

**CONCEPÇÃO E PROJETO DE UMA BANCADA DE TESTES PARA INJETORES  
EM CONDIÇÕES CRÍTICAS COM FLUÍDOS SUPERAQUECIDOS**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
(PIBIC/CNPq/INPE)**

**Luiz Fernando dos Santos Souza (Universidade Federal de Santa Catarina -  
UFSC, Bolsista PIBIC/CNPq)  
E-mail: luiz03fernando11@gmail.com**

**Dr. Heitor Patire Junior (ETE/DMC/INPE, Orientador)  
E-mail: heitor@dem.inpe.br**

**Julho de 2013**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
(PIBIC/CNPq/INPE)**

**PROJETO**

**CONCEPÇÃO E PROJETO DE UMA BANCADA DE TESTES PARA INJETORES  
EM CONDIÇÕES CRÍTICAS COM FLUÍDOS SUPERAQUECIDOS**

PROCESSO: 800042/2012-3

Relatório elaborado por:

Luiz Fernando dos Santos Souza (Universidade Federal de Santa Catarina -  
UFSC, Bolsista PIBIC/CNPq)  
E-mail: luiz03fernando11@gmail.com

Dr. Heitor Patire Junior (ETE/DMC/INPE, Orientador)  
E-mail: heitor@dem.inpe.br

Dr. José Nivaldo Hinckel (ETE/DMC/INPE, Co-Orientador)  
E-mail:

Julho de 2013

**Dados de Identificação:**

**Título do Projeto:**

**CONCEPÇÃO E PROJETO DE UMA BANCADA DE TESTES PARA INJETORES  
EM CONDIÇÕES CRÍTICAS COM FLUÍDOS SUPERAQUECIDOS**

**Processo CNPq N°: 800042/2012-3**

**Bolsista:**

**Luiz Fernando dos Santos Souza**

Acadêmico do curso de Engenharia Aeroespacial  
Centro de Engenharias da Mobilidade – CEM/UFSC  
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

**Orientador:**

**Dr. Heitor Patire Junior**  
ETE/DMC/INPE

**Co-Orientador:**

**Dr. José Nivaldo Hinckel**  
ETE/DMC/INPE

**Colaboradores:**

**Dra. Viviane Lilian Soethe**  
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

**Arthur Deyna**  
Acadêmico do curso de Engenharia Aeroespacial – CEM/UFSC

**Local de Trabalho/Execução do Projeto:**

Centro de Engenharias da Mobilidade – CEM/UFSC

## Sumário

1.	INTRODUÇÃO.....	7
1.1.	Metodologia .....	8
1.2.	Planejamento.....	10
2.	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....	11
2.1.	Levantamento dos requisitos .....	11
2.2.	Concepção geral .....	12
2.3.	Projeto do sistema de abastecimento .....	15
2.3.1.	<i>Dimensionamento dos reservatórios</i> .....	15
2.3.2.	<i>Dimensionamento das linhas de injeção</i> .....	16
2.3.3.	<i>Dimensionamento do abastecimento de fluido de trabalho</i> .....	19
2.4.	Projeto do sistema térmico.....	20
2.5.	Projeto do sistema de pressurização .....	23
2.6.	Projeto do sistema de aquisição de dados .....	26
2.7.	Especificação dos componentes gerais .....	26
2.7.1.	Tubulação.....	26
2.7.2.	Válvulas de passagem .....	26
3.	PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS .....	27
3.1.	Procedimento para abastecimento do reservatório de fluido de trabalho .....	27
3.2.	Procedimento de aquecimento do sistema .....	27
3.3.	Procedimento de pressurização do sistema .....	27
3.4.	Procedimento de condicionamento da tubulação .....	28
3.5.	Procedimento para medição de vazão.....	28
3.6.	Procedimento de testes .....	28
3.6.1.	Ensaio contínuo.....	28
3.6.2.	Ensaio pulsado .....	29
4.	CONCLUSÃO.....	30
5.	REFERENCIAS .....	31

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Fluxograma de trabalho .....	9
Figura 2 Diagrama hidráulico da bancada .....	15
Figura 3 Modelo CAD do reservatório.....	16
Figura 4 Diagrama hidráulico da linha de alimentação de oxidante .....	17
Figura 5 Exemplo de medidor do tipo Vortex.....	18
Figura 6 Cuidados de montagem para o medidor de vazão.....	18
Figura 7 Ilustração de um rotâmetro .....	19
Figura 8 Diagrama hidráulico para o abastecimento dos tanques de fluido de trabalho .....	19
Figura 9 Modelo para o calculo de transferência de calor do reservatório principal. Azul é o interior com fluido de trabalho, a região cinza é a parede do reservatório, a vermelha representa o aquecedor e a bege o isolamento térmico .....	22
Figura 10 Exemplo de sistema de ar comprimido comercial de alta pressão.....	24
Figura 11 - Diagrama do sistema de pressurização .....	25
Figura 12 Válvula reguladora de pressão .....	25

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Cronograma de atividades realizadas .....	10
Tabela 2 Tamanho e contagem de partículas.....	20

## **RESUMO**

Com a necessidade do programa espacial brasileiro em desenvolver tecnologia nacional para seus satélites o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) observou a necessidade de uma bancada de testes para placas injetoras bi e monopropelente utilizando fluidos em condições críticas de superaquecimento.

