothing**

```
ReligioHabilitado = False
setado = False
TanquePressurizado = True
Pressao = Ptrab
RaiseEvent PressurizouTanque    'Dispara evento
```

Disparando o evento *pressurizou tanque*, significa o fim do enchimento.

#### 12.1.2 Processo de Esvaziamento:

Neste processo não ocorre o fenômeno da blocagem da vazão, pois conforme explicado no capítulo 9 , item 9.1, as propriedades à montante do bocal variam, logo a vazão mássica deve ser calculada a cada instante  $\Delta t$ .

Ao se iniciar o esvaziamento (quando a planta recebe do controlador o sinal para abertura da válvula de exaustão – vide fig. 20 item 10.2.1), o método *despressuriza tanque* é chamado, e em sendo chamado este método liga o relógio e calcula a vazão mássica.

#### Public Sub DespressurizaTanque()

```
If ReligioHabilitado = False Then    'Liga relógio
    Set Religio = New XTimer
    Religio.Interval = 50
    Religio.Enabled = True
    ReligioHabilitado = True
    setado = True
End If
PressaoNaLinha = 0.101325
massaponto = areasaida * Pressao * 1000000 * (2 * K / ((K - 1) * R * 1000 *
Temperatura) * ((PressaoNaLinha / Pressao) ^ (2 / K) - (PressaoNaLinha /
Pressao) ^ ((K + 1) / K)) ^ 0.5)
enche = False
End Sub
```

Na despressurização, a pressão na linha é a pressão atmosférica para onde o ar está sendo descarregado (a equação de massaponto é diferente do que por ocasião do enchimento).

Atingindo a pressão zero (efetiva), o evento *atingiu pressão zero* é disparado sendo este sinal enviado para o controlador (vide fig. 20, item 10.2.1).

```
ElseIf Pressao <= 0.01 And enche = False Then
    Pressao = 0
    RaiseEvent MudouPressao
    Relogio.Enabled = False
    Set Relogio = Nothing
    RelogioHabilitado = False
    setado = False
    RaiseEvent AtingiuPressaoZero 'Dispara evento
End If
```

O evento *despressurizou tanque* significa o fim do esvaziamento.

Tanto no enchimento quanto no esvaziamento o evento *mudou pressão* é disparado para atualizar a barra de progressão na tela do painel de controle e monitoração da planta (vide fig. 25).

## 12.2 Tiras de Selagem

Para este elemento o tracionamento e o destracionamento são simétricos, isto é, a dinâmica para o tracionamento é semelhante ao destracionamento a menos de um sinal de orientação do motor. Logo, não há necessidade de dividir em tracionamento e destracionamento.

As equações de tracionamento, obtida na Eq. 20, podem ser rescrita da seguinte forma:

$$\sigma(i+1) = \sigma(i) + \frac{K \omega r}{A} \cdot \Delta t \quad (48)$$

Onde aqui, mais uma vez, a exemplo dos reservatórios de vapor, a velocidade de tração no intervalo  $\Delta t$  foi considerado constante.

Quando se inicia o tracionamento, o controle envia um sinal para ligar o motor tracionador (vide fig. 23, item 10.2.4) o método *traciona* é chamado. Então liga-se o relógio e atribui valor 1 para a variável *direção*, indicando que está no estado de tracionamento para o programa.



**Public Sub Traciona()**

**Direcao = 1**

**If RelogioHabilitado = False Then**

**Set Relogio = New XTimer**

**Relogio.Interval = 50**

**Relogio.Enabled = True**

**RelogioHabilitado = True**

**setado = True**

**End If**

**End Sub**

Como este método "liga" o relógio num intervalo de 50 ms, a sua implementação, ficou:

**Private Sub Relogio\_Tick()**

**Relogio.Interval = varredura**

**Tracao = Tracao + K \* Direcao \* VelTracaoTira \* (varredura / 1000) / area**

**If Tracao >= Ttrab Then**

**Relogio.Enabled = False** 'Desliga relógio

**Tracao = trab**

**Set Relogio = Nothing**

**RelogioHabilitado = False**

**setado = False**

**TiraTracionada = True**

**RaiseEvent AtingiuTtrab** 'Dispara evento

**ElseIf Tracao <= 0 Then**

**Tracao = 0**

**Relogio.Enabled = False** 'Desliga relógio

**Set Relogio = Nothing**

**RelogioHabilitado = False**

**setado = False**

**TiraTracionada = False**

**RelogioHabilitado = False**

**RaiseEvent Destracionou 'Dispara evento**

**End If**

**End Sub**

Atingindo a pressão de trabalho, dispara-se o evento *atingiu ttrab*, que vai enviar sinal para o controle para desligar motor tracionador. Atingindo a pressão nula, dispara-se o evento *destracionou*, que vai enviar sinal para o controle para desligar o motor (para ambos os casos ver fig. 23). Para destracionar basta atribuir o valor -1 para a variável *direção* e disparar o relógio com as mesmas equações vistas acima.

**Public Sub DestracionaTira()**

**Direcao = -1**

**If RelogioHabilitado = False Then**

**Set Relogio = New XTimer**

**Relogio.Interval = 1000**

**Relogio.Enabled = True**

**RelogioHabilitado = True**

**setado = True**

**End If**

**End Sub**

### 12.3 Defletor:

Baseado nas equações do item 9.3, dado o valor de  $|r_1(t)|$  (é conhecido, pois o valor de  $\dot{r}_1$  é conhecido (vide Eq. 29.1)). Assim pode-se Ter:

$$r_1(i+1) = r_1(i) + \frac{Q}{A_{embolo}} \cdot \Delta t \quad (\text{para o caso do avanço do pistão}) \quad (49)$$

$$r_1(i+1) = r_1(i) + \frac{Q}{(A_{embolo} - A_{haste})} \cdot \Delta t \quad (\text{para o caso do retorno do pistão}) \quad (50)$$

Com o valor de  $r_1$  a cada instante  $\Delta t$ , é possível, de acordo com a Eq. 27.1, calcular  $\theta_1$  e  $\theta_2$ , da seguinte forma:

$$\theta_1(i+1) = \alpha \tan \left( \frac{r \sin \theta + r_2 \sin \theta_2(i)}{r \cos \theta + r_2 \cos \theta_2(i)} \right) \quad (51)$$

$$\theta_2(i+1) = \alpha \tan \left( \frac{r_1 \sin \theta_1(i+1) - r \cos \theta}{r_1 \cos \theta_1(i+1) - r \sin \theta} \right) \quad (52)$$

Ao se iniciar o içamento (quando a planta recebe do controlador o sinal para comutar a válvula 2/4 vias – vide fig. 24 item 10.2.6), o método *ativar defletor* é chamado, e em sendo chamado este método liga o relógio e calcula a vazão de óleo.

#### Public Sub AtivarDefletor()

**If RelogioHabilitado = False Then**

**Set Relogio = New XTimer**

**Relogio.Interval = 50**

**Relogio.Enabled = True**

**RelogioHabilitado = True**

**setado = True**

**DefletorBaixo = False**

**r1ponto = vazao \* 1000 / area** 'Calcula a velocidade de avanço do pistão

**radianofinal = AnguloFinal \* pi / 180** 'Transforma em radianos

**embaixo = False**

**End If**

**End Sub**

O relógio é disparado, as novas inclinações são atualizadas e é disparado o evento *mudou posição* a cada 50ms de forma a atualizar a leitura no painel de controle e monitoração da planta (fig. 25).

