

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

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

Arthur Deyna
(Universidade Federal de Santa Catarina, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: arthurdeyna@gmail.com

Dr. José Nivaldo Hinckel (ETE/DMC/INPE, Orientador)
E-mail: hinckel@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
DE FLUÍDOS CRIOGÊNICOS EM CONDIÇÕES CRÍTICAS**

PROCESSO: (XXXX)

Relatório elaborado por:

Arthur Deyna
(Universidade Federal de Santa Catarina, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: arthurdeyna@gmail.com

Dr. José Nivaldo Hinckel (ETE/DMC/INPE, Orientador)
E-mail: hinckel@dem.inpe.br

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

Julho de 2013

Dados de Identificação:

Título do Projeto:

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

Processo CNPq N°:

Bolsista:

Arthur Deyna

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

Orientador:

Dr. José Nivaldo Hinckel

ETE/DMC/INPE

Co-Orientador:

Dr. Heitor Patire Junior

ETE/DMC/INPE

Colaboradores:

Dra. Viviane Lilian Soethe

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Luiz Fernando dos Santos Souza

Acadêmico do curso de Engenharia Aeroespacial – CEM/UFSC

Local de Trabalho/Execução do Projeto:

Centro de Engenharias da Mobilidade – CEM/UFSC



SUMÁRIO:

rESUMO	5
INTRODUÇÃO	6
1. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO	7
2. REQUISITOS DE DESEMPENHO	8
2.1. Pressão de operação.....	8
2.2. Vazão.....	9
2.3. Vazamentos.....	9
2.4. Isolamento térmico.....	9
3. PROJETO E CONSTRUÇÃO.....	9
3.1. Sistema de pressurização	10
3.2. Sistema de vácuo.....	10
3.3. Adequação do CO ₂ ao teste	10
3.4. Capacidade de bombeamento	11
3.5. Fluidos de trabalho.....	11
3.5.1. Nitrogênio	12
3.5.2. Dióxido de carbono.....	13
3.6. Capacidade dos tanques de armazenamento.....	15
3.7. Entrada e saída dos tanques	15
3.8. Nível de líquido nos tanques	15
3.9. Visualização do nível do tanque.....	15
3.10. Escolha do sensor de medição	15
3.11. Tipos de sensores.....	16
3.11.1. Visor	16
3.11.2. Pressão diferencial.....	17
3.11.3. Deslocador móvel.....	18
3.11.4. Método capacitivo	18
3.12. Purga das linhas de alimentação	19
3.13. Fatores de segurança	20
3.14. Pressão de prova.....	20



3.15.	Pressão de ruptura	20
3.16.	Interface mecânica.....	20
3.16.1.	Conexões	20
3.16.2.	Tanques	20
3.16.3.	Entradas de gases de pressurização	21
3.16.4.	Fixação e envelope do dispositivo de teste	21
3.16.5.	Interface elétrica.....	21
3.16.6.	Números de linhas de alimentação	21
3.16.7.	Materiais e processos.....	22
3.16.8.	Contaminação	22
3.16.9.	Fluidos de trabalho.....	23
3.16.10.	Identificação de componentes e marcação	23
3.16.11.	Manutenção.....	23
3.16.12.	Partes sujeitas a desgaste e degradação.....	23
3.16.13.	Perda de carga nas linhas.....	23
3.16.14.	Modos de operação.....	23
3.16.15.	Transitórios de partida e fechamento	24
3.16.16.	Golpe de aríete.....	24
3.16.17.	Controle de vazão	24
3.16.18.	Estanqueidade	24
3.16.19.	Instrumentos de medidas	24
3.16.20.	Medidas de pressão	25
3.16.21.	Precisão de medidas de pressão	25
3.16.22.	Medidas de vazão	25
3.16.23.	Precisão das medidas de vazão.....	27
3.16.24.	Sensor de deslocamento volumétrico	27
3.16.25.	Aquisição e armazenamento de dados	28
3.16.26.	Visualização dos dados.....	28
3.16.27.	Dados dados armazenados.....	28
3.17.	Operação	28
3.17.1.	Disposição dos mostradores de vazão e pressão	28



3.17.2.	Segurança e durabilidade do equipamento	29
3.17.3.	Uso de equipamento de segurança pessoal	29
3.18.	Provisões de garantia do equipamento.....	29
3.19.	Condições gerais de teste.....	29
3.19.1.	Procedimentos de teste.....	29
3.19.2.	Medidas.....	29
3.19.3.	Relatório de teste	30
3.19.4.	Critério de falha	30
3.20.	Requisitos de teste	30
3.20.1.	Inspeção.....	30
3.20.2.	Materiais e processos.....	30
3.20.3.	Teste de pressão de prova.....	31
3.20.4.	Estanqueidade e vazamentos	31
3.20.5.	Teste funcional	31
4.	Operação da bancada de ensaio.....	31
4.1.	Instruções de trabalho.....	32
5.	Esquema básico do circuito.....	33
6.	mODELAGEM EM CAD	34
7.	Referências:	37





RESUMO

Este trabalho iniciado em setembro de 2012 tem como objetivo a concepção e elaboração de um projeto de uma bancada de testes para sistemas de injeção de propelentes de motores foguete a propelentes líquidos. Sistemas inovadores de propulsão demonstraram a sua eficiência no espaço e na sua capacidade para manter e controlar a velocidade de órbita da nave espacial. Com os diversos avanços realizados no setor aeroespacial brasileiro, o desempenho e a confiabilidade do sistema de propulsão são de essencial importância para qualquer missão espacial. Fluidos que são gasosos à temperatura ambiente, mas armazenados a temperaturas baixas, ou seja, abaixo do seu ponto de ebulição, são chamados de fluidos criogênicos. As propriedades especiais de um fluido criogênico devem ser considerados dentro dos aspectos operacionais da bancada. Os componentes em geral precisam ter o isolamento adequado a fim de evitar danos ao equipamento e erros na aquisição de dados. O produto em questão é uma bancada de testes para injetores de fluidos criogênicos em condições críticas, que possibilitará a realização de ensaios nas situações desejadas. Muitas questões remanescentes e a confirmação de todos os cálculos são realizadas nas bancadas de teste. A concepção desta bancada engloba a elaboração de um diagrama esquemático de operação da bancada e um modelo em CAD para melhor detalhar o projeto.



INTRODUÇÃO

Sistemas inovadores de propulsão demonstraram a sua eficiência no espaço e na sua capacidade para manter e controlar a velocidade de órbita da nave espacial. Com os diversos avanços realizados no setor aeroespacial brasileiro, o desempenho e a confiabilidade do sistema de propulsão são de essencial importância para qualquer missão espacial.

Muitas questões remanescentes e a confirmação de todos os cálculos são realizadas nas bancadas de teste.

Este projeto busca a concepção e elaboração de um projeto de uma bancada de testes para sistemas de injeção de propelentes de motores foguete a propelentes líquidos. A concepção engloba a elaboração de um diagrama esquemático da bancada para melhor detalhar o projeto.

O projeto deverá ser realizado no prazo máximo de um ano. Não será realizada a construção da bancada.

1. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

O produto em questão é uma bancada de testes para injetores de fluidos criogênicos em condições críticas, que possibilitará a realização de ensaios.

O equipamento consiste basicamente em:

1. Válvula reguladora de pressão;
2. Válvula de abertura;
3. Manômetros;
4. Tanque de dióxido de carbono gasoso;
5. Tanque de dióxido de carbono líquido;
6. Tanque de Nitrogênio líquido;
7. Tanque de Nitrogênio gasoso;
8. Termômetros;
9. Medidor de vazão;
10. Válvula de pressurização;
11. Válvula de segurança;
12. Pressurização do líquido;
13. Válvula de segurança;
14. Reservatório;
15. Válvula reguladora de vazão;
16. Válvula de enchimento do tanque;
17. Válvula de desvio;
18. Purga;
19. Injetor
20. Bomba de vácuo;

O dispositivo será projetado com o auxílio de bibliografias específicas, softwares dedicados e conhecimento de pessoas com experiência na área. O projeto deverá conter as especificações de componentes comerciais para fácil aquisição e projeto detalhado de componentes não comerciais, caso seja necessária a fabricação.

1.1. Fluidos Criogênicos

De acordo com Kitsche (2009), fluidos que são gasosos à temperatura ambiente, mas armazenados a temperaturas baixas, ou seja, abaixo do seu ponto de ebulição, são chamados de fluidos criogênicos.

As propriedades especiais de um fluido criogênico têm de ser considerados dentro dos aspectos operacionais. Vasos e linhas de pressão

precisam ter isolamento suficiente e o sistema de alimentação tem de estar livre de poluição.

2. REQUISITOS DE DESEMPENHO

2.1. Pressão de operação

Quanto à pressão os valores indicados são para a perda de carga do elemento injetor. Entretanto, como queremos operar em condições críticas o nível de pressão de alimentação serão ditados pelas propriedades dos fluidos. Deve ser verificada em que faixa de temperatura e pressão temos líquido saturado, vapor saturado e mistura de líquido e vapor. Para os fluidos escolhidos, a pressão de trabalho será limitada na faixa de 40 bar. Isto limita um pouco o envelope de testes do equipamento, mas para uma bancada voltada para a pesquisa é considerado aceitável. Uma bancada com pressões superiores a 40 bar requer procedimentos de segurança mais rígidos. Neste caso não poderá ser feita a injeção do dióxido de carbono em condições supercríticas. O dióxido de carbono deverá se encontrar na condição de líquido. Logo, a temperatura do mesmo deverá ser inferior ao valor para o qual pressão de vapor do dióxido de carbono é igual à pressão de alimentação requerida.

A regulagem da pressão de saída deverá ser feita com um recipiente equipado com um regulador de pressão. O regulador de pressão deverá permitir a saída de gás e líquido de forma a compensar a quantidade de líquido injetada através do elemento de teste. (O elemento de teste terá a descarga no interior deste vaso equipado com o regulador de pressão).

Não haverá um dispositivo específico para regular a vazão. Esta será sempre função do coeficiente de descarga do elemento de teste da diferença de pressão a entrada e saída do elemento de teste.

2.2. Vazão

A faixa de vazão esperada para os testes deve ser de 5 a 50 ml/s. O sistema deverá também dispor de mecanismo para pré-resfriar a linha entre o também de alimentação e o elemento injetor. Há a possibilidade de o condicionamento da linha ser feito com o próprio líquido, ou com outro líquido (por exemplo, nitrogênio líquido). Há também necessidade de evitar a entrada de ar úmido na tubulação após o resfriamento para impedir a formação de gelo no interior da tubulação.

2.3. Vazamentos

As linhas de alimentação não deverão apresentar vazamentos quando inundadas com gás ou líquido submetido à pressão na faixa de valores especificados.

2.4. Isolamento térmico

Em uma bancada de testes com o uso de fluidos criogênicos, é necessário que a temperatura do fluido de trabalho esteja dentro de um padrão estipulado para que o teste ocorra adequadamente. Para evitar que os fluidos utilizados na bancada troquem calor com o ambiente, é necessário que os tanques e as linhas de tubulação ao longo do circuito tenham um isolamento térmico adequado. Existem algumas formas de realizar estes isolamentos, tais como, tubos com isolamento a vácuo, fitas herméticas, etc.

Após algumas pesquisas sobre o assunto e discussões com os orientadores, optou-se por utilizar tubos com isolamento a vácuo, onde esse vácuo será gerado por uma bomba mecânica que deverá operar a 10^{-3} bar. O sistema deverá mostrar a que pressão o sistema de vácuo se encontra.

3. PROJETO E CONSTRUÇÃO

3.1. Sistema de pressurização

Para realizar a pressurização do fluido, é importante saber que fluidos criogênicos podem se autopressurizar, basta que sejam aquecidos. Quanto for aquecer o reservatório de líquido, considerando que o mesmo vai estar a uma temperatura abaixo do ambiente, basta fazer circular por uma serpentina um fluido a temperatura ambiente, por exemplo, nitrogênio gasoso, ou mesmo água, com vazão suficiente para não congelar no interior da tubulação.

3.2. Sistema de vácuo

Deverá ser utilizado um sistema de vácuo (o mesmo empregado no isolamento térmico do sistema) para evitar qualquer possibilidade de gelo no tanque de CO₂ líquido ou em qualquer ponto da linha onde o CO₂ líquido irá circular.

3.3. Adequação do CO₂ ao teste

Para o dióxido de carbono passar da fase gasosa para a fase líquida, foram listadas duas formas de realizar este processo.

A primeira maneira é através do uso de uma serpentina com nitrogênio líquido que passa através do tanque principal (Figura 1) para resfriar o dióxido de carbono. Porém esta maneira se torna um pouco inviável devido a necessidade de adquirir nitrogênio líquido para realizar os testes na bancada.