O presente relatório traz os resultados obtidos no desenvolvimento do projeto no período de 01/08/2012 até 10/07/2013. Neste período foram levantados os requisitos operacionais do equipamento e em seguida traçado a estratégia de projeto para atendê-los. Com isto o diagrama hidráulico do equipamento pode ser desenvolvido assim o projeto dos sistemas necessários e a especificação de seus componentes. Também como resultados foram desenvolvidos roteiros para procedimentos de operação do equipamento, que servirão como manual de instruções para uma operação mais segura do equipamento, e futuramente poderão ser utilizados como base para a automatização da operação do sistema.

O cronograma de projeto estabelecido pelos orientadores foi cumprido, tendo sido concluído as etapas de levantamento dos requisitos do projeto, elaboração do diagrama esquemático da bancada e especificações dos componentes, sendo que o desenvolvimento do projeto em CAD 3D ainda será desenvolvido.

## 1. INTRODUÇÃO

Com a necessidade do programa espacial brasileiro em desenvolver tecnologia nacional para seus satélites o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) observou a necessidade de uma bancada de testes para placas injetoras bi e monopropelente utilizando fluidos em condições críticas de superaquecimento.

Este equipamento possui como principal objetivo fornecer condições adequadas para a caracterização de placas injetoras de propelente, fornecendo o fluido de trabalho em condições pré-estabelecidas e adquirindo informações a cerca de temperatura, pressão e forma do jato de saída. Para atender a todos os requisitos propostos pelos orientadores do projeto, um estudo preliminar foi realizado, tendo em vista a identificação dos subsistemas do equipamento como também sua influencia nos resultados finais. Com este estudo preliminar pode se identificar pontos importantes para o projeto, como a escolha do material que deve ser realizada de forma a não haver nenhum tipo de contaminação do fluido de trabalho, todos os canais de abastecimento do fluido de trabalho como os de fluido de pressurização devem possuir um rígido controle de particulados, também visando a não contaminação do equipamento, o projeto do sistema térmico o qual deve garantir que o equipamento gere as condições desejadas pelo operador, assim como a segurança e qualidade de todos os outros sistemas e subsistemas.

Após a identificação das principais funcionalidades requeridas para o equipamento, seu projeto detalhado pode ser realizado, através da elaboração do diagrama hidráulico e da especificação de todos os componentes. Com estas especificações foi possível desenvolver listas de procedimentos de operação, para que o operador possa ter em mão os passos que deve seguir para o procedimento desejado, assim como buscar as opções de mercado e selecionar as mais indicadas para esta aplicação, fazendo assim um levantamento dos custos para a futura fabricação da bancada.

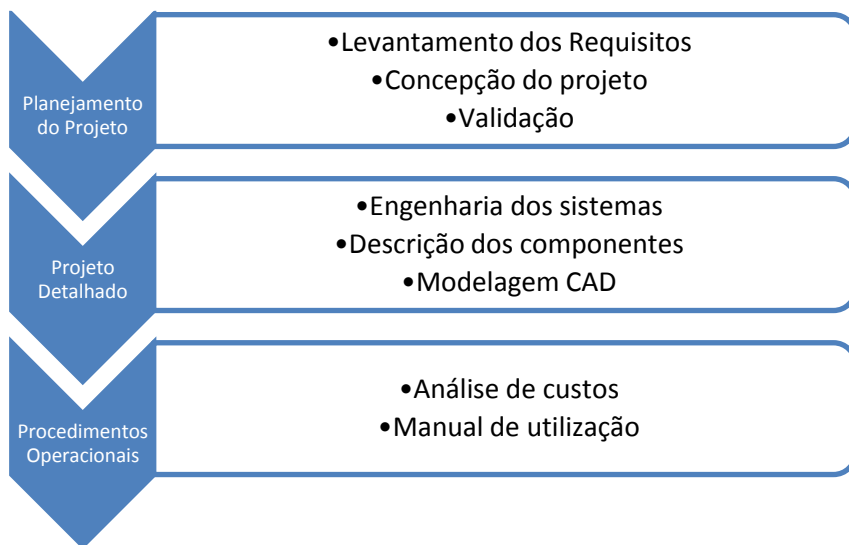
## **1.1. Metodologia**

Para o desenvolvimento deste projeto de produto foi utilizado para seu planejamento e organização parte dos métodos e procedimentos descritos no PMBOK [1], isto devido ao fato de ser um projeto complexo que necessita resolução de um problema não estruturado com diversos sistemas diferentes e que possui um período de tempo limitado para seu desenvolvimento. A organização das informações e a metodologia empregada durante o projeto são de suma importância para o sucesso do mesmo, tendo como principal etapa o planejamento do projeto, etapa na qual, quando bem executada, pode direcionar o desenvolvimento de forma a minimizar as iterações necessárias para se alcançar os objetivos desejados, minimizar o tempo de desenvolvimento e como consequência aumentar a satisfação do cliente.

Neste projeto foi decidido por desenvolver uma fase de planejamento, uma de projeto detalhado e por fim geração de uma série de instruções para a operação do equipamento e também a orçamentação dos componentes para uma futura fabricação. A fase de planejamento se constituiu do levantamento dos requisitos, onde foram realizadas visitas técnicas e entrevistas com os principais interessados no projeto, em seguida com as informações obtidas pode-se desenvolver a estruturação do problema, principalmente, dividindo-o em vários pequenos problemas de simples resolução para que se pudesse elaborar uma concepção de projeto e apresentá-la aos orientadores de forma a obter a validação para que se possa seguir a diante no desenvolvimento. A fase de planejamento foi bem sucedida, precisando apenas realizar poucas iterações na concepção do projeto até que se conseguisse obter a aprovação dos principais interessados. Após a etapa de planejamento, a fase de projeto detalhado fez a análise de cada sistema do equipamento para que a descrição e dimensionamento de cada componente pudessem ser realizados, nesta etapa se enquadra as análises matemáticas para a caracterização e dimensionamento dos sistemas, a elaboração dos diagramas hidráulicos, a geração dos componentes em CAD 3D utilizando o software SolidWorks, assim como outras atividades de engenharia do projeto do produto. Após toda a caracterização do equipamento pode-se realizar as listas de



procedimentos operacionais que servirão de manual de utilização do equipamento, facilitando assim seu manuseio e aumentando a segurança do usuário. Como etapa final, o levantamento dos custos de aquisição dos componentes foi realizado para que se tenha uma estimativa do custo de fabricação do equipamento.