Atingindo a inclinação final, dispara-se o evento *atingiu alto*, que vai liberar o avião para a decolagem. Para arriar o defletor é chamado o método *desativar defletor* (quando a planta recebe do controlador o sinal para comutar a válvula 2/4 vias – vide fig. 24 item 10.2.6) que calcula a velocidade de retorno do pistão.

#### Public Sub DesativarDefletor()

**If RelogioHabilitado = False Then**

**Set Relogio = New XTimer**

```

Relogio.Interval = 50
Relogio.Enabled = True
RelogioHabilitado = True
setado = True
End If
r1ponto = -vazao * 1000 / (area - AreaHaste)    'Calcula a velocidade de retorno
r1 = r1 + r1ponto * varredura / 1000
DefletorAtivado = False
embaixo = True
End Sub

```

#### 12.4 Retrator:

Para este elemento, a exemplo das tiras, as ações serão semelhantes a menos do sinal da variável *direção*, que indicará se o retrator está avançando sozinho ou retornando com a catapulta encaixada.

Retomando a Eq. 43, a posição do retrator será dada por:

$$s(i+1) = s(i) + v \cdot \Delta t \cdot direcao \quad (53)$$

No avanço, o valor de direção será 1 e no retorno -1.

Com esta característica fica relativamente simples modelar dinamicamente este elemento do objeto de controle, e que, depois de disparar o relógio no método *anda*, da seguinte forma:

```

Private Sub Relogio_Tick()
Relogio.Interval = varredura
Posicao = Posicao + Direcao * Velocidade * (varredura / 1000)
RaiseEvent MudouPosicao    'Dispara evento para atualizar no painel
If Posicao >= PosFinal Then
Posicao = PosFinal
Para
RaiseEvent Avancou        'Dispara evento
Prende
ElseIf Posicao <= PosInicial Then

```

```

Posicao = PosInicial
Para
RaiseEvent Voltou          'Dispara evento
Solta
End If
End Sub
    
```

Neste elemento também aparece o evento *mudou posição*, que vai servir para atualizar na tela do painel a barra de progressão. O método *para* só serve para desligar o relógio e os métodos *solta* e *prende* somente irão informar se o retrator está ou não encaixado com a lançadeira.

### 12.5 Catapulta (lançadeira):

Este elemento é o mais complexo de se modelar, pois as forças atuantes não são fáceis de se medir, conforme debatido no capítulo 9 (item 9.4). Assim a Eq. 41 pode ser rescrita da seguinte forma:

$$a(i+1) = \frac{P(i) \cdot A + F_{\text{empuxo}} - F_{\text{at}} - K \cdot V^2}{m} \quad (54)$$

onde  $P(i)$  é a pressão  $P$  atuando no pistão e  $A$  é a área de aplicação da pressão.

Para se determinar a posição do pistão, pois conforme o pistão avança a pressão atuante diminui, foi determinado primeiro a velocidade para depois a posição. Assim:

$$v(i+1) = v(i) + a(i+1) \cdot \Delta t \quad (55)$$

$$posicao(i+1) = posicao(i) + v(i+1) \cdot \Delta t \quad (56)$$

Aqui, mais uma vez, foram consideradas constantes a velocidade e a aceleração durante o intervalo de tempo  $\Delta t$ . Para se atualizar a pressão, primeiro deve-se atualizar o volume (o volume varia com o deslocamento do pistão):

$$V(i+1) = V(i) + A \cdot v(i+1) \cdot \Delta t \quad (56)$$

$$P(i+1) = \frac{m_{ar} \cdot R \cdot T(i)}{V(i+1)} \quad (57)$$

onde  $A$  é a área do pistão,  $m_{ar}$  é a massa de ar que durante a decolagem é constante, e  $V$  o volume que está contido o vapor em expansão (o seu valor inicial é o volume dos reservatórios).

Por outro lado também ocorre variação na temperatura do vapor, que será atualizada da seguinte forma:

$$T(i+1) = \frac{P(i+1) \cdot V(i+1) \cdot T(i)}{P(i) \cdot V(i)} \quad (58)$$

Esta equação é garantida pela equação universal dos gases:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (59)$$

O método *andar* dispara o relógio responsável pela atualização das propriedades acima descritas, com um intervalo de 50ms. Com isso, a afirmação de que a aceleração e velocidade eram constante no intervalo de tempo de atualização é razoável.

Conforme o pistão se desloca, a pressão interna nos reservatórios cai. Então a pressão do reservatório deve ser atualizada a cada posição do pistão. O evento *mudou posição*, do objeto catapulta, é responsável por esta atualização. Este evento é disparado a cada 50ms (é disparado de dentro da função relógio do objeto shuttle) e atualiza a pressão interna dos reservatórios.

**Private Sub Shuttle1\_MudouPosicao()**

**Shape1(11).FillColor = VERDEESCURO**      'Muda cor no painel indicando que a lançadeira não está mais no início

**ManometroTanque(1).Max = Shuttle1.Pmax**

**If Shuttle1.Posicao < ManometroTanque(1).Max Then**

**If Shuttle1.Posicao < 0 Then**      'Inicializa barra de progressão

**ManometroTanque(1).Value = 0**

**Else**      'Atualiza barra de progressão

**ManometroTanque(1).Value = Shuttle1.Posicao**

**Ptanque(1).Caption = Format\$(Shuttle1.Posicao, "0.00") + " m"** 'Atualiza  
leitor numérico da posição

**End If**

**Else**

**ManometroTanque(1).Value = ManometroTanque(1).Max**

**Ptanque(1).Caption = CStr(Shuttle1.Pmax) + " m"**

**End If**

**If Shuttle1.Posicao >= (Shuttle1.Pmax) Then** 'Muda cor do indicador de posição  
final da lançadeira

**Shape1(13).FillColor = VERDE**

**Else**

**Shape1(13).FillColor = VERDEESCURO**

**End If**

**If Shuttle1.Posicao <= (Shuttle1.Pmax \* 0.01) Then** 'Muda cor do indicador de  
posição inicial da lançadeira

**Shape1(12).FillColor = VERDE**

**Else**

**Shape1(12).FillColor = VERDEESCURO**

**End If**

**If Retrator1.GrabEncaixado = False Then**

**Tanque1.Pressao = Shuttle1.Pressao** 'Atualiza a pressão no reservatório

**End If**

**If chegou = False Then**

**time = time + Shuttle1.varredura**

**celula = "L" + Format\$(i) + "C19"**

**EnviaSinalPLC1 time, celula**

**celula = "L" + Format\$(i) + "C20"**

**EnviaSinalPLC1 Shuttle1.Posicao, celula**

**celula = "L" + Format\$(i) + "C21"**

**EnviaSinalPLC1 Shuttle1.aceleracao, celula**

**celula = "L" + Format\$(i) + "C22"**

**EnviaSinalPLC1 Shuttle1.Velocidade, celula**

'Envia valores de posição,  
velocidade e aceleração para o  
Excel

**i = i + 1**

'Continua...

Toda vez que o relógio da lançadeira dispara, ele chama esta função, que, além de atualizar a pressão dentro dos reservatórios, envia valores de posição, velocidade e aceleração para o Excel, afim de que seja montada uma planilha e, a partir desta, traçar gráficos. Estes gráficos tem importância, pois torna-se mais fácil analisar o comportamento do que está ocorrendo com o avião através de gráficos e dão um tratamento estatístico ao valores obtidos no programa (linha de tendência). Além disto, estes gráficos podem ser gravados com todas as características de um arquivo XLS.