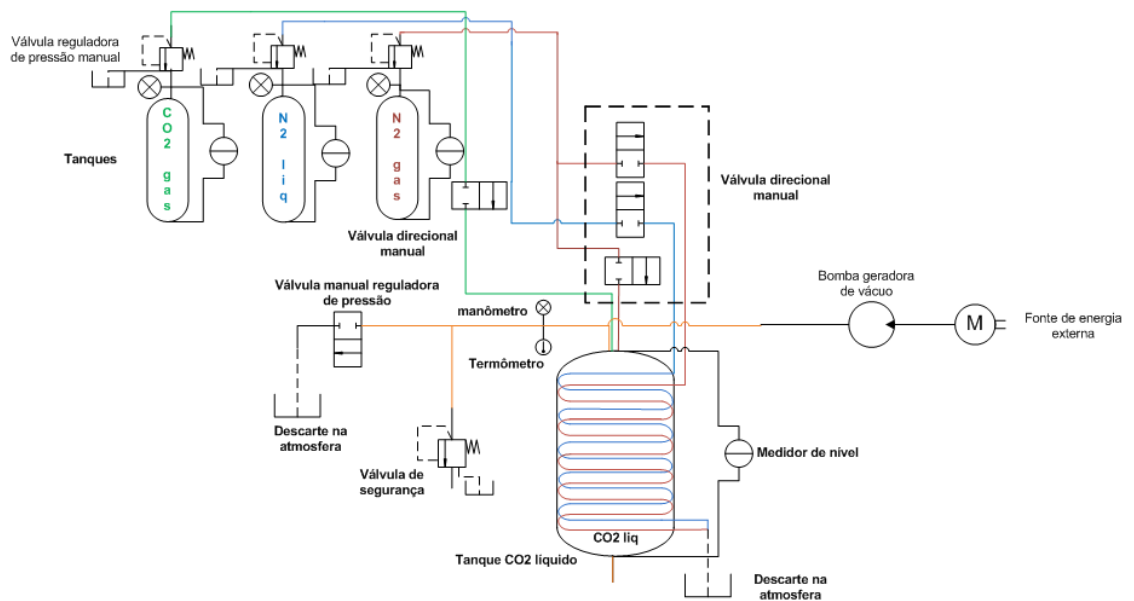


Figura 1 – Detalhe do tanque principal com a serpentina

A segunda alternativa é fazer uso de um refrigerador de alto desempenho que consiga temperaturas baixas o suficiente para liquefazer o CO_2 .

3.4. Capacidade de bombeamento

O tempo de bombeamento do fluido pode ser controlado através da taxa de fornecimento de calor ao fluido criogênico.

3.5. Fluidos de trabalho

O sistema deverá operar com alimentação por nitrogênio pressurizado e dióxido de carbono tanto para o gás de atuação como o gás de pressurização.

O fluido de trabalho poderá estar a uma temperatura inferior àquela para a qual a pressão de vapor do líquido seja igual à pressão de testes. Neste caso deverá haver um sistema adicional de pressurização com um fluido cuja temperatura de ebulição seja inferior à do dióxido de carbono, nitrogênio, por exemplo.

Pode-se também realizar testes com o fluido na condição de líquido saturado. Neste caso deve permitir que a temperatura do fluido atinja um valor superior até que a pressão de vapor seja igual à pressão de testes.

Como o fluido de trabalho é criogênico não é preciso necessariamente um aquecedor, basta estimular a troca de calor com o ambiente.

Esta troca de calor deve ocorrer no interior do tanque de armazenamento do fluido de trabalho. Essa troca de calor será feita com a injeção de dióxido de carbono à pressão ambiente no interior do tanque. Ao condensar, em contato com dióxido de carbono frio do interior do tanque, este irá se aquecer aumentando a temperatura e conseqüentemente a pressão de vapor.

3.5.1. Nitrogênio

Segundo Gama Gases (2012), à temperatura ambiente e pressão atmosférica, o Nitrogênio é um gás não inflamável, não tóxico, incolor, inodoro e insípido. O nitrogênio gasoso é distribuído em cilindros de aço a uma pressão de 150 a 200 bar e em sua forma líquida, tanques criogênicos a uma temperatura de cerca de -196°C . Na Tabela 1 encontra-se as principais propriedades físicas do Nitrogênio.

Propriedades Físicas	
Calor latente de fusão a 63,19 K.	7209,03 J/mol; 1723,0 cal /mol
Calor molar específico, gás a 101,325 kPa a	28,98 J/(mol x K)
Calor molar específico, gás a 101,325 kPa a	20,6 J/(mol x K)
Calor molar específico, líquido a pressão de saturação a 100 K.	64,0 J/(mol x K)
Condutividade térmica, gás a 101,325 kPa a	0,0259 W/(m x K); 61,9 x 10 ⁻⁶ cal/(s x cm x °C).
Condutividade térmica, líquido a pressão de saturação a 65 K.	0,1598 W/(m x K); 381,9 x 10 ⁻⁶ cal x cm/(s x cm x °C).
Constante dielétrica, gás a 101,325 kPa a 20°C.	1,0005480.
Constante dielétrica, líquido a 75 K.	1,454.

Densidade absoluta, gás a 101,325 kPa a 25°C.	1,1455 kg/m ³
Densidade crítica.	0,311 kg/dm ³
Densidade, líquido a pressão de saturação a	0,808 kg/L
Densidade relativa, gás a 101,325 kPa a	0,967
Fator de compressibilidade crítica.	0,2916
Fórmula.	N ₂
Massa molecular.	28,0134
Ponto de ebulição a 101,325 kPa	77,352 K; -195,8°C;
Pressão crítica.	3400 kPa ; 34 bar; 492,9 psia; 33,54 atm.
Pressão no ponto triplo.	12,53 kPa; 125,3 mbar; 94,01 mmHg
Razão do calor específico, gás a 101,325 kPa a 16,8°C, Cp/Cv	1,407
Solubilidade em água a 101,325 kPa (pressão parcial) a 25°C.	1,485 cm ³ /100 cm ³ de água
Temperatura crítica.	126,26 K; -146,9°C; -232,4°F
Temperatura no ponto triplo.	63,149 K; -210°C; -346°F
Tensão superficial a 70,15 K.	10,5 mN/m; 10,5dyn/cm
Viscosidade, gás a 101,325 kPa a 26,8°C.	0,01787 mPa x s; 0,01787 cP
Viscosidade, líquido a pressão de saturação a 63,9 K.	0,292 mPa x s; 0,292 cP
Volume crítico.	3,216 dm ³ /kg
Volume específico a 21,1°C 101,325 kPa.	861,5 dm ³ /kg; 13,8 ft ³ /lb

Tabela 1 – Propriedades físicas do Nitrogênio.

3.5.2. Dióxido de carbono

De acordo com Gama Gases (2012), a temperatura ambiente e pressão atmosférica, o dióxido de carbono é um gás não inflamável, incolor, inodoro. Uma vez e meia mais denso que o ar atmosférico, é altamente solúvel em água. O dióxido de carbono é envasado e transportado, em cilindros de aço como gás liquefeito sob sua própria pressão de vapor, aproximadamente à 58,2 bar a 21,1°C. Na Tabela 2 são mostradas as propriedades físicas do dióxido de carbono.



