

Projeto Motor Foguete a Propelente Líquido L75

Daniel Soares de Almeida

A tecnologia para projetar, fabricar, testar e operar MFPL é um dos objetivos a serem alcançados pelo PNAE (Programa Nacional de Atividades Espaciais) e o Projeto L75 está incorporado ao PPA 2012-2015 (Plano Plurianual) no Programa 2056 (Política Espacial), Objetivo 0555, “Desenvolver e ampliar o conhecimento das tecnologias críticas para garantir o uso autônomo das aplicações espaciais”.

Objetivo do Projeto:

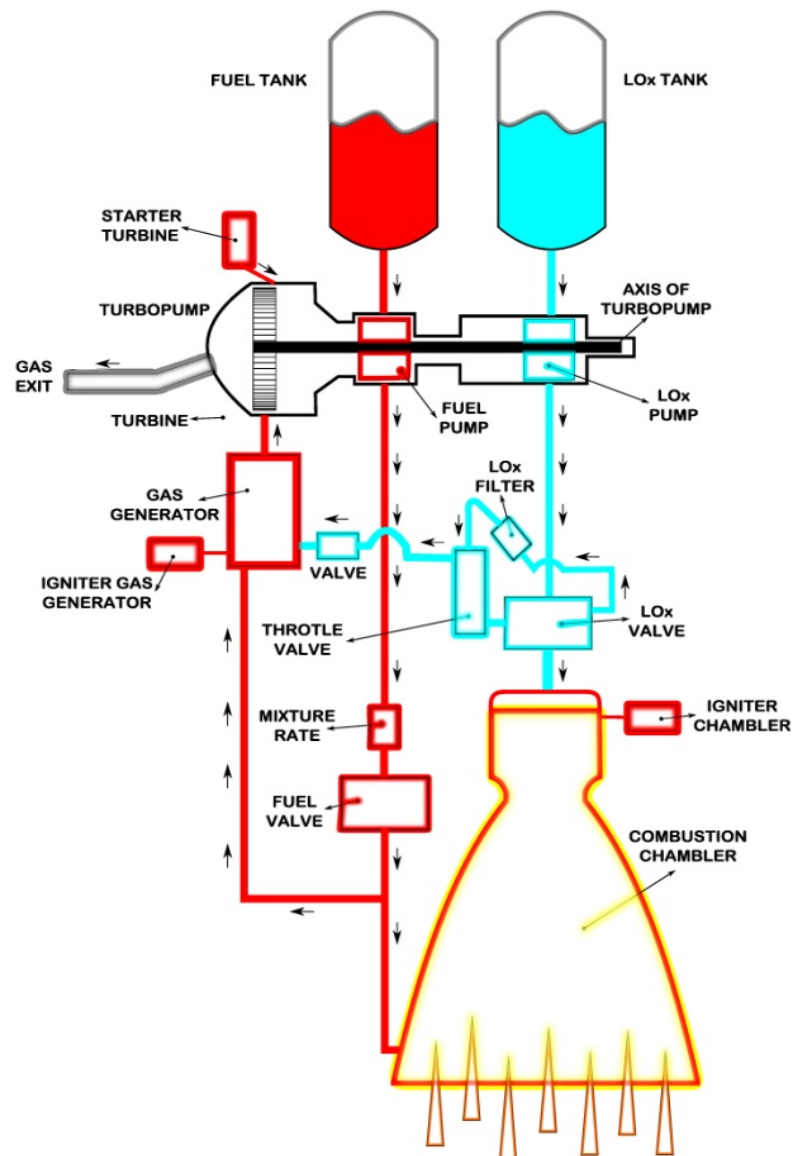
Capacitar equipe para desenvolvimento das atividades em Propulsão Líquida.

Especificação Funcional do Motor L75:

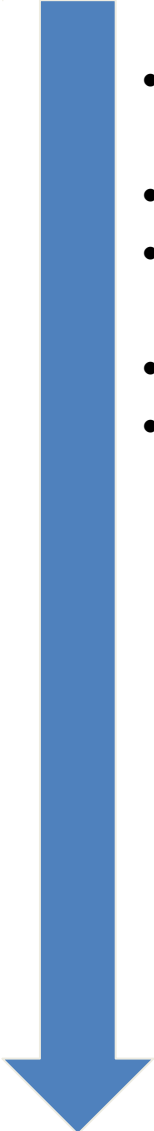
Motor foguete a propelente líquido capaz de gerar empuxo de 75,0 kN no vácuo para uso em estágio superior de um veículo lançador de satélite.