A título de ilustração, este método *mudou posição* carrega imagens no painel da posição em que o avião estaria na pista. Isto pode ser observado na continuação do código do evento abaixo:

**If Shuttle1.Posicao <= 0.1 \* Shuttle1.Pmax Then**

**Image3(0).Picture = aviao1**

**ElseIf Shuttle1.Posicao >= 0.1 \* Shuttle1.Pmax And Shuttle1.Posicao <= 0.2 \* Shuttle1.Pmax Then**

**Image3(0).Picture = nada: Image3(1).Picture = aviao1**

**ElseIf Shuttle1.Posicao >= 0.2 \* Shuttle1.Pmax And Shuttle1.Posicao <= 0.3 \* Shuttle1.Pmax Then**

**Image3(1).Picture = nada: Image3(2).Picture = aviao1**

**ElseIf Shuttle1.Posicao >= 0.3 \* Shuttle1.Pmax And Shuttle1.Posicao <= 0.4 \* Shuttle1.Pmax Then**

**Image3(2).Picture = nada: Image3(3).Picture = aviao1**

**ElseIf Shuttle1.Posicao >= 0.4 \* Shuttle1.Pmax And Shuttle1.Posicao <= 0.5 \* Shuttle1.Pmax Then**

**Image3(3).Picture = nada: Image3(4).Picture = aviao2**

**ElseIf Shuttle1.Posicao >= 0.5 \* Shuttle1.Pmax And Shuttle1.Posicao <= 0.6 \* Shuttle1.Pmax Then**

**Image3(4).Picture = nada: Image3(5).Picture = aviao3**



```
ElseIf Shuttle1.Posicao >= 0.6 * Shuttle1.Pmax And
Shuttle1.Posicao <= 0.7 * Shuttle1.Pmax Then
    Image3(5).Picture = nada: Image3(6).Picture = aviao4

ElseIf Shuttle1.Posicao >= 0.7 * Shuttle1.Pmax And
Shuttle1.Posicao <= 0.8 * Shuttle1.Pmax Then
    Image3(6).Picture = nada: Image3(7).Picture = aviao5

ElseIf Shuttle1.Posicao >= 0.8 * Shuttle1.Pmax And
Shuttle1.Posicao <= 0.9 * Shuttle1.Pmax Then
    Image3(7).Picture = nada: Image3(8).Picture = aviao6

Else
    Image3(8).Picture = nada
End If

End If
End Sub
```

De acordo com este método, a cada mudança de 10% na posição, em relação a posição final, carrega-se uma nova figura e a anterior é descarregada liberando espaço em memória.

## 12.6 Freio:

Este elemento, pela sua dinâmica, não será o fator que afetará o desempenho do objeto de controle como um todo, pois existem outros elementos que possuem uma dinâmica muito mais determinante para o desempenho do objeto de controle. Por se tratar de um elemento que apresenta uma dinâmica rápida, em relação aos demais, a sua pressurização é bem rápida, mas para criar uma pequena dinâmica foi proposta a seguinte dinâmica:

```
Private Sub Relogio_Tick()
    Relogio.Interval = varredura
    Pressao = Pressao + Direcao * VelFreio * (varredura / 1000) 'Dinâmica do freio
    If Pressao >= Ptrabalho Then
```

```

    FreioLigado = True
    Relogio.Enabled = False           'Desliga relógio
    Set Relogio = Nothing
    FreioLigado = True
    RelogioHabilitado = False
    setado = False
    RaiseEvent AtingiuPressao         'Dispara evento
ElseIf Pressao <= 0 Then
    Relogio.Enabled = False           'Desliga relógio
    Set Relogio = Nothing
    FreioLigado = False
    RelogioHabilitado = False
    setado = False
    RaiseEvent AtingiuPressaoNula     'Dispara evento
End If
End Sub

```

onde VelFreio é uma constante que determina a dinâmica do freio e que pode ser calculada de forma empírica e direção indica se o freio está sendo pressurizado ou despressurizado (1 pressurizando e -1 despressurizando)

Os métodos *desligar freio* e *ligar freio* serão os responsáveis pelo disparo do relógio que vai atualizar a pressão a cada instante  $\Delta t$ .

### 12.7 Rede Hidráulica:

Este elemento é bem semelhante ao anterior, uma vez que o fluido de transmissão de energia também é incompressível. Assim, a dinâmica adotada foi bem semelhante ao do freio.

**Private Sub Relogio\_Tick()**

**Relogio.Interval = varredura**

**Pressao = Pressao + Constante \* direção \* (varredura / 1000)** 'Dinâmica da rede

**If Pressao >= Ptrab Then**

```
Religio.Enabled = False           'Desliga relógio
Set Religio = Nothing
ReligioHabilitado = False
setado = False
RedePressurizada = True
Pressao = Ptrab
RaiseEvent PressurizouRede        'Dispara evento
ElseIf Pressao <= 0 Then
    Religio.Enabled = False        'Desliga relógio
    Set Religio = Nothing
    ReligioHabilitado = False
    setado = False
    RedePressurizada = False
    Pressao = 0
    RaiseEvent Despressurizourede  'Dispara evento
End If
RaiseEvent MudouPressao
End Sub
```

onde Constante é semelhante a VelFreio e as mesmas observações feitas para VelFreio valem para Constante, e direção terá comportamento semelhante à variável de mesmo nome descrita no elemento freio.

## 12.8 Xtimer:

Este objeto, que na realidade é uma classe, é o responsável pelos disparos dos relógios de cada elemento do objeto de controle. Esta classe já consta na biblioteca do VB 5.0. Então, todos os objetos criados, que necessitarem de um timer, irão declarar esta classe para poder utilizar todas as propriedades, métodos e eventos. Em todos os objetos criados aparecerá a seguinte linha na sua declaração geral:

```
Private WithEvents Religio As Xtimer
```

Com esta linha de comando, garante-se que todos os eventos, propriedades e métodos de Xtimer sejam incorporados a Relógio. As propriedades de Xtimer utilizado pelos objetos serão:

- Enable → liga (true) ou desliga o relógio;
- Interval → período de amostragem (como já comentado anteriormente, pode ser configurado pelo usuário). A escala de tempo é em ms.

O evento utilizado é:

- tick → este evento será disparado de  $\Delta t$  em  $\Delta t$  ms, onde  $\Delta t$  é o valor atribuído a Interval.

Com isso é possível se realizar a dinâmica do objeto de controle como um todo.

### **13 Metodologia para Transformação do Modelo PFS/MFG para a Linguagem LADDER:**

Para poder validar o controle e a planta, é necessário estabelecer um programa que represente o controle descrito em MFG no capítulo 7. Como a planta se comunica com o controlador através da DDE, é necessário que o controlador suporte este tipo de comunicação. Então para validar o controle e a planta, foi utilizado o CLP (Klocier Müller modelo PS3) como controlador da planta, pois este, além de suportar a comunicação DDE através do seu DDE server, é utilizado largamente na indústria e bastante difundido no mercado.