**Figura 1 Fluxograma de trabalho**

Tendo em vista que um dos objetivos do presente equipamento é testar sistemas bi propelente, foi utilizada uma estratégia para simplificar consideravelmente o processo de desenvolvimento do projeto. A estratégia utilizada foi a de realizar em um primeiro momento todo o projeto considerando apenas a utilização de um propelente, e assim que este projeto estivesse pronto, a inserção de uma segunda linha de propelente seria projetada baseada na primeira, com suas devidas alterações. Este método de projeto visou uma redução no tempo de desenvolvimento.

Com a utilização de uma metodologia bem estruturada, obteve-se uma organização inicial muito boa, proporcionando uma base sólida para o desenvolvimento do projeto, evitando assim possíveis desvios de conceito e muitas mudanças durante o desenvolvimento. Desta forma podendo-se atingir resultados satisfatórios.

## 1.2. Planejamento

Tendo em vista que o presente projeto deve ser realizado no prazo de um ano é de suma importância o controle do tempo de duração das atividades para que se possam fazer todas as entregas dentro do prazo estipulado. Para isto, foram utilizados cronogramas de atividades para o controle do tempo das atividades, sendo o principal cronograma estipulado pelo orientador. A baixo segue o cronograma base para o projeto.

Primeira Etapa: Elaboração de documento contendo os requisitos funcionais da bancada: 2 meses

Segunda Etapa: Elaboração de diagrama esquemático da bancada: 1 mês

Terceira Etapa: Especificação das dimensões e características funcionais e operacionais dos equipamentos envolvidos: 6 meses.

Quarta Etapa: Elaboração do projeto CAD-3D da bancada de testes: 3 meses.

A tabela 1 mostra o cronograma das atividades ilustrando o cronograma planejado em cinza, o cronograma realmente executado em verde quando dentro do planejado e em amarelo quando fora do planejado.

Etapa	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago
1	cinza	cinza	azul	azul	azul	azul	azul	azul	azul	azul	azul	azul
	verde	verde	azul	azul	azul	azul	azul	azul	azul	azul	azul	azul
2	azul	azul	cinza	azul	azul	azul	azul	azul	azul	azul	azul	azul
	azul	azul	verde	amarelo	amarelo	amarelo	amarelo	amarelo	amarelo	amarelo	azul	azul
3	azul	azul	azul	cinza	cinza	cinza	cinza	cinza	cinza	azul	azul	azul
	azul	azul	azul	verde	verde	verde	verde	verde	verde	amarelo	azul	azul
4	azul	azul	azul	azul	azul	azul	azul	azul	azul	cinza	cinza	cinza
	azul	azul	azul	azul	azul	azul	azul	azul	azul	verde	azul	azul

**Tabela 1 Cronograma de atividades realizadas**

É possível averiguar que a atividade que mais fugiu ao cronograma estabelecido inicialmente, foi a elaboração do diagrama hidráulico (etapa 2), isto ocorreu pelo fato de que com o desenvolvimento da etapa 3, foi necessário realizar melhorias e alterações no diagrama hidráulico, isto fez com que a etapa 2 se mantivesse ativa pelo mesmo período de tempo que a etapa 3.

O planejamento para o desenvolvimento das atividades estipulado no início do projeto se mostrou bem realista, colaborando para o bom andamento do mesmo, isto pode facilitar o gerenciamento do tempo durante o desenvolvimento e também o controle do estabelecimento e cumprimento de metas.

## 2. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

### 2.1. Levantamento dos requisitos

A partir de visitas técnicas ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais foi possível coletar informações importantes sobre qual o funcionamento desejado pelos orientadores do projeto para a bancada de testes. Este processo foi realizado por meio de reuniões com os orientadores do projeto, onde foi exposta a necessidade de se avaliar as características de elementos injetores, para que seja possível a validação dos modelos utilizados no projeto dos mesmos e também para averiguar seu comportamento real.

Após análises do problema proposto foi possível listar as principais funções desejáveis no equipamento e com isso seus requisitos de projeto. Como requisito geral a bancada deve ser capaz de fornecer fluido de trabalho a determinada temperatura e pressão a um elemento injetor que é o objeto de estudo, ela deve fazer isto da forma mais segura possível. O sistema deve ser capaz de cumprir os seguintes requisitos:

- Pressão máxima de 40 bar no injetor
- Temperatura máxima de 200 graus Celcius
- Variação máxima de 2 graus Celcius na temperatura do fluido durante os testes

- Vazão volumétrica de operação entre 5 a 100ml/s
- Apresentar informações sobre
  - Nível de temperatura no injetor e no tanque de armazenamento
  - Nível de pressão no injetor e no tanque de armazenamento
  - Nível de fluido de trabalho no tanque de armazenamento
  - Vazão no injetor
  - Forma geométrica do cone de saída do injetor

Para atingir estas metas, é de suma importância a análise dos principais sistemas que compõem o equipamento, visto que o nível de precisão principalmente das informações retiradas do equipamento devem ser bastante altas, uma vez que estes dados poderão ser utilizados para pesquisas de ponta no setor aeroespacial.