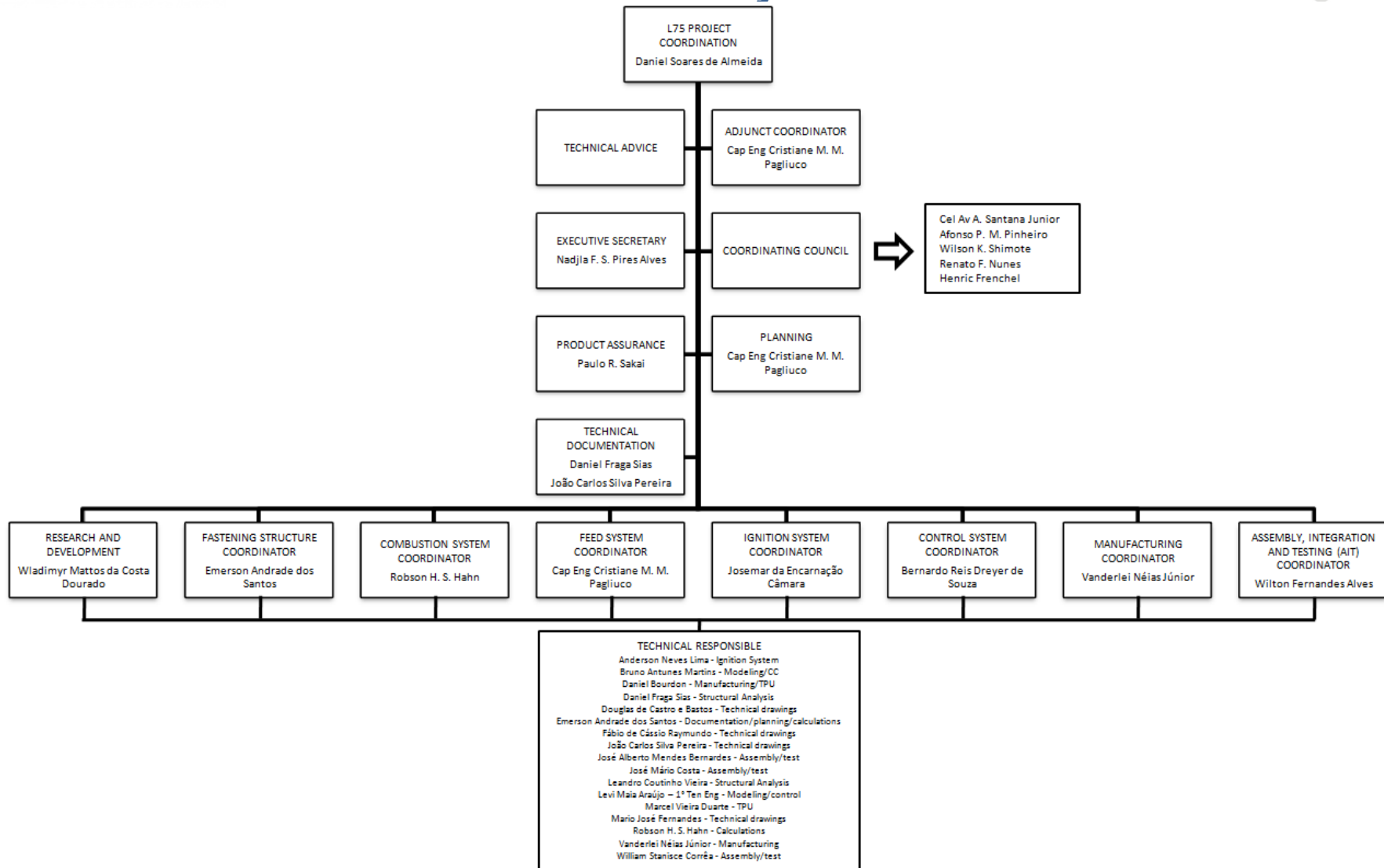
Esquema de operação do Motor L75



Histórico do Projeto L75

- 
- 1997-1998 – Curso de Motor Foguete, Moscow State Aviation Institute (MAI), Moscou, Rússia, 18 especialistas do IAE formados;
 - 2002 - Projeto L5 (primeiro MFPL desenvolvido pelo IAE);
 - 2005-2010 - Mestrado profissional em Engenharia Aeroespacial MAI/ITA/IAE, 90 estudantes graduados;
 - 2007 – Criação da Divisão de Propulsão Espacial;
 - 2008 – Início do Projeto L75:
 - 2009 – Revisão de projeto SRR;
 - 2010 – 2012 – Contrato FUNCATE: serviços técnicos para suporte ao desenvolvimento do projeto - 20 especialistas (~U\$3M);
 - 2011 – Revisão de projeto PDR;
 - 2012 – Assinatura da “Letter of Exchange” AEB-DLR para cooperação no desenvolvimento e testes do motor L75;
 - 2013 – 2015 – Convênio FUNDEP: para continuidade do projeto (16 especialistas), fabricação e testes de alguns dos componentes (~U\$29M);
 - 2013 – Mudança do combustível querosene para etanol.

WBS do Projeto L75



Organização do desenvolvimento do Projeto

Norma adotada: ECSS (EUROPEAN COOPERATION FOR SPACE STANDARDIZATION).
A ECSS-E-30 define regras para desenvolvimento, produção e operação de produtos espaciais.

- MDR - Mission definition review

- SRR - System requirements review

- PDR - Preliminary Design review

- CDR - Critical design review

- QR - Qualification review

Estratégia de desenvolvimento e verificação

A estratégia de desenvolvimento do Motor L75 é baseada na definição de modelos de desenvolvimento e modelos de engenharia dos componentes, partes e subsistemas do Motor para verificação do atendimento aos requisitos.

Um programa de verificação é estabelecido através de um Plano de Desenvolvimento e Verificação, de acordo com as especificações do Motor L75, considerando os métodos de verificação (teste, análise, revisão do projeto, inspeção), níveis, modelos e requisitos a serem verificados.