Para programar o CLP é necessário transcrever o MFG em linguagem LADDER (utilizada pela maioria dos CLP existentes no mercado). Para se estabelecer uma metodologia de transformação, faz-se necessário conhecer as entradas, que no caso são os sensores, e saídas, que são os atuadores, do sistema. Para a sequência de lançamento tem-se :

- Bomba Hidráulica
- Válvula de Exaustão
- Válvula 2/4 Vias
- Válvula de Admissão (flow control valve)
- Bomba de Freio
- Motor do Retrator

Para a sequência do processo de lançamento como um todo:

- Tiras Tracionadas
- Catapulta na Posição Final
- Defletor Arriado
- Freio Pressurizado
- Freio Despressurizado
- Reservatórios Pressurizados
- Retrator na Posição Final
- Retrator na Posição Inicial
- Tiras Destracionadas
- Reservatórios Despressurizados
- Catapulta na Posição Inicial

- Autorização
- Rede Hidráulica Pressurizada
- Rede Hidráulica Despressurizada
- Avião na Posição
- Emergência

Conhecendo-se a entrada e saída do sistema como um todo, pode-se estabelecer uma metodologia que, a partir dos modelos PFS/MFG chega-se à linguagem LADDER. O LADDER DIAGRAM ou diagrama de relês, obtido a partir da metodologia proposta, possui em cada uma das linhas dois relês (ou entradas), um normalmente aberto e outro normalmente fechado, e um atuador (ou saída) que será alimentado caso todas as condições da linha sejam satisfeitas. com isto, basta agora estabelecer esta metodologia de transformação que se baseará no seguintes aspectos:

- 1) O relê ou entrada ou contato normalmente aberto da linha será o sensor da atividade precedente;
- 2) O relê ou entrada ou contato normalmente fechado da linha será o sensor da atividade em questão;
- 3) Estando todas as habilitações de linha satisfeitas, o atuador ou saída será alimentado;

Os critérios acima adotados para o estabelecimento da metodologia de transformação dos modelos PFS/MFG para a linguagem LD, se justificam da seguinte maneira:

- 1) O relê ou entrada ou contato normalmente aberto da linha será o sensor de atividade precedente, pois uma vez satisfeita esta atividade (precedente) a atividade em questão estará habilitada a ocorrer;
- 2) O relê ou entrada ou contato normalmente fechado da linha será o sensor de atividade em questão, pois uma vez satisfeita a atividade em questão, esta mesma atividade será encerrada; e
- 3) estando satisfeitas todas condições da linha, o atuador será alimentado , e estando pelo menos uma das condições não satisfeitas o atuador não será alimentado.

Tal critério torna-se verídico quando passa-se a observar o fluxo vertical. em cada atividade, observa-se duas saídas para o mesmo elemento do objeto de controle (a primeira ativando e a segunda desativando-o) e uma entrada proveniente do sensor.

Seguindo-se a sequência dos boxes da parte de controle, conclui-se que o fluxo vertical que representa a entrada da atividade precedente deve ser representada dentro da RUNG como contato normalmente aberto. Uma vez habilitada a referida gate, o elemento do objeto de controle em questão será ativado através de uma saída correspondente (tal gate é fluxo vertical que representa a primeira saída da atividade em questão).

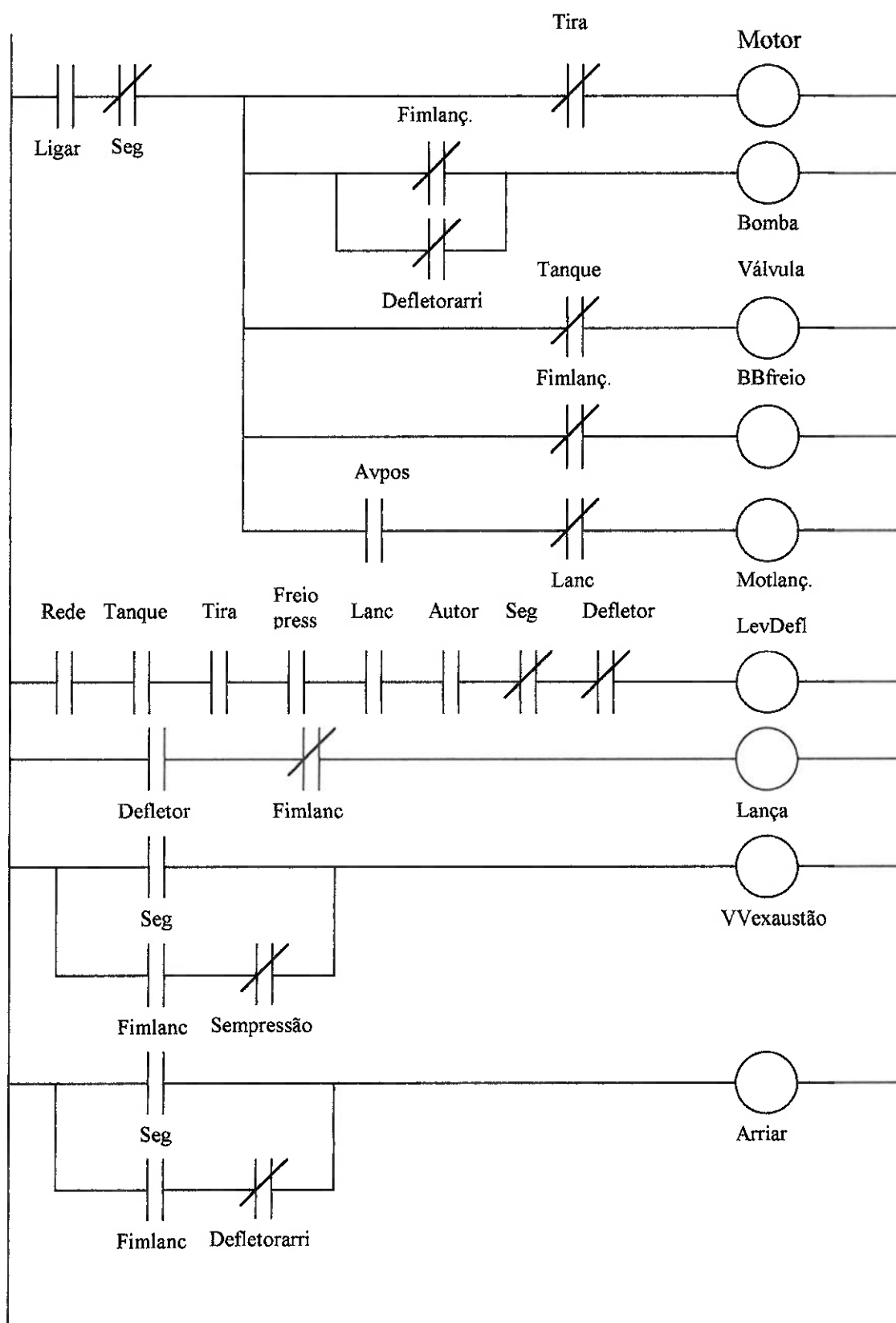
O elemento do objeto de controle em questão permanecerá ativado até que a gate de entrada da referida atividade, que deve ser representada dentro da RUNG como um contato normalmente fechado, seja habilitada (tal gate é fluxo vertical que representa a entrada da atividade em questão).

Quando ocorrer o fato acima, a próxima saída (gate que representa o último fluxo vertical de informação da referida atividade) comandará a desativação do elemento do objeto de controle em questão.