Propriedades Físicas	
Calor latente de fusão a -56,6°C; 518 KPa.	7,95 KJ/mol; 43,17 kcal/kg; 180,64 kJ/kg.
Calor latente de sublimação a -78,45°C e 101,325 KPa	25,23 kJ/mol; 6,03 kcal/kg; 0,573 kJ/kg.
Calor molar específico, gás a 101,325 kPa e 20°C pressão constante.	37,564 J/(mol x K); 0,204 kcal/(kg x °C).
Calor molar específico, gás a 101,325 kPa a 20°C volume constante.	28,541 J/(mol x k); 0,155 kcal/(kg x °C).
Condutividade térmica, gás a 101,325 kPa e 26,85°C.	0,0166 W/(m x k); 39,6 x 10 ⁻⁶ cal x cm/(s x cm x °C).
Densidade absoluta, gás a 101,325 kPa e 0°C.	1,9770 kg/m ³
Densidade crítica.	0,468 kg/dm ³
Densidade relativa, gás a 101,325 kPa e 0°C (ar=1).	1,53
Densidade, líquido a 25°C; 6430 kPa.	0,713 kg/L
Fator crítico de compressibilidade.	0,274
Massa Molecular	44,0095
Ponto de sublimação a 101,325 kPa.	194,7k; -78,4°C; -109,2°F.
Pressão crítica.	7381,5 kPa; 73,82 bar; 1070,6 psia; 72,85 atm.
Pressão de vapor a 21,1°C.	5824 kPa; 58,24 bar; 844,7 psia; 57,5 atm.
Pressão no ponto triplo.	517,97 kPa; 5,18 bar; 5,112 atm; 75,13 psia.
Razão do calor específico, gás a 101,325 kPa e 20°C, Cp/Cv.	1,316.
Solubilidade em água a 101,325 kPa e 0°C.	0,759 cm ³ / 1cm ³ de água.
Temperatura crítica.	304,19 K; 31,0°C; 87,9°F.
Temperatura no ponto triplo.	216,55 K; -56,6°C; -69,9°F.
Viscosidade, gás a 101,325 kPa e 26,85°C.	0,01501 mPa x s; 0,01501 mN x s/m ² ; 0,01501 CP.
Volume crítico.	2,137 dm ³ / kg.
Volume específico a 21,1 °C e 101,325 kPa.	547 ³ / kg; 8,76 ft ³ / lb.

Tabela 2 – Propriedades físicas do Dióxido de Carbono.

3.6. Capacidade dos tanques de armazenamento

Os sistema de armazenamento deverá conter dois tanques com capacidade entre 10 e 15 litros, um para cada linha de alimentação e um tanque com capacidade entre 3 e 5 litros montado em paralelo com o tanque maior em uma das linhas.

3.7. Entrada e saída dos tanques

Cada tanque deverá ter duas conexões, sendo uma na parte superior e uma na parte inferior. A disposição das válvulas e conexões de entrada deverá permitir o carregamento de cada tanque separadamente. A conexão inferior deverá permitir drenagem completa do líquido contido no interior do tanque.

3.8. Nível de líquido nos tanques

Cada tanque deverá ser equipado com um indicador de nível a fim de permitir a observação do volume de líquido contido no tanque. O indicador de nível deverá suportar a pressão de operação dos tanques e também deverá ter uma escala indicando o volume de líquido disponível no tanque.

3.9. Visualização do nível do tanque

Esse é um dos pontos de grande importância, pois no tanque ficara armazenado o fluido criogênico, sendo assim, é necessário encontrar um método de medição que seja conveniente ao projeto.

3.10. Escolha do sensor de medição

Esse é um dos pontos de grande importância, pois no tanque ficara armazenado o fluido criogênico, sendo assim, é necessário encontrar um método de medição que seja conveniente ao projeto

Existem alguns parâmetros que podem ser levados em conta na hora da escolha do sensor; são eles:

- 1 Custo de propriedade, que inclui custo de compra, instalação, manutenção e calibração futura. Na maioria das vezes a melhor escolha técnica também é a opção mais cara para comprar.
- 2 Precisão, que está relacionada com a finalidade da medição, geralmente quando maior a precisão do instrumento, mais alto é seu preço de aquisição.
- 3 Calibração, onde está agregado um dos maiores custos de propriedade. Deve ser levado em conta se a calibração do sistema pode ser feita no local, sem a retirada do sensor. É exigido que um sistema automático de nível deve ser calibrado, inicialmente a cada seis meses.
- 4 Instalação, que considera se o sensor está ou não em contato com o líquido a ser medido. Uma instalação com o sensor externo é mais conveniente e segura que uma instalação com o sensor no interior do tanque, em contato direto com o líquido.
- 5 Manutenção, que depende da instalação e é mais conveniente quando o sistema é externo ao tanque. Sistemas com peças móveis necessitam de manutenção e calibração mais frequentes que sistemas que não possuem peças móveis.
- 6 Medição discreta ou contínua, que depende da aplicação; se quer apenas uma chave para detectar nível alto ou baixo ou se quer uma indicação contínua do nível?

3.11. Tipos de sensores

Existe uma grande variedade de tipos de sensores e sistemas de medição de nível. Considerando os sensores que possuem possível aplicação no equipamento, temos: visor, pressão diferencial, borbulhamento (pressão diferencial), deslocador, força de empuxo, capacitivo, radiação, radar, ultrassônico e laser.

3.11.1. Visor

É um tubo transparente, onde se pode ver diretamente o nível.

3.11.2. Pressão diferencial

Um método clássico de líquido é através da medição da pressão exercida pela coluna líquida. A pressão hidrostática resultante é proporcional ao valor desta altura, da densidade do fluido e da aceleração da gravidade local. A pressão hidrostática no começo da coluna líquida independe do formato do tanque.

Para utilizar esse tipo de medição, é necessário que a densidade do fluido seja constante (nesse ponto o nitrogênio gasoso não se adequa), pois a densidade do líquido irá depender da sua temperatura.

A medição de nível de tanque pressurizado, quando são necessárias duas tomadas físicas de pressão, apresenta alguns problemas relacionados com faixas com elevação ou supressão de zero, dependendo da densidade do líquido cujo nível é medido e a densidade do fluido de enchimento da perna molhada. Devem-se analisar matematicamente as pressões alta e baixa, com o tanque em nível zero e em 100%, para determinar a faixa de medição correspondente. Uma maneira de evitar esse problema é substituir o pote de selagem e a perna molhada por um repetidor pneumático de pressão. O repetidor tem a pressão de saída igual à pressão de entrada, porém é limpa e seca. Atualmente, com transmissores microprocessados e auto-configuráveis, não ocorre esse tipo de problema.

Um método que também se baseia na pressão hidrostática exercida pela coluna líquida é o por borbulhamento. Gás inerte ou ar puro é borbulhado através de um tubo de vidro com a extremidade no fundo do tanque. Enquanto a pressão da coluna líquida for maior que a pressão aplicada, não há vazão do gás. Quando a pressão fica aproximadamente igual à pressão da coluna líquida começa haver o borbulhamento do ar ou gás inerte. Neste ponto limite, tem-se a pressão e tem-se a pressão aplicada igual à pressão exercida pela coluna líquida. Transmite-se essa pressão e tem-se como resultado o nível medido. Obviamente, a instalação prática é muito mais complexa, com rotâmetro de purga, inclinações nas linhas de transmissão, purgador de condensado, chave seletora para aplicação de contra pressão para desentupimento do tubo.

3.11.3. Deslocador móvel

O sistema de medição de nível por deslocador se resume na detecção e medição de um peso que varia com o nível.

Realmente o sensor está livre, imóvel, não se desloca, mas desloca o líquido em seu redor e com este deslocamento do líquido o deslocador perde peso.

O deslocador é suspenso de um transmissor de nível, que detecta a força variável. Quando o nível atinge o valor mínimo, o deslocador está imediatamente acima do nível e totalmente fora do líquido. Seu peso é máximo e o sinal transmitido deve corresponder ao zero da escala de medição. Quando o nível sobe, o peso aparente do deslocador diminui, mantendo assim uma relação linear e proporcional entre o peso e o nível do líquido. Quando o nível atinge o valor máximo calibrado, o deslocador deve estar totalmente submerso.