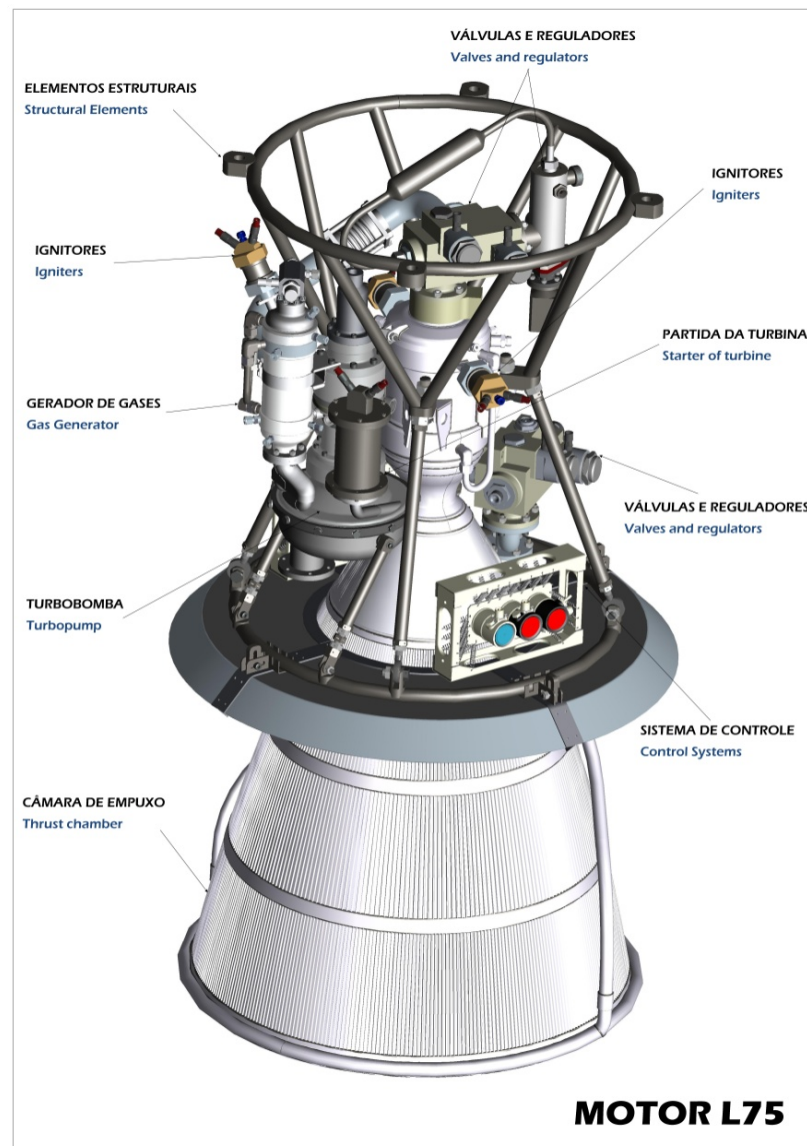
CRONOGRAMA RESUMIDO DE DESENVOLVIMENTO DO MOTOR L75

	DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES	2010		2011		2012		2013		2014		2015		2016		2017		2018		2019		2020		2021		2022	
		1ºS	2ºS	1ºS	2ºS	1ºS	2ºS	1ºS	2ºS	1ºS	2ºS	1ºS	2ºS	1ºS	2ºS	1ºS	2ºS	1ºS	2ºS	1ºS	2ºS	1ºS	2ºS	1ºS	2ºS	1ºS	2ºS
01	DESENVOLVIMENTO DO MEMORIAL DE CÁLCULO E ANÁLISE																										
02	PROJETO MECÂNICO PRELIMINAR																										
03	PROJETO MECÂNICO DOS MODELOS DE DESENVOLVIMENTO																										
04	FABRICAÇÃO DOS MODELOS DE DESENVOLVIMENTO																										
05	TESTES DOS MODELOS DE DESENVOLVIMENTO																										
06	REVISÃO PRELIMINAR DE PROJETO (PDR)																										
07	ESPECIFICAÇÃO DOS COMPONENTES E TESTES																										
08	REALIMENTAÇÃO DO MEMORIAL DE CÁLCULO																										
09	PROJETO MECÂNICO DETALHADO																										
10	PROJETO DE FABRICAÇÃO																										
11	PROCEDIMENTOS DE MONTAGEM, INSPEÇÃO E TESTE																										
12	FABRICAÇÃO DA CÂMARA EMPUXO CURTA DM																										
13	FABRICAÇÃO DA TURBOBOMBA DM																										
14	FABRICAÇÃO DAS VÁLVULAS E REGULADORES DM																										
15	FABRICAÇÃO DO GERADOR DE GÁS DM																										