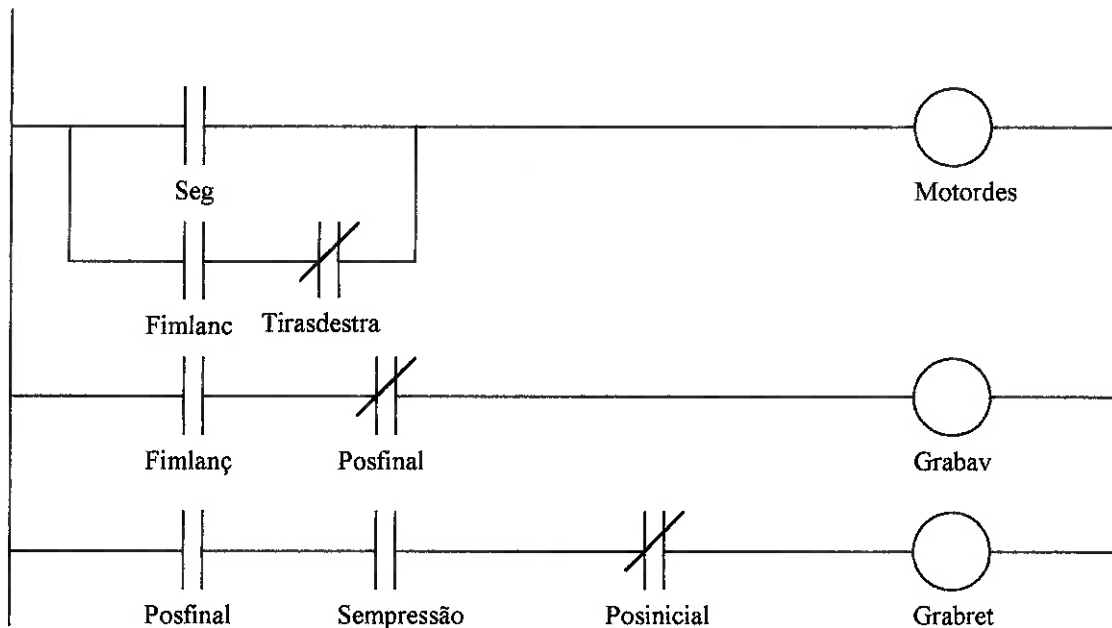
Durante a transformação do MFG para LD, nota-se que, baseado no que foi explicado acima, os únicos boxes que serão efetivamente importante são os que enviam sinais do controle para a planta, e os sinais de fim de processo que a planta envia para o controle (com os respectivos gates associados). Os demais se tornam ocultos durante a transformação de MFG para LD.

## 14 Implementação da Linguagem LD:

Baseado nas informações no capítulo anterior, obteve-se o seguinte diagrama:







Dos relês acima tem-se:

- 1) Seg → representa o sinal de emergência
- 2) Ligar → representa a partida do sistema
- 3) Tira → sensor que indica quando as tiras estão tracionadas
- 4) Fimlanç → sensor que indica quando a lançadeira está na posição final, ou seja, o avião já decolou
- 5) Defletorarri → sensor que indica quando o sensor está totalmente arriado
- 6) Tanque → sensor que indica quando o tanque atingiu a pressão de trabalho (este deve permitir que a pressão seja configurável)
- 7) Avpos → sensor que indica que o sensor encontra-se na posição para que seja engatado pela lançadeira
- 8) lanc → sensor que indica se o avião já foi engatado pela lançadeira
- 9) Rede → sensor que indica quando a rede está pressurizada
- 10) Freiopress → sensor que indica quando a rede hidráulica do freio está pressurizada
- 11) Autor → sinal enviado pelo comandante ou responsável pelo lançamento autorizando o lançamento do avião
- 12) Defletor → sensor que indica quando o defletor está levantado
- 13) Sempressão → sensor que indica quando os reservatórios estão despressurizados
- 14) Tirasdestra → sensor que indica quando as tiras estão destracionadas
- 15) Posfinal → sensor que indica quando o retrator atingiu o fim do curso e engatou na lançadeira

16) Posinicial → sensor que indica quando o retrator retornou com a lançadeira

Das bobinas tem-se:

- 1) Motor → sinal para acionar motor no sentido de tracionar tiras
- 2) Bomba → sinal para ligar a bomba hidráulica do defletor
- 3) BBfreio → sinal para ligar a bomba que pressuriza o sistema freio
- 4) Válvula → sinal para abrir a válvula de admissão (flow control valve)
- 5) Motlanç. → sinal para ligar o motor afim de posicionar a lançadeira para engatar no avião
- 6) LevDefl → sinal para comutar a válvula 2/4 vias para içar o defletor
- 7) Lança → sinal para abrir a válvula de lançamento (lauching valves)
- 8) VVexaustão → sinal para abrir a válvula de exaustão
- 9) Arriar → sinal para comutar a válvula 2/4 vias para arriar o defletor
- 10) Motordes → sinal para acionar o motor no sentido de destracionar tiras
- 11) Grabav → sinal para acionar o motor do retrator no sentido de avançar o mesmo
- 12) Grabret → sinal para acionar o motor do retrator no sentido de retornar o retrator

Cada bobina e sensor indicado no diagrama representam espaços de memória do CLP representados por MX.X, onde M quer dizer memory, e X.X indica o endereço de memória .

Para realizar a comunicação do computador com o CLP, é necessário ler e escrever no CLP. O programa simulando a planta será responsável por escrever nos sensores, quando for disparado algum evento. As bobinas, como são variáveis de saída do CLP , serão lidas pelo programa simulador da planta.

No manual do DDE server do CLP, são mostrados quais são os itens, para a comunicação DDE, associados a cada endereço de memória do CLP. É definido também qual é o tópico e o aplicativo que deve ser utilizado. O tópico é DDE|xxxxxx, onde xxxxxx é o nome da comunicação criada pelo usuário com as respectivas configurações. Estas configurações são estabelecidas pelo usuário dentro do programa do DDE server. Para caso particular desta simulação, foi criada a configuração SUCOMA. Assim ficou DDE|SUCOMA.

## 15 Simulação:

Após tudo modelado, resta simular a integração planta-controle. Este capítulo será dedicado à simulação, afim de mais tarde realizar conclusões a respeito do desempenho do sistema automatizado em relação ao sistema não automatizado.

Para esta modelagem foram adotados os seguintes parâmetros:

- 1) Massa do avião: 15000 Kg
- 2) Dimensão da pista: 80 m
- 3) Tração de trabalho das tiras: 0.8 Mpa
- 4) Área do pistão (lançadeira): 0,251327 m<sup>2</sup>
- 5) Área do pistão (defletor): 0,031416 m<sup>2</sup>
- 6) Vazão de óleo para o defletor: 1 l/s
- 7) Volume dos reservatórios: 26 m<sup>3</sup>
- 8) Pressão de trabalho: 2,8 Mpa
- 9) K: 1,4
- 10) Constante universal dos gases: 0,287 KJ/Kg K

Durante a simulação, a tela principal apresentará o seguinte aspecto por ocasião do setup:

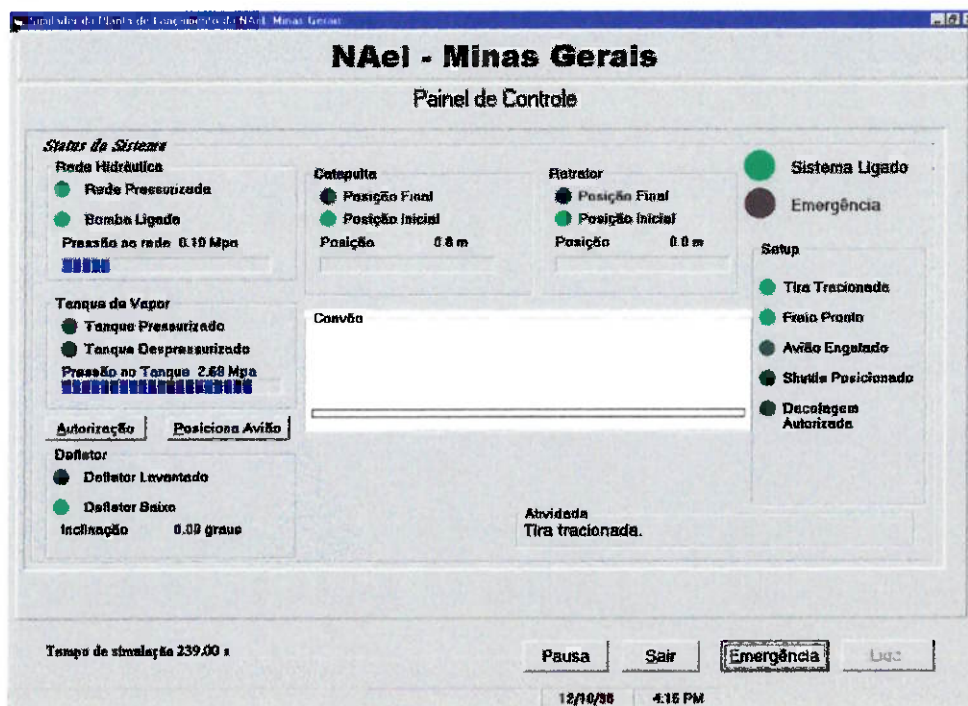


figura 28 – tela principal durante a atividade do setup.