Os problemas práticos que são encontrados e devem ser superados são: A selagem do sistema detector do transmissor com o tanque de processo, que não deve possuir atrito, deve suportar as pressões e temperatura do processo e não sofrer corrosão do líquido.

O cálculo correto do peso e do tamanho do deslocador. As vezes, é conveniente adicionar ao sistema uma proteção ao transmissor, de modo que o peso do deslocador não fique aplicado durante muito tempo.

O comprimento do deslocador nunca pode ser menor que o nível a ser medido.

A densidade do material deslocador deve ser sempre maior que a densidade do tanque.

3.11.4. Método capacitivo

O método utiliza a variação da propriedade que é a capacitância. A capacitância é a propriedade elétrica de um sistema que permite que ele armazene carga. Capacitores são condutores separados por um dielétrico. A capacitância é dada em Farads e é calculada pela equação 1:

$$C = \frac{A \epsilon_0 \epsilon_r}{d}$$

onde A (m^2) é a área de superposição entre as placas, ϵ_0 (F/m) é a permissividade do espaço livre, ϵ_r é a permissividade relativa do dielétrico entre as placas e d (m) é a distância entre as placas. Permissividade é a propriedade de um material que descreve a densidade de fluxo elétrico produzido quando o material é excitado por uma força eletromotriz.

Assim, a capacitância entre duas placas planas paralelas deslocadas de uma distância x , como as mostra o arranjo na equação 2, é calculada de

$$C = \frac{(A - wx) \epsilon_0 \epsilon_r}{d}$$

A variação da área de superposição pode ser a base de uma técnica de medição ou também a variação da altura do meio dielétrico entre as placas. O exercício seguinte exemplifica o dimensionamento de um sensor capacitivo de placas paralelas.

3.12. Purga das linhas de alimentação

As linhas de alimentação dos fluidos deverão ser providas de meios para purga de bolhas de gás retidas durante o enchimento.

Na Figura 2, é possível ver a válvula antes do injetor para que seja realizada a purga no sistema.

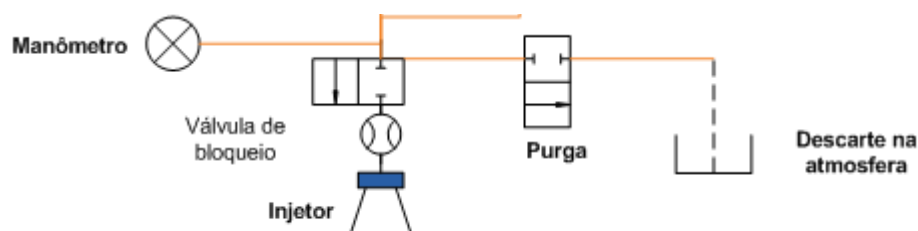


Figura 2 – Válvula para purga do sistema



3.13. Fatores de segurança

A bancada deverá ser equipada com dispositivos que evitem que a pressão ultrapasse o limite máximo especificado de operação, evitando danos ao operador e ao equipamento.

As válvulas deverão ser posicionadas de maneira que caso ocorra algum rompimento, o fluido não atinja o operador.

3.14. Pressão de prova

A bancada de teste deverá satisfazer todos os requisitos desta especificação depois de submetida a uma pressão de 1,5 vezes a máxima pressão de operação.

3.15. Pressão de ruptura

A bancada deverá suportar, sem rompimento de qualquer componente, uma pressão de até 4 vezes a pressão máxima de operação

3.16. Interface mecânica

3.16.1. Conexões

As conexões da linha de alimentação com os dispositivos de montagem dos elementos injetores e placas injetoras deverão permitir um mínimo de 100 operações de montagem e desmontagem sem degradação vedação após remontagem. A conexão dos dispositivos de teste com a linhas de alimentação deverá ser realizada por meio de mangueiras flexíveis, que suportem pressão de trabalho de até 5000 kPa.

3.16.2. Tanques

O sistema irá contar com quatro tanques, para Dióxido de Carbono gasoso, Nitrogênio líquido, Nitrogênio gasoso e o tanque principal onde ficará armazenado para o teste o Dióxido de Carbono líquido.

O tanque principal será dotado de serpentinas para que ocorram as trocas de calor necessárias com o Nitrogênio gasoso e o Nitrogênio líquido. Este tanque deverá ser do tipo camisa dupla com isolamento a vácuo para evitar trocas de calor com o ambiente.

3.16.3. Entradas de gases de pressurização

A linha de pressurização deverá ter três entradas independentes podendo cada uma delas ser utilizadas para pressurizar qualquer dos tanques.

3.16.4. Fixação e envelope do dispositivo de teste

O dispositivo de testes terá alocado na bancada um espaço delimitado por um cubo de no mínimo 30 cm de aresta. A face superior do cubo deverá ser equipada com uma barra para fixação do dispositivo. Os dispositivos de caracterização do jato de propelente e coleta pontual medidas da distribuição de vazão e razão de mistura deverão ser montados na face inferior deste cubo.

3.16.5. Interface elétrica

Equipamentos elétricos utilizados na bancada deverão ser de preferência compatíveis com alimentação de 110 Volts. Caso algum equipamento não seja compatível com essa voltagem deverá ser utilizado um transformador. A bancada deverá ser equipada com uma régua de tomadas com pontos suficientes para a ligação de todos os equipamentos elétricos da bancada e no mínimo 5 pontos para a ligação de equipamentos extras.

3.16.6. Números de linhas de alimentação

A bancada deverá ter pelo menos duas linhas de alimentação independentes e que possam ser operadas simultaneamente com controle individual da pressão em cada linha.

3.16.7. Materiais e processos

Todas as válvulas, tubos, conexões e equipamentos em contato direto com o fluido de trabalho deverão ser de um material resistente a baixas temperaturas (**aço criogênico**). Chapas, painéis e barras de suporte deverão ser também construídos em aço inoxidável, ou materiais tratados para evitar corrosão ou degradação.

3.16.8. Contaminação

Os materiais e componentes utilizados na montagem da bancada, quando operados nas condições de pressão e vazão especificados, não deverão liberar partículas ou substâncias que contaminem os fluidos de simulação envolvidos. A linha de entrada de líquido de cada tanque deverá ser equipada com um filtro absoluto de 15mm.

Uma amostra de 300 ml recolhida após passagem pelas linhas de alimentação não deverá exceder a contagem ou distribuição de particulado listada na Tabela 1. 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 1: Tamanho e contagem de partículas



3.16.9. Fluidos de trabalho

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

3.16.10. Identificação de componentes e marcação

Todos os equipamentos e componentes utilizados em procedimentos de operação deverão estar claramente marcados e identificados, a fim de evitar acidentes ou danos aos equipamentos.

3.16.11. Manutenção

A distribuição das válvulas e componentes nas linhas de alimentação deverá facilitar o acesso e desmontagem para inspeção ou reparo do equipamento.

3.16.12. Partes sujeitas a desgaste e degradação

Componentes e partes sujeitas a desgaste ou degradação deverão ser fornecidos com kits de reposição. O assento das válvulas deverá suportar, sem degradação, um número mínimo de 1000 ciclos de abertura e fechamento.