## **2.2. Concepção geral**

De acordo as informações obtidas nos requisitos do projeto, pode-se avaliar de uma maneira generalizada o conceito do equipamento. Elaborando assim o diagrama hidráulico do projeto, que pode ser visualizado na figura 3. Este conceito é o resultado de algumas iterações de projeto após a análise de alternativas propostas, já considerando a linha de oxidante. Para facilitar o dimensionamento do equipamento como um todo, o mesmo foi dividido em alguns sistemas, para que a composição da análise individual de cada um deles pudesse gerar a solução final do equipamento. O equipamento foi dividido em sistema de aquecimento, sistema de pressurização, sistema de abastecimento e sistema de medição.

O sistema de aquecimento é o mais importante dentro da proposta inicial do equipamento, pois ele que proporcionará a condição de superaquecimento ao fluido de trabalho, para isto ele contará com aquecedores elétricos no reservatório de combustível, que assim como a tubulação até o injetor, deverá ser devidamente isolado para que se tenha a menor taxa de perda de calor possível. O sistema de pressurização será responsável por proporcionar uma pressão extra ao combustível, além da pressão atingida devido ao

aquecimento, e pressurizar o tanque de oxidante para que seja possível a injeção de ambos a condições desejadas pelo operador. No sistema de abastecimento temos os reservatórios de fluido de trabalho, os componentes para garantir sua segurança e o mecanismo necessário para abastecer os reservatórios de combustível e oxidante, com o fluido de trabalho, que neste caso será água deionizada. No sistema de medição temos todos os sensores necessários para que se possa acompanhar o funcionamento do equipamento e verificar se o mesmo está operando nas condições desejadas.

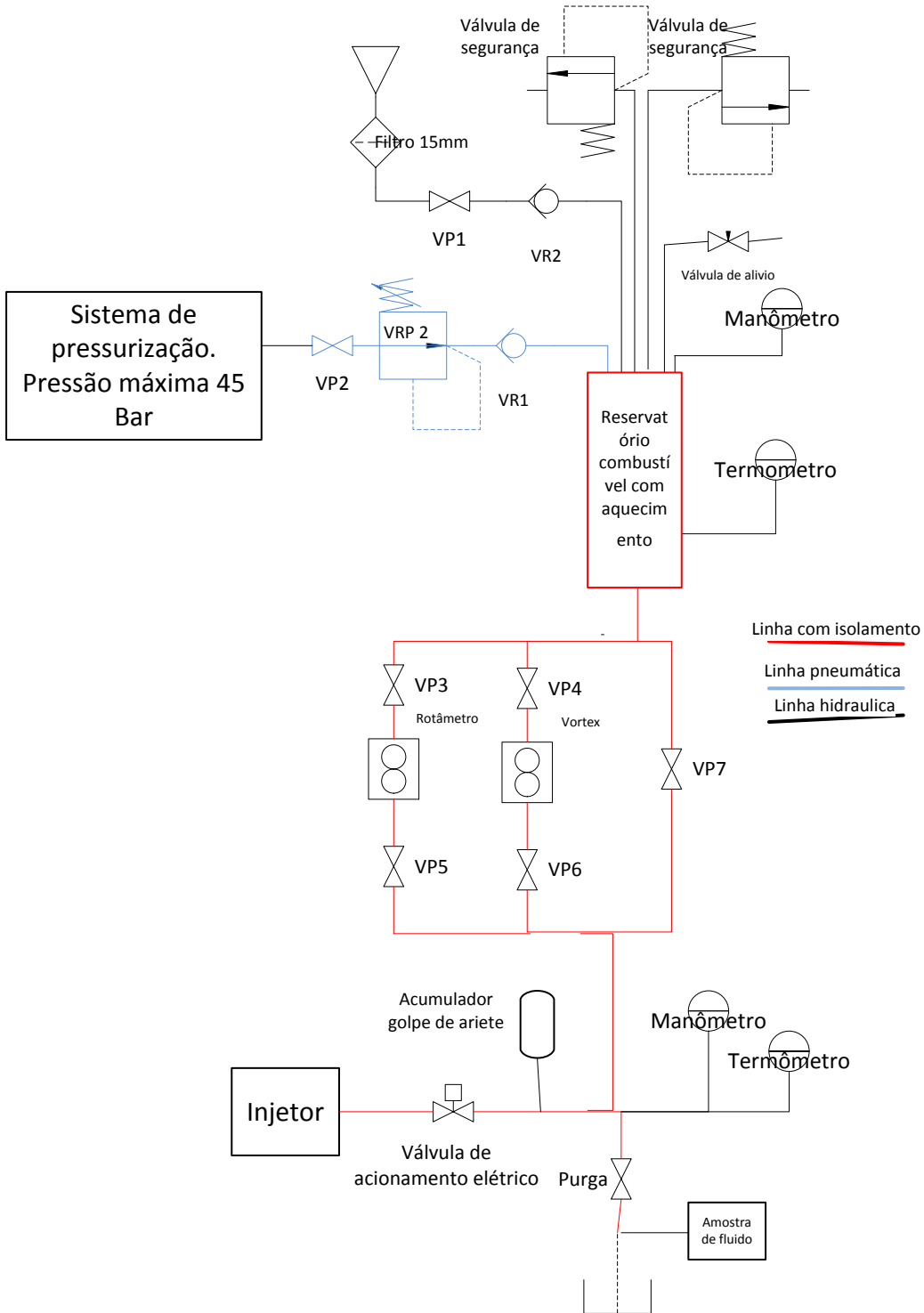


Figura 2 Diagrama hidráulico da bancada

### 2.3. Projeto do sistema de abastecimento

Neste sistema temos como componentes, os reservatórios de fluido de trabalho, seus equipamentos de segurança, a linha dos reservatórios até o injetor e também o sistema de abastecimento de fluido de trabalho para os reservatórios.