Percebe-se que a pressão dos tanques ainda está aumentando e as condições do setup ainda não estão satisfeitas. A seguir é mostrada a tela durante a atividade de lançamento.

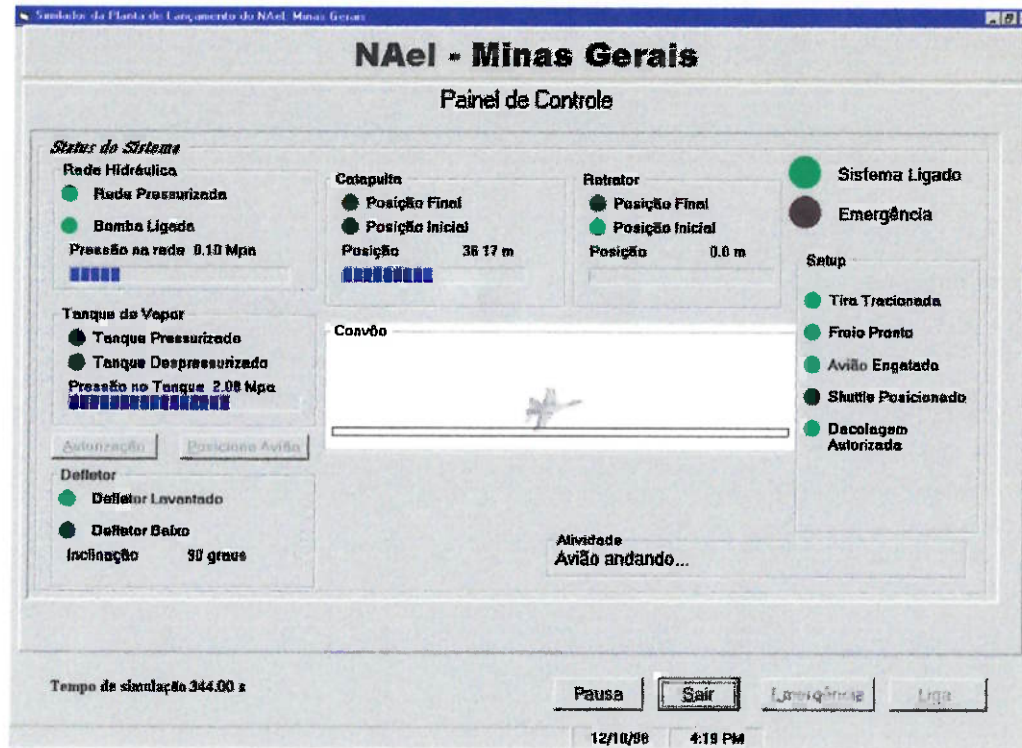


figura 29 - tela principal durante a atividade do lançamento.

Nota-se que o avião já está se deslocando e a pressão do reservatório está diminuindo. A seguir é mostrada a tela durante a atividade de finalização.

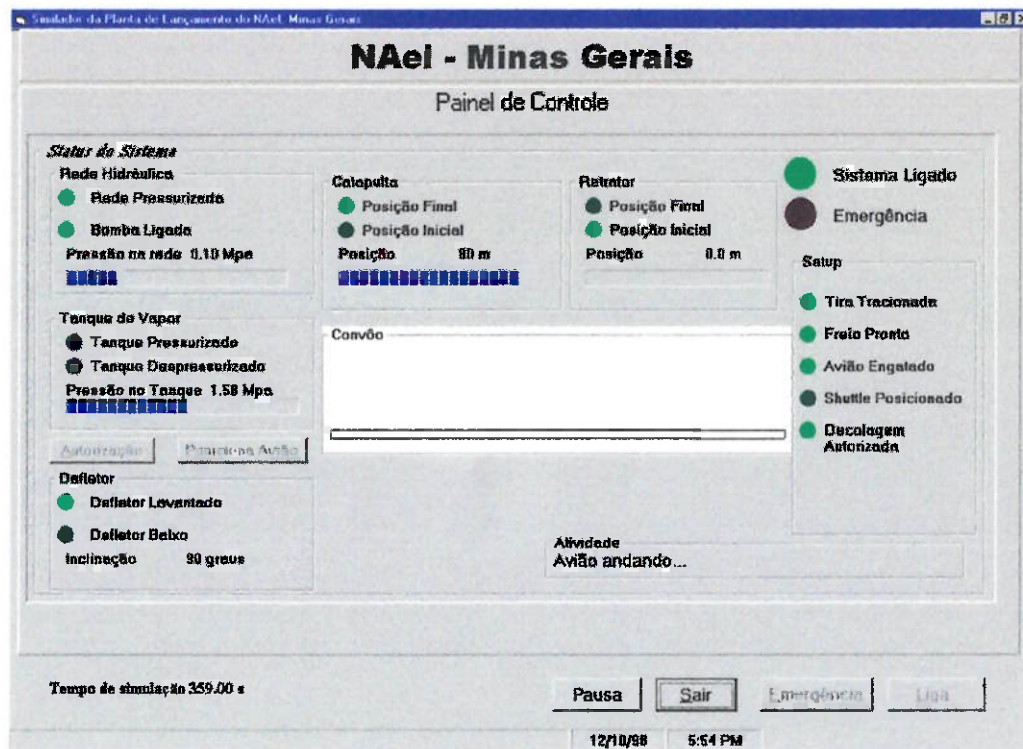


figura 30 – tela principal durante a atividade de finalização.

Ao final do todo o processo, fica disponível para o usuário um tela de resumo com os principais valores de configuração e máximos valores, de importância, obtidos durante a simulação.