3.16.13. Perda de carga nas linhas

A perda de carga das linhas de alimentação, exceto válvulas de controle de fluxo, não poderá ser superior a 100 kPa para toda a faixa de vazão especificada.

3.16.14. Modos de operação

O dispositivo de medida poderá operar em modo contínuo ou pulsado. Testes em modo contínuo poderão ter duração de até 200 segundos. Em modo

pulsado, o intervalo de tempo mínimo em que as válvulas permanecem abertas deverá ser de 20 ms para injetores monopropelentes e 100 ms para injetores bipropelentes.

3.16.15. Transitórios de partida e fechamento

Na abertura e fechamento das válvulas do dispositivo de testes os medidores de vazão deverão atingir regime estacionário em num intervalo de tempo inferior a 100 ms.

3.16.16. Golpe de aríete

As linhas de alimentação deverão ser dimensionadas para evitar golpes de aríete com sobre-pressão superior a 1 MPa, para todo o envelope operacional da bancada.

3.16.17. Controle de vazão

Cada linha de alimentação deverá conter válvulas de ajuste fino para controle da vazão do fluido de simulação. O número e intervalos de controle das válvulas de controle de vazão deverão cobrir toda a faixa de vazão e pressão especificados.

3.16.18. Estanqueidade

A taxa total de vazamento das duas linhas de alimentação juntamente com os tanques de alimentação não deverá ser superior a 50 Paxl/min quando pressurizados com nitrogênio gasoso até 10 bar.

3.16.19. Instrumentos de medidas

A bancada deverá conter medidores de pressão, de vazão, de temperatura e de deslocamento volumétrico que permitam determinar com uma

precisão pré-definida as características hidráulicas geométrica e de mistura dos fluxos de propelentes gerados por elementos da bancada e placas injetoras.

3.16.20. Medidas de pressão

Medidores de pressão deverão ser instalados em cada tanque e linha de alimentação. Os medidores de pressão da linha de alimentação deverão indicar a pressão do fluido à entrada do dispositivo de teste. Cada tanque deverá também ser equipado com um manômetro para leitura direta. Os medidores de pressão deverão ser equipados com mostrador digital e saída analógica para sistemas de aquisição de dados. No caso das medidas de pressão o sinal de aquisição deverá permitir uma taxa de aquisição de no mínimo 10000 amostras por segundo. Isto deverá permitir detectar oscilações de pressão com frequências de até 2.5 kHz.

3.16.21. Precisão de medidas de pressão

Os transdutores de pressão deverão ter precisão melhor que 0,5% do valor absoluto da medida ou 5 kPa, Os manômetros deverão ter resolução de 0,1 bar e precisão melhor que 0,2 bar.

3.16.22. Medidas de vazão

Cada linha deverá ser equipada com medidores de vazão que operem na faixa de medidas de 1 ml/s a 100 ml/s. Uma das linhas deverá ser equipada adicionalmente com um medidor para a faixa de 0,2 a 2 ml/s. Medidores para diferentes faixas de operação poderão ser instalados em paralelo. Cada medidor deverá também fornecer uma saída de sinal analógico para sistemas de aquisição de dados.

Devido o medidor de vazão não resistir a grandes diferenças de pressão, o circuito da bancada terá um sistema de Bypass (Figura 3), fazendo com que o fluido só passe pela válvula direcional manual direita antes de iniciar o teste

e, após a estabilização das pressões possa abrir as duas válvulas direcionais manuais da esquerda e fechar a válvula da direita.

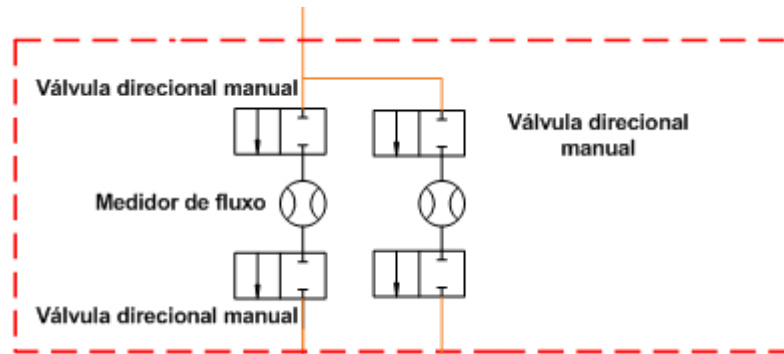


Figura 3- Detalhe do Bypass

O medidor de vazão que deve ser empregado no sistema é do tipo Vortex (Figura 4), devido poder realizar medição de vazão em escoamentos multifásicos e também suportar baixas temperaturas. Um canal de vortex de Karman é formado atrás da haste geradora de vortex, por exemplo: a vazão do fluido gera vortices que são formados em ambos os lados. A formação de vortex é proporcional a velocidade do fluido. Cada vortex cria uma pequena pressão negativa, que é detectada por um sensor de pressão capacitivo, e convertido em pulso elétrico. Um transmissor converte o sinal de pulso para um sinal de saída padrão.



Figura 4- Medidor de vazão do tipo Vortex

Para assegurar o bom funcionamento do medidor, a montagem do mesmo deve seguir alguns cuidados. Primeiramente ele deve ser montado em uma tubulação horizontal para que seja capaz de medir líquidos, gases e vapor. E deve ter os espaçamentos mostrados na Figura 5 de acordo com os componentes que o precedem e o sucedem.

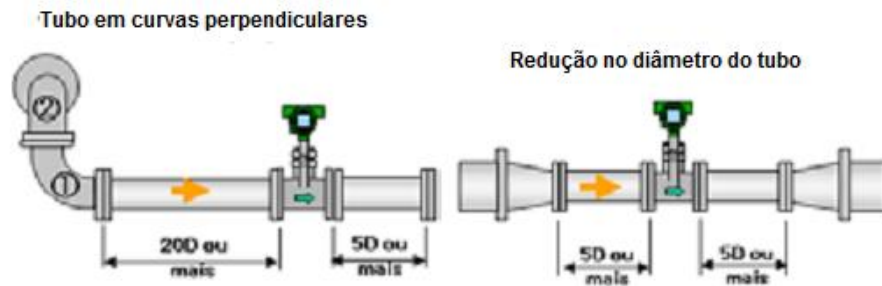


Figura 5 - Cuidados na montagem com o medidor de vazão

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.

3.16.23. Precisão das medidas de vazão

A medida de vazão, em toda a faixa de operação deverá ser efetuada com erro máximo de 3% do valor medido, afim de evitar variações nos valores encontrados durante o ensaio.

3.16.24. Sensor de deslocamento volumétrico

Este sensor deverá medir a quantidade de fluido expulso durante um único pulso e a quantidade expulsa ao longo de uma rajada de pulsos. A faixa de operação do sensor deverá ser de 0,01 ml a 10 ml.



3.16.25. Aquisição e armazenamento de dados

Os sinais dos transdutores de pressão e medidores de vazão deverão ser capturados e armazenados por um sistema dedicado de aquisição de dados. Em um primeiro caso o equipamento deverá mostrar os dados do teste.