#### 2.3.1. Dimensionamento dos reservatórios

O reservatório de combustível o qual possui geometria como mostrado na figura (3) deve comportar 30 litros de fluido de trabalho. Deve ser construído em aço inoxidável e ser resistente a temperaturas de até 300°C e pressões de até 4 vezes a pressão máxima de operação (45 bar), como todos os outros componentes. Este reservatório será envolvido por aquecedores do tipo “cinta térmica” e deverá conter uma camada de isolante térmico, capaz de manter estável a temperatura em seu interior e garantir baixa perda de calor para o ambiente. .

O reservatório conta com duas válvulas de segurança localizadas em seu topo, estas devem ser ajustadas para aliviar a pressão quando o interior do reservatório atinja 45 bar. Também em ambos os reservatórios estão previstos um manômetro para que o operador possa acompanhar a pressão. Termômetros também devem ser instalados.

Sendo a resistência de escoamento do aço inoxidável 200 MPa [2]. Podemos calcular, utilizando as teorias de resistência dos materiais para vasos de pressão, a espessura necessária da parede do reservatório, através da equação 1.

$$t = \frac{P_r r}{\sigma_e}$$

Equação 1

$\sigma_e$ - Tensão de escoamento aço inoxidável (200 MPA)

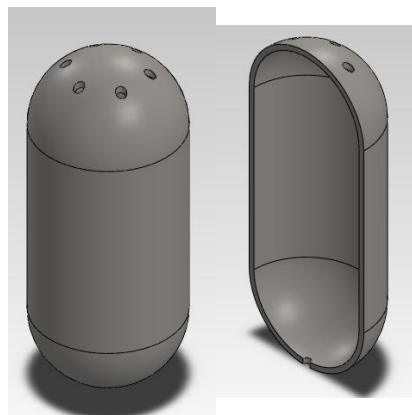
$P_r$ - Pressão interna máxima (180 bar, 18 Mpa)

r- Raio do reservatório

t- Espessura da parede do reservatório

Sendo o reservatório com diâmetro interno de 300 mm e altura da região cilíndrica de 450 mm, os cálculos mostrados resultam em uma espessura de 13,5 mm.

A figura 3 mostra o modelo CAD do reservatório.

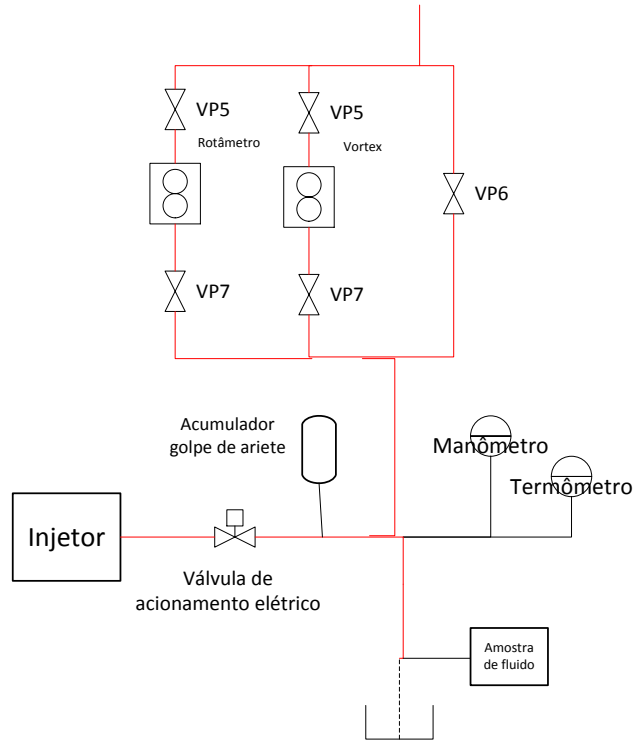


**Figura 3 Modelo CAD do reservatório**

### **2.3.2. Dimensionamento das linhas de injeção**

O diagrama esquemático da linha de injeção pode ser visualizado na figura 4, esta linha liga o reservatório de fluido de trabalho ao injetor.





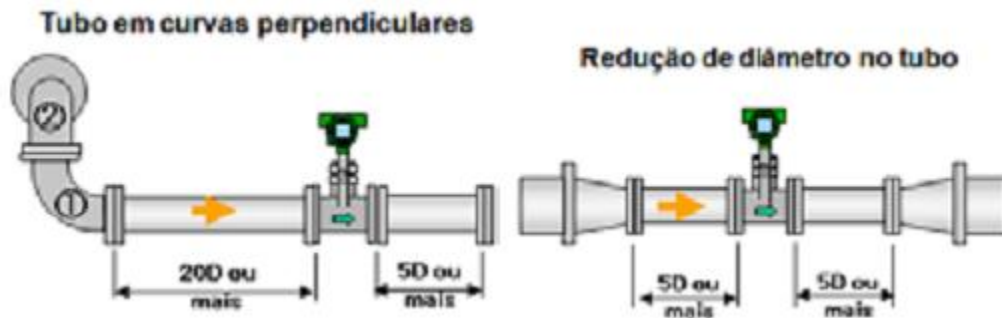
**Figura 4 Diagrama hidráulico da linha de alimentação de oxidante**

Esta linha contém um sistema de medição de vazão que é protegido por válvulas que atuam como “by-pass”. Este sistema de medição é composto por três conjuntos de medidores em paralelo, sendo que cada conjunto possui uma faixa ótima de medição que deverá ser selecionada pelo operador. Um medidor de vazão do tipo Vortex (Figura 5), pode ser implementado para medir vazões maiores que 45 ml/s, atingindo precisões menores que 0,75% do valor medido.