16	FABRICAÇÃO DO SISTEMA DE IGNIÇÃO DM																										
17	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE DM																										
18	CONSTRUÇÃO DO BANCO DE TESTES DE BOMBAS E TURBINA - FASE 1																										
19	CONSTRUÇÃO DO BANCO DE TESTES DE BOMBAS E TURBINA - FASE 2																										
20	CONSTRUÇÃO DO BANCO DE TESTES DE BOMBAS E TURBINA - FASE 3																										
21	PROJETO BÁSICO DOS BANCOS DE ENSAIO																										
22	TESTES DOS MODELOS DE DESENVOLVIMENTO (DM) PREVISTOS EM CONTRATO																										
23	REALIMENTAÇÃO DO PROJETO DETALHADO																										
24	PROJETO MECÂNICO DOS MODELOS DE ENGENHARIA (EM)																										
25	PROJETO EXECUTIVO DO BANCO DE ENSAIO DE 100 kN																										
26	CONSTRUÇÃO DO BANCO DE ENSAIO DE 100 kN																										
27	DESENVOLVIMENTO/FABRICAÇÃO DOS MODELOS DE ENGENHARIA (EM)																										
28	TESTES DOS MODELOS DE ENGENHARIA (EM) PREVISTOS EM CONTRATO																										
29	REVISÃO CRÍTICA DO PROJETO (CDR)																										

 Contrato FUNCATE nº 030/GIA-SJ/2009
 Convênio FUNDEP nº 775573/2012
 A definir

Principais sistemas

- Câmara de Combustão
- Gerador de Gás
- Turbobomba
- Válvulas e reguladores
- Sistema de Ignição
- Estruturas de fixação
- Sistema de controle