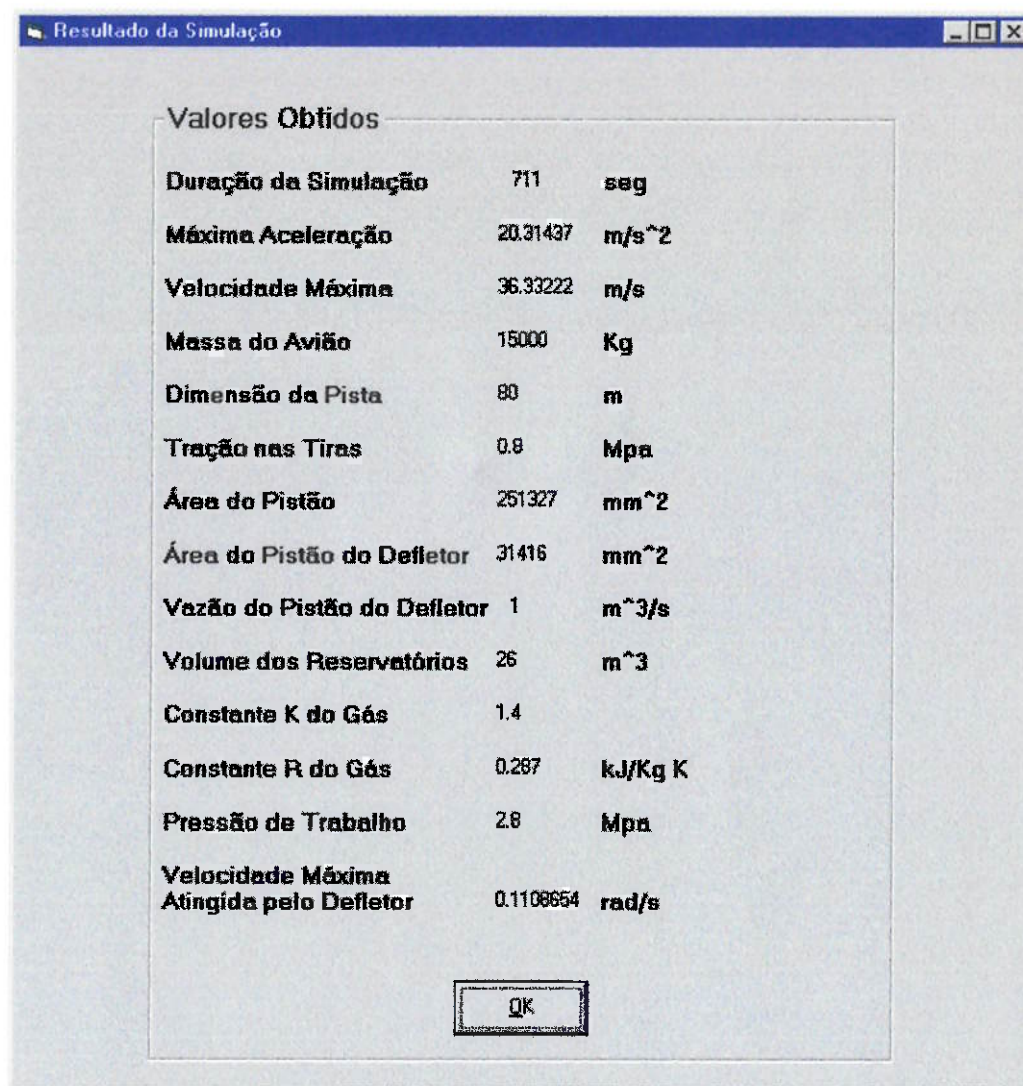


figura 31 – tela de resumo mostrada após a simulação.

Conforme citado anteriormente, o programa escreve valores de posição, velocidade e aceleração. Então, para a simulação acima seguem os seguintes gráficos de posição x tempo, velocidade x tempo e aceleração x tempo:

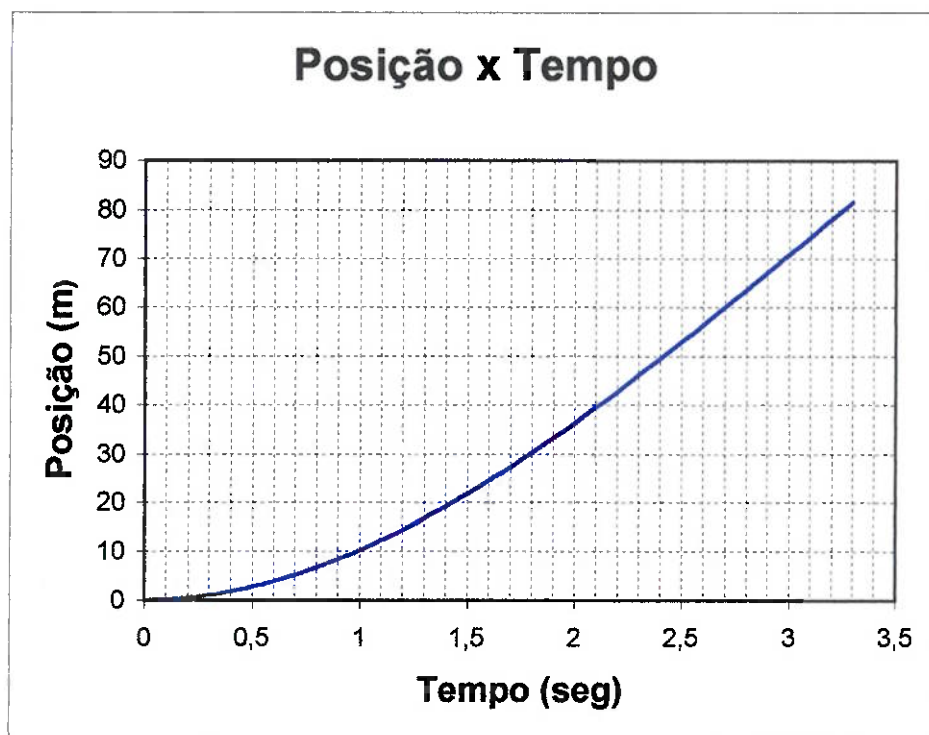


gráfico 1 – posição do avião em função do tempo.

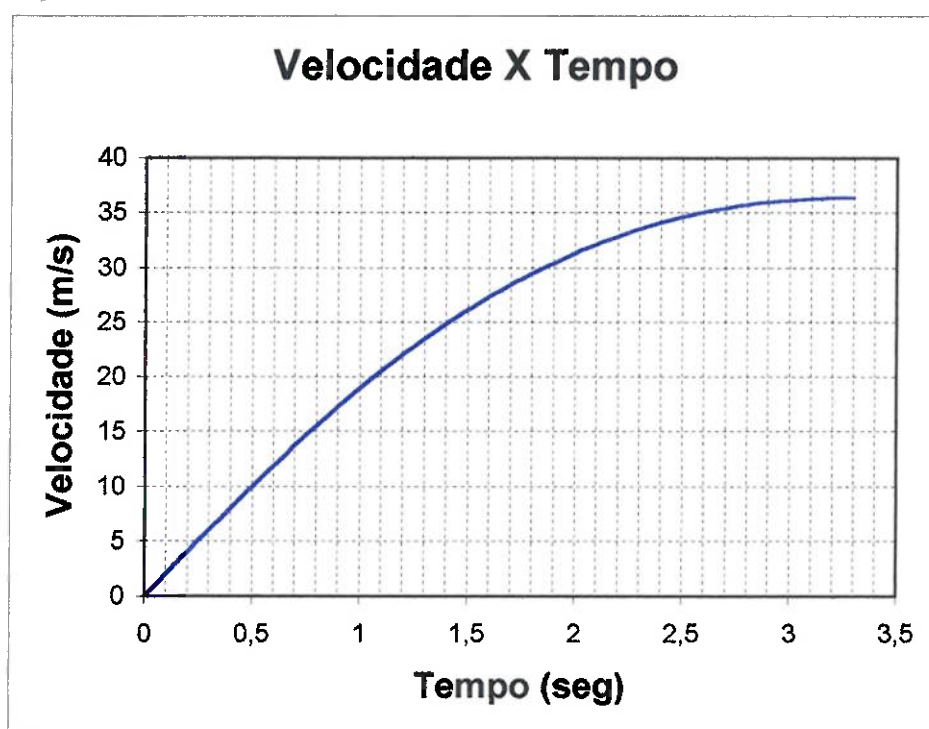


gráfico 2 – velocidade do avião em função do tempo.