**Figura 5 Exemplo de medidor do tipo Vortex**

Para garantir o bom funcionamento do medidor, a montagem do mesmo deve seguir alguns cuidados. Primeiramente ele deve ser montado em uma tubulação horizontal para possa medir líquidos, gases e vapor. E deve ter os espaçamentos mostrados na figura 4 de acordo com os componentes que o precedem e o sucedem.



**Figura 6 Cuidados de montagem para o medidor de vazão**

Em paralelo com o medidor Vortex, deverá ser instalado um medidor do tipo rotâmetro (figura 7) para medir vazões menores que 45ml/s.



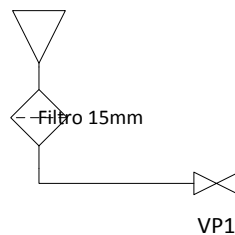
**Figura 7 Ilustração de um rotâmetro**

No fim da linha, em paralelo com o injetor, uma válvula de purga deve ser instalada para que seja possível o escoamento de fluido da tubulação anterior ao injetor.

As válvulas que compõem o sistema “By-pass” serão especificadas na sessão 2.7.2.

### ***2.3.3. Dimensionamento do abastecimento de fluido de trabalho***

Para o abastecimento do reservatório de fluido de trabalho será utilizado uma linha que liga um funil a ao reservatório, isolado por uma válvula que deve ser aberta para que se possa despejar água deionizada para dentro do tanque. O esquema hidráulico para esta função é mostrado na figura 8.



**Figura 8 Diagrama hidráulico para o abastecimento dos tanques de fluido de trabalho**

Após o funil um filtro deve garantir que não aja a contaminação do sistema. Deve ser um filtro absoluto de 15mm, pois deve garantir que uma amostra de 300 ml recolhida após passagem pelas linhas de alimentação não deverá exceder a contagem ou distribuição de particulado listada na Tabela 2. O meio fluido utilizado deverá ser álcool isopropílico, ou água deionizada, destilada e filtrada (3 mm absoluto).

Tamanho da partícula	Contagem máxima em 100 ml
Maior que 100 mm	0
76 – 100 mm	8
51 – 75 mm	20
25 – 50 mm	550
< 25 mm	Sem sedimentação
Resíduos não evaporáveis	Max de 1 mg / 100 ml

**Tabela 2 Tamanho e contagem de partículas**

Fibras, definidas como qualquer material de diâmetro inferior a 40 mm e razão de comprimento/diâmetro de 10:1, serão contadas de acordo com a seguinte formula:

Tamanho equivalente da partícula = comprimento da fibra x diâmetro x 0,01

O sistema de alimentação e todos os equipamentos em contato com os fluidos de trabalho deverão ser compatíveis com os seguintes fluidos de trabalho: água filtrada e deionizada, álcool isopropílico, freon e querosene.

As válvulas que de passagem serão especificadas na sessão 2.7.2.

## **2.4. Projeto do sistema térmico**

O sistema térmico como já mencionado é responsável por aquecer o fluido de trabalho, para que a injeção seja realizada nas condições desejadas de teste e também deverá garantir que o fluido atinja o injetor nestas condições. Para isto será utilizado um sistema de aquecedores do tipo cinta térmica para aquecer o fluido dentro do reservatório de combustível. Dentro do escopo do sistema térmico também se encontra o dimensionamento do isolamento tanto do reservatório de combustível quanto da tubulação até o injetor.

Desta forma, é interessante conhecer qual a potencia necessária que deve ser transferida para o fluido, para que se possa aquecê-lo a temperatura máxima de operação em um tempo não muito grande. Um tempo de aquecimento de 3 horas é considerado aceitável.

Como o volume do reservatório é constante, o aquecimento causará um aumento na pressão do fluido. Analisando para o caso onde se deseja atingir a temperatura máxima do sistema, 205 °C, podemos estimar que ao atingi-la dentro do reservatório teremos uma mistura com aproximadamente 10% de vapor de água superaquecido. Analisando o diagrama de Mollier da água podemos identificar que a esta temperatura teremos uma pressão de 1724 KPa. Com estas informações conseguimos tirar o valor da entalpia do sistema para este caso, 1010 KJ/Kg. Para a condição inicial, onde a água esta em condições normais de pressão e temperatura, temos uma entalpia de 83,915 KJ/Kg. Assim, considerando que no processo de aquecimento temos apenas entrada de calor no sistema, podemos calcular qual a potencia necessária a entrar no sistema para que se possa realizar este aquecimento em 3 horas. Para isto utilizamos a equação 1, que deriva do balanço de energia dentro do sistema.

$$Q = \frac{m\Delta h}{\Delta t}$$

Onde, Q é a potencia a ser fornecida ao sistema, m a massa de água (30 Kg),  $\Delta h$  a variação de entalpia do sistema, e  $\Delta t$  o intervalo de tempo desejado para o aquecimento.

Resolvendo a equação chegamos a necessidade de 2,56 KW de potencia sendo transferidos para o fluido no período de 3 horas.