3.16.26. Visualização dos dados

Os dados adquiridos deverão ser mostrados em um monitor em tempo real e em processamento posterior.

3.16.27. Dados dados armazenados

Os dados armazenados deverão ser compatíveis com programas aplicativos gráficos e de manipulação de bancos de dados.

3.17. Operação

Os testes de medida de vazão poderão ser feitos através de operação manual das válvulas de saída, ou através de comando das válvulas eletro-pneumáticas pelo sistema de controle de operação e aquisição de dados. No caso de operação automática os comandos de abertura e fechamento das válvulas eletro-pneumáticas serão programados previamente quanto a largura e número de pulsos.

3.17.1. Disposição dos mostradores de vazão e pressão

Os mostradores de pressão e vazão deverão ser agrupados em um bloco para facilitar a operação da bancada e monitoração das medidas nos diferentes pontos da bancada.



3.17.2. Segurança e durabilidade do equipamento

Este é um ponto importante no desenvolvimento da bancada, pois serve para que o processo de operação e durabilidade do equipamento sejam garantidos faz com que os dados extraídos a cada teste sejam confiáveis.

3.17.3. Uso de equipamento de segurança pessoal

A operação da bancada não deverá requerer o uso de equipamentos especiais de proteção e segurança por parte dos operadores. O equipamento deverá possuir confiabilidade suficiente para evitar danos ao operador e até mesmo ao próprio equipamento.

3.18. Provisões de garantia do equipamento

A conformidade do equipamento será verificada através de análise, inspeção e testes.

Todos os componentes e instrumentos de medida utilizados deverão ser certificados pelos respectivos fornecedores quanto aos requisitos de ambiente operacional segurança, precisão e durabilidade. A critério do INPE, caso a verificação de conformidade destes componentes não seja conclusiva, testes adicionais serão realizados.

3.19. Condições gerais de teste

3.19.1. Procedimentos de teste

Os testes realizados para verificar conformidade serão realizados de acordo com procedimentos aprovados pelo INPE.

3.19.2. Medidas

A precisão dos instrumentos de medida e equipamento de teste deverá ser verificada. Caso os valores mensurados não estejam dentro do estipulado,

o instrumento em questão deve ser ajustado ou em ultimo caso substituído por outro.

3.19.3. Relatório de teste

Ao final de cada teste formal deverá ser elaborado um relatório de testes, indicando todo o procedimento realizado e como foi o teste (se atingiu os objetivos esperados).

3.19.4. Critério de falha

A bancada não deverá apresentar falha ou degradação de desempenho resultantes dos testes aqui especificados. A constatação de tais falhas será motivo para rejeição do produto.

3.20. Requisitos de teste

3.20.1. Inspeção

A bancada será inspecionada quanto aos requisitos aplicáveis listados abaixo de acordo com esta especificação.

3.20.2. Materiais e processos

A bancada será inspecionada visualmente e os documentos de fabricação serão revistos para verificar conformidade de materiais utilizados com requisitos de especificação. A inspeção deverá verificar no mínimo o seguinte:

- (a) Finalização do produto;
- (b) Conformidade com documentos de projeto e de fabricação;
- (c) Finalização de todos os processos de montagem e certificação de componentes;
- (d) Materiais, partes e acabamento.



3.20.3. Teste de pressão de prova

A bancada, com todas as válvulas abertas, será pressurizada até o limite de 1,5 vezes na máxima pressão operacional. Este nível de pressão será mantido durante um intervalo mínimo de 2 minutos. Qualquer evidência de deformação permanente ou falha de qualquer natureza será motivo para rejeição.

3.20.4. Estanqueidade e vazamentos

A bancada será pressurizada a 4Mpa com nitrogênio gasoso e a taxa de vazamento será determinada de acordo com os requisitos.

3.20.5. Teste funcional

A bancada deverá ser submetida a todos os testes listados ao longo relatório para que possa ser verificada a conformidade de cada ponto.

4. OPERAÇÃO DA BANCADA DE ENSAIO

As operações realizadas na bancada devem ser reguladas por procedimentos de trabalho prescritos e controlados pelo líder de projeto ou delegada ao pessoal responsável pelas diferentes áreas de atuação.

O escopo de tarefas durante uma campanha de teste está dividido em:

- Manuseio da amostra;
- Compilação e gestão de instruções de trabalho (procedimentos);
- A execução do teste;
- Análise de dados de teste;
- Funcionamento da bancada;
- Operação de um sistema de medição, controle e comando (MCC).

Para operação da bancada, deverá ser feito o condicionamento do tanque de CO₂, onde o mesmo deverá ser pressurizado. Após isso é

necessário condicionar a linha, neste ponto entra a preparação da linha com vácuo para evitar que tenha gelo no sistema, a quantidade de calor que deve ser retirada da linha. Após a linha ser totalmente condicionada, o teste deverá ser executado.

4.1. Instruções de trabalho

Todas as informações e dados necessários para a execução do teste constituem a base de dados. Eles devem existir na forma escrita, em mídia portátil de dados ou devem ser armazenados em um banco de dados on-line e fazem parte da documentação global. O líder do projeto é responsável pelo controle dessa documentação. O autor dessa informação / dados é o cliente (solicitação de teste, especificação sensor, folha de inspeção, etc) e da equipe de teste (plano de banco de medição, especificação de diagramas, os parâmetros de ajuste da bancada de ensaios).

As instruções de trabalho (procedimentos) e programas de computador referem-se a esta base de dados e por sua vez, precisamente e controla diretamente o funcionamento do motor e da unidade. Devido à sua influência direta sobre o ensaio, os procedimentos e as sequências são submetidas a um processo de validação extensiva. Procedimentos básicos devem ser apresentados para o usuário da bancada de teste em uma versão preliminar e caso for necessário, acrescentar seus comentários justos. O autor usa esses comentários para a revisão, atualização e manutenção dos procedimentos. As sequências devem passar por uma validação especial antes de sua aplicação em um teste. Devido ao risco implícito, o valor da amostra e instalação, bem como o elevado custo associado ao, as sequências de teste devem ser testadas três vezes. O líder de teste, o teste requisitante (cliente) e a garantia de qualidade devem certificar-se de tudo e de que todas as sequências estão em bom funcionamento antes de prosseguir para o teste.

5. ESQUEMA BÁSICO DO CIRCUITO

O circuito foi desenvolvido tomando como base os equipamentos listados no item “1. DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO”. O programa utilizado para desenvolver o circuito foi o Microsoft Visio 2007. Na Figura 5 é possível ver com maior detalhe o circuito base.