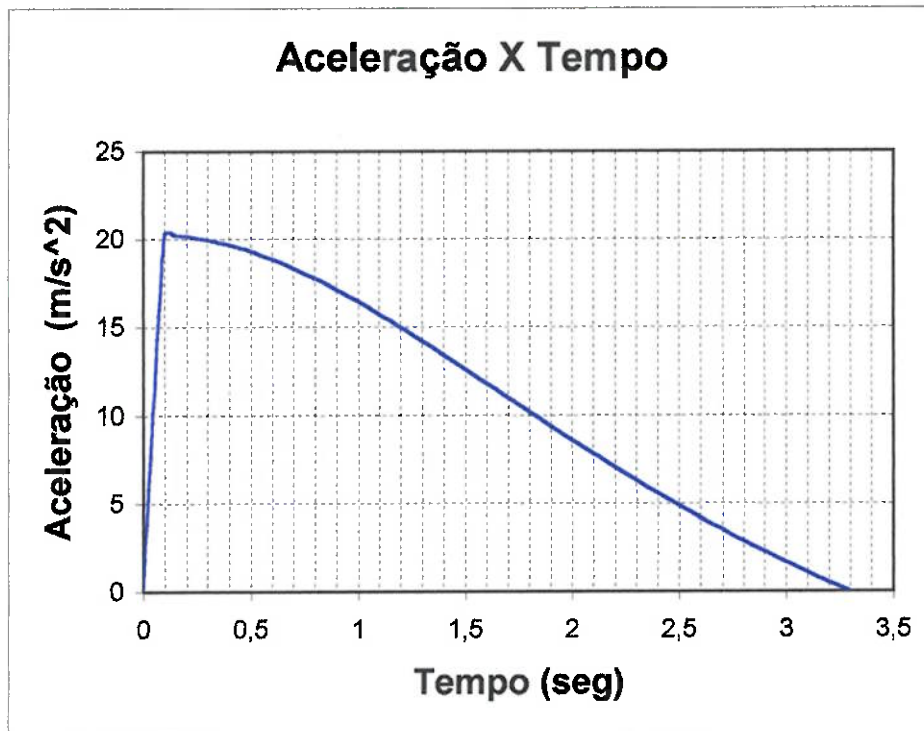


gráfico 3 – aceleração do avião em função do tempo.

Caso estes valores de velocidade, aceleração e posição em função do tempo não apresentarem valores satisfatórios para um determinado tipo de avião, basta alterar os parâmetros da planta para poder se atingir os valores ótimos.



## 16 Problemas Ocorridos na Simulação:

Quanto a simulação do software, a maior dificuldade foi estabelecer a comunicação com o CLP. De acordo com o item 11.1.1, bastava, quando carregasse a tela principal, chamar uma função para estabelecer a comunicação e, a partir daí, a mesma seria realizada de forma automática. Mas este método não funcionou. Então foi feita uma fila de interrupções com uma frequência de amostragem determinada para verificar e atualizar os valores das variáveis de saída do CLP (no caso as bobinas). Esta fila de interrupções causou lentidão no processamento do programa. Desta forma, para melhorar o processamento do programa, conforme uma variável de saída era setada para 1, a interrupção relativa a esta variável era retirada da fila. Com esta, solução o desempenho do programa se mostrou bastante satisfatório.

Esta fila de interrupções foi criada lançando mão de um objeto já existente no VB 5.0. Este é chamado de *timer* e para cada variável de saída foi criado um objeto *timer* dedicado a cada variável de saída do CLP.

A limitação desta solução é que se uma variável é setada para 1 entre duas leituras, a sua atualização só será realizada na próxima amostragem. Quantitativamente falando, se por exemplo a frequência de amostragem for de 1 seg. e a variável de saída for setada no segundo 1,5, a sua atualização só será efetivada 0,5 seg. depois. Isto ocorrendo, para todas as variáveis, causará um pequeno erro de medição do tempo total de simulação. Logicamente este erro é desprezível em relação ao tempo total de simulação e, talvez, desprezível também em relação aos erros inseridos pela a aproximação de  $dt$  (infinitesimal) para  $\Delta t$ .

Baseado nestes aspectos, pode-se dizer que o erro inserido por este método da fila de interrupções é desprezível.

## 17 Conclusão:

Este software de simulação da planta, junto com o programa de controle, admitem as mais diversas configurações da planta para se atingir o ponto ótimo. Com isso, torna-se extremamente menos custoso tentar se aproximar da melhor configuração sem ter que construir protótipos, que além de serem muito caros, há necessidade de cálculos, baseados na teoria da Análise Adimensional, que muitas das vezes são extremamente complexos.

Outro fator a se ressaltar é que, com um sistema controlado, a dependência da habilidade e capacitação do operador em manusear o equipamento é extremamente reduzida, e que para Marinha é muito importante, pois, na Marinha (como nas outras forças armadas) a movimentação de pessoal é intensa. Consequentemente, um operador que está hoje manuseando o equipamento, pode num futuro próximo ser movimentado, com isso haverá necessidade de se treinar novos operadores, o que demanda tempo para que este novo operador se habilite e se capacite.

Certamente, o nível de segurança do pessoal irá aumentar, pois os homens que atualmente manuseiam os elementos do objeto de controle, como a válvula de admissão (que encontra-se a alta temperatura e pode causar danos ao operador quando da sua abertura), os homens que ficam no convão (para fechar a malha), etc. estão expostos às altas temperaturas das turbinas e dos elementos do objeto de controle. E com o advento do controle estes problemas são deveras reduzidos.

Aliado ao dois motivos anteriores, o tempo de lançamento pode ser reduzido em até 50% (no pior caso). Isto também é garantido, pois não irá depender de fatores indiretos que afetam o homem, como humor, distração ao serviço, etc.

O número de falhas do sistema automatizado certamente seria bem menor do que o atual, pois a falha que porventura vier a ocorrer, será falha de hardware o que é bem mais difícil de ocorrer do que a falha humana.

Para se implementar este sistema na planta real, não irá demandar grandes numerários, uma vez que necessitaria de um CLP, alguns sensores de pressão (que podem ser capacitivos ou indutivos) e algumas alterações nos atuadores (a maioria dos atuadores já existem no navio). Com isso o custo ficaria bem reduzido.

Em suma, a automação do sistema aumentaria sensivelmente a eficácia e eficiência do processo, por motivos acima expostos, o que é um requisito essencial para o atual contexto bélico mundial.

## 18 Bibliografia:

- [1] Anderson, J. ° Jr.; *Modern Compressible Flow*. McGraw-Hill, Book Co., NY 1982.
- [2] Faires, V. M.; *Thermodynamics*, 4<sup>th</sup> edition. Macmillan Co., NY 1962.
- [3] Miller, D. S.; *Internal Flow System*, 2<sup>th</sup> edition. Gulf Publ. Co., Houston, TX, USA, 1990.
- [4] Miyagi, P. E.; *Controle Programável*. Edgard Blücher LTDA, São Paulo, SP, 1996.
- [5] Wylen, G. V.; *Fundamentos da Termodinâmica Clássica*. Edgard Blücher LTDA, São Paulo, SP, 1995.
- [6] Hasebrink, J. P.; *Manual de Pneumática*. Rexroth, Divisão de Pneumática, Diadema, SP, 1990.
- [7] Coelho, T.; *Introdução aos Mecanismos (notas de aula)*. EPUSP, Departamento de Engenharia Mecânica, São Paulo, SP, 1993.