Após atingir a temperatura de operação o sistema de aquecimento não deve ser desligado, mas apenas deve diminuir sua potencia para que mantenha o nível de temperatura. Isto deverá ser feito por um controle em malha fechada, que obterá informações sobre a temperatura dentro de reservatório através de termômetros e regulará o fornecimento de potencia. Para o projeto deste controlador é preciso saber o quanto de energia do aquecedor está sendo transferida para o fluido e o quanto está sendo perdida para o ambiente.

Para o dimensionamento do isolamento térmico uma primeira estimativa pode ser realizada, estimando uma perda de potencia admissível de 10% da potencia entregue pelo aquecedor. Utilizando o conceito de resistências térmicas [3], onde um modelo simplificado para este problema pode ser visto na figura 9.



**Figura 9 Modelo para o calculo de transferência de calor do reservatório principal. Azul é o interior com fluido de trabalho, a região cinza é a parede do reservatório, a vermelha representa o aquecedor e a bege o isolamento térmico**

Considerando que temos um fluxo de calor entrando no sistema na região do aquecedor, uma resistência térmica na região da parede do reservatório e uma resistência térmica devido ao isolante, podemos através do calculo de fluxos de calor determinar qual a espessura necessária do isolamento térmico para que tenhamos uma perda de potencia de máxima de 10%.

Considerando para o caso de uso total do sistema, onde a temperatura do aquecedor ( $T_{aq}$ ) pode atingir até 300 °C, e temos uma temperatura de 20 °C no ambiente ( $T_a$ ),

utilizando a equação para o cálculo do fluxo térmico que escapa para o ambiente (equação 2), e também sabendo que a resistência térmica do isolante é dada pela equação 3. Sendo que Q o fluxo térmico do aquecedor para o ambiente,  $r_e$  o raio externo do reservatório,  $r_i$  o raio interno do reservatório, l o comprimento da seção cilíndrica do reservatório e  $K_{iso}$  o coeficiente de condutividade da lã de vidro utilizada como isolante térmico.

$$Q = \frac{T_{aq} - T_a}{R}$$

Equação 2

$$R = \frac{\ln\left(\frac{r_e + t}{r_e}\right)}{2\pi(l)(K_{iso})}$$

Equação 3

Estimando valores para a espessura t, chegamos a uma espessura razoável de 5 cm que fará com que a perda de calor para o ambiente seja de aproximadamente 176 W, menor do que o admissível.

Portanto, com estas informações chegamos as seguintes características para o sistema térmico:

- ◆ Tempo para aquecimento à temperatura máxima – 3 horas
- ◆ Potencia do aquecedor – capacidade para 3000 W
- ◆ Isolamento térmico – lã de vidro com espessura de 5 cm

A tubulação até o injetor será revestida com um isolamento de 5 cm de lã de vidro.

## 2.5. Projeto do sistema de pressurização

Este sistema, responsável por garantir a pressão desejada no momento do teste, aumentando a pressão do combustível caso sua autpressurização devido ao aumento da

temperatura não seja o suficiente. Este sistema utilizando ar comprimido deve ter capacidade para obter uma pressurização de 45 bar, este equipamento não será projetado, mas será especificado um sistema comercial para esta função. É muito importante que este sistema, além de ter a capacidade de gerar as pressões necessárias, não introduza nenhum tipo de contaminante nos reservatórios de fluido de trabalho, uma vez que estes serão totalmente fechados e sua limpeza é de difícil execução.

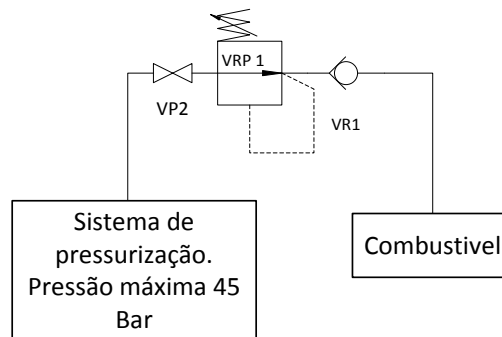
A figura 10 mostra um sistema comercial de ar comprimido de alta pressão. Um sistema como este pode ser adquirido para que se possa ter uso total da bancada de testes, porém, com um sistema menos robusto já é possível fazer uso da mesma com algumas limitações.



**Figura 10 Exemplo de sistema de ar comprimido comercial de alta pressão**

Para garantir a integridade física dos componentes da bancada, o sistema de pressurização deverá ser montado separadamente do resto do equipamento, tendo em vista que compressores e “Boosters” geram excessiva vibração durante seu funcionamento. Sendo assim a bancada terá uma entrada para o fluido de pressurização, os componentes de controle de fluxo do sistema de pressurização podem ser vistos na figura 11.





**Figura 11 - Diagrama do sistema de pressurização**

Neste conjunto temos a válvula de passagem, VP3, que define se haverá pressurização externa ou não, temos também a válvula reguladora de pressão, VRP1, que é utilizada para o operador ajustar qual a pressurização desejada no tanque. A válvula reguladora de pressão possui capacidade superior à pressão máxima exigida pelo sistema e também comportam grande vazão. A figura 12 traz uma ilustração de uma válvula reguladora de pressão.



**Figura 12 Válvula reguladora de pressão**

Após a válvula reguladora de pressão temos uma válvula retentora, que tem o objetivo de proteger os componentes do sistema de pressurização, caso haja sobre pressão

nos reservatórios de trabalho. As válvulas de passagem serão descritas em mais detalhes na seção 2.7.2.