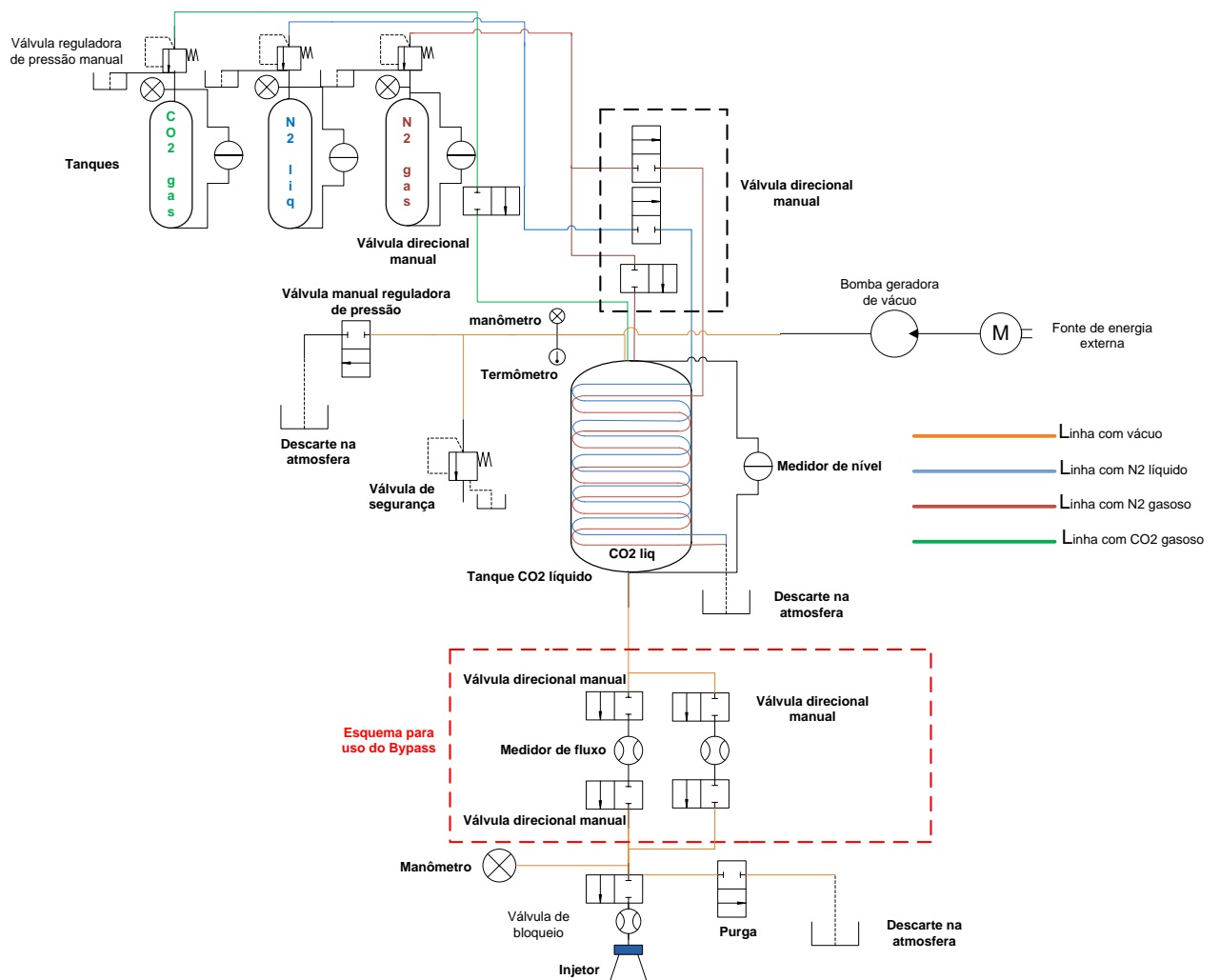


Figura 5 - Circuito base para a bancada de teste

6. MODELAGEM EM CAD

A bancada de testes foi modelada utilizando o programa SolidWorks, afim de se ter uma melhor visualização de como o projeto final irá ficar. Com a modelagem é possível verificar a disposição das válvulas e mostradores (manômetros, termômetros e indicadores de vazão) em relação ao operador.

O modelo desenvolvido neste projeto levou como base a bancada que se encontra no laboratório do INPE, procurando utilizar os mesmos materiais estruturais afim de se ter uma maior facilidade construtiva. Serão utilizadas barras que podem ser encaixadas umas nas outras para facilitar a montagem e desmontagem do equipamento.

Os processos seguintes são a geração das plantas para que se possa ter um melhor controle de todos os equipamentos da bancada. Na Figura 6 é possível ter uma noção de o projeto irá ficar.

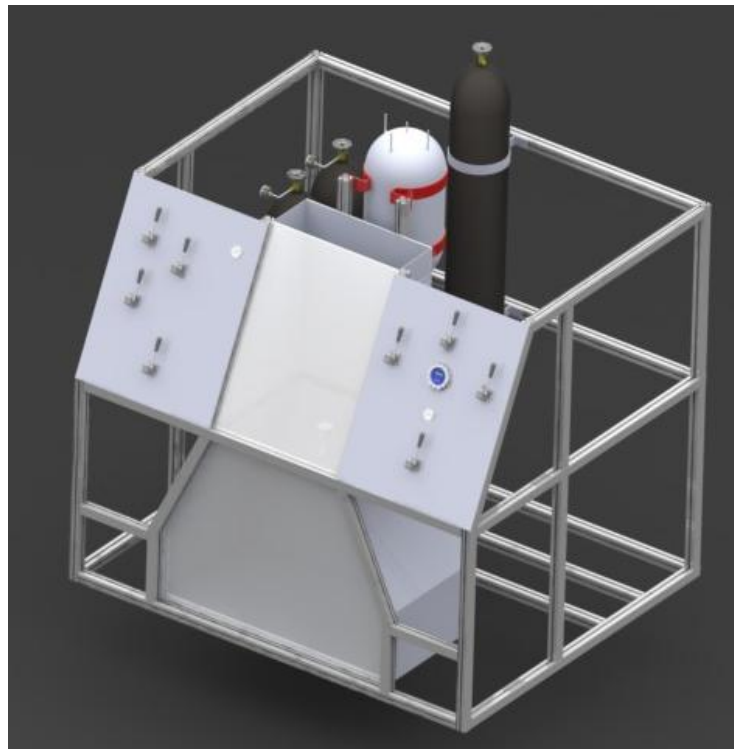


Figura 6 – Modelo da bancada de teste

Foi modelado também o tanque onde ficará o CO₂ líquido (Figura 7), os tanques para CO₂ gasoso e NO₂ gasoso (Figura 8), Nitrogênio líquido (Figura 9).



Figura 7 – Tanque de CO₂ líquido



Figura 8 – Tanque de CO₂ gasoso e N₂ gasoso



Figura 9 – Tanque de N2 líquido



7. REFERÊNCIAS:

DIGIFLOW (Org.). **Medidor de Vazão tipo Vortex Para líquidos, gases e vapores**. Disponível em: <http://www.digiflow.com.br/adm/imagens/s5pt_pwl.pdf>. Acesso em: 28 maio 2013.

GAMA GASES (São Paulo) (Ed.). **Propiedade dos Gases**. Disponível em: <<http://www.gamagases.com.br/propriedades.htm>>. Acesso em: 22 dez. 2012.

TECÉM TECNOLOGIA EMPRESARIAL LTDA. **Noções Elementares de Sistemas Hidráulicos**: Parte 3. Belo Horizonte, 2009.

KITSCHKE, Wolfgang. **Operation of a Cryogenic Rocket Engine**. New York: Springer, 2009. 142 p.