## **2.6. Projeto do sistema de aquisição de dados**

Os dados a serem coletados da bancada são temperatura, pressão e vazão no injetor, além da forma geométrica do jato de saída do injetor. Para a visualização do jato na saída, pode-se utilizar um sistema ótico que permita visualizar a nuvem de gotas por trás do vapor que estará na câmara de testes durante o ensaio devido a alta temperatura do fluido. Para as informações de temperatura, termopares devem ser instalados na tubulação antes da conexão com o injetor, e também podem ser instalados no próprio injetor de acordo com as necessidades da pesquisa. Os dados de pressão e vazão podem ser adquiridos diretamente a partir da visualização dos mostradores dos manômetros e dos medidores de fluxo instalados na bancada.

## **2.7. Especificação dos componentes gerais**

### **2.7.1. Tubulação**

A tubulação deverá ser toda em aço inoxidável, sendo que toda a parte dos reservatórios de fluido de trabalho até o injetor deve possuir diâmetro interno de  $\frac{1}{4}$  de polegada, enquanto que a tubulação anterior aos mesmos deve possuir um diâmetro interno de  $\frac{1}{2}$  de polegada.

### **2.7.2. Válvulas de passagem**

Todas as válvulas de passagem do sistema devem ser em aço inoxidável, com acionamento manual através de alavanca de 90°, com pressão de operação de pelo menos 50 bar e com pressão de ruptura de 180 bar. O diâmetro destas válvulas deve ser condizente com o diâmetro da linha a qual serão instaladas.

### 3. PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS

#### **3.1. Procedimento para abastecimento do reservatório de fluido de trabalho**

1. Fechar todas as válvulas
2. Despressurizar reservatório abrindo a válvula de alívio
3. Fechar a válvula de alívio após a despressurização do reservatório
4. Abrir válvula da linha de alimentação do fluido (VP1)
5. Despejar fluido pelo funil
6. Fechar válvula da linha de alimentação do fluido (VD1)

#### **3.2. Procedimento de aquecimento do sistema**

1. Fechar todas as válvulas
2. Certificar-se de que se tem fluido no reservatório de trabalho
3. Liga sistema de aquecimento
4. Monitorar sistema de aquecimento

#### **3.3. Procedimento de pressurização do sistema**

1. Fechar todas as válvulas
2. Prepara sistema de pressurização
3. Ajustar válvula reguladora de pressão VRP 1

4. Abrir válvula VP2 assim que o sistema de pressurização estiver pronto
5. Fechar VP2 assim que atingir a pressão desejada

### **3.4. Procedimento de condicionamento da tubulação**

Com o fluido de trabalho na temperatura de operação o seguinte procedimento deve ser realizado.

1. Abrir válvula VP7
2. Abrir válvulas VP4 e VP6 ou VP3 e VP5 de acordo com a faixa de vazão que se deseja medir
3. Abrir válvula de acionamento elétrico
4. Deixar fluido de trabalho vazar até que o termostato do injetor tenha a temperatura de trabalho.
5. Assim que os termômetros do injetor indicarem que a temperatura no injetor é a mesma do reservatório, fechar as válvulas VP3 até VP7

### **3.5. Procedimento para medição de vazão**

1. Abrir válvula VP7
2. Abrir válvulas VP4 e VP6 ou VP3 e VP5 de acordo com a faixa de vazão que se deseja medir
3. Fechar válvula VP7
4. Iniciar o procedimento de teste

### **3.6. Procedimento de testes**

#### **3.6.1. Ensaio contínuo**

Testes em modo contínuo poderão ter duração de até 200 segundos, sendo que para este procedimento bastará apenas, após os procedimentos de abastecimento do reservatório de trabalho, aquecimento do sistema e se necessário pressurização do sistema, abrir a válvula de acionamento elétrico.

### **3.6.2. Ensaio pulsado**

Neste procedimento a sistema de controle da válvula elétrica deve ser ajustado de acordo com as necessidades do teste. Sendo o intervalo de tempo mínimo em que a válvula permanece aberta deverá ser de 20 ms para injetores monopropelentes e 100 ms para injetores bipropelentes.

#### 4. CONCLUSÃO

Neste relatório foram apresentados a concepção e o projeto preliminar de uma bancada de testes para injetores monopropelente alimentados com fluidos superaquecidos, foi adotado uma linha de projeto bem estruturada, visando atender da melhor maneira os requisitos propostos pelos orientadores. Esta escolha para o desenvolvimento do projeto se mostrou adequada, principalmente pelo fato de se tratar da resolução de um problema não estruturado onde os requisitos iniciais não são bem claros e com o desenvolvimento da ideia muitos acabam necessitando de iterações e acabam se modificando para que se possa atingir um bom resultado final.

O desenvolvimento de um trabalho como este é muito importante para a complementação do aprendizado de um aluno de engenharia, pois além de precisar colocar em prática as teorias desenvolvidas em sala de aula, o aluno é forçado a buscar soluções para diversos problemas onde os dados iniciais não são enunciados com clareza como em um exercício didático.

Os objetivos deste trabalho foram atingidos, ou seja, o desenvolvimento do projeto preliminar da bancada, listando suas principais funções o diagrama hidráulico e o projeto dos principais sistemas, podendo então ser iniciado em seguida a etapa de validação, onde se deve elaborar modelos em laboratório para os diversos sistemas e testa-los, com o objetivo de aprimorar as informações contidas neste trabalho para que por fim possa ser realizada a fabricação e montagem do primeiro equipamento.

## 5. REFERENCIAS

[1] PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. **A Guide to the Project Management Body of Knowledge: PMBOK Guide**. 5. ed. New York: Project Management Institute, 2013.

[2] HIBBELER, A. C.. **Resistência dos Materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson, 2009.

[3] ÇENGEL, Yunus A.. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**. 3. ed. São Paulo: Mcgraw-hill, 2009.