Principais parâmetros do Motor L75

Propelentes	LOx / Etanol
Razão de mistura global	1,47
Empuxo (vácuo) [kN]	75 ± 5
Vazão de combustível [kg/s]	9,5
Vazão de oxidante [kg/s]	14,0
Pressão de câmara [MPa]	6,0
Razão de expansão de pressão	2250
Impulso específico (vac.) [m/s]	> 2940
Tempo de operação [s]	400
Massa [kg]	< 270

Sistema de Combustão

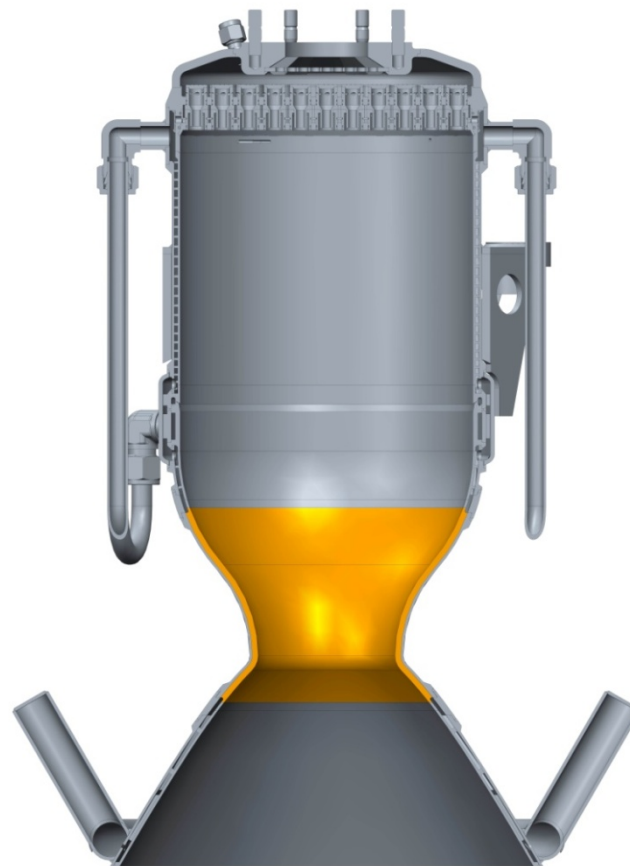
- Projeto baseado no RD-0109 e RD-0110;
- Empuxo de 75kN, capaz de operar como motor de estágio superior de um veículo lançador;
- Razão de expansão projetada para operar em condições de vácuo em altitudes superiores a 30km;
- Versão com baixa razão de expansão para permitir ensaios ao nível do mar;
- 91 injetores no cabeçote garantindo uma boa mistura dos propelentes.

Sistema de Combustão

Câmara de Empuxo

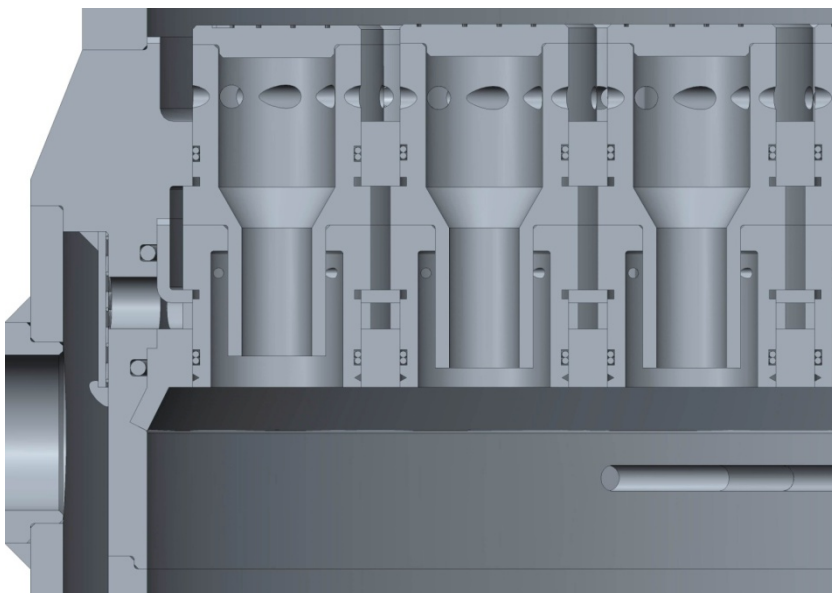


Câmara de empuxo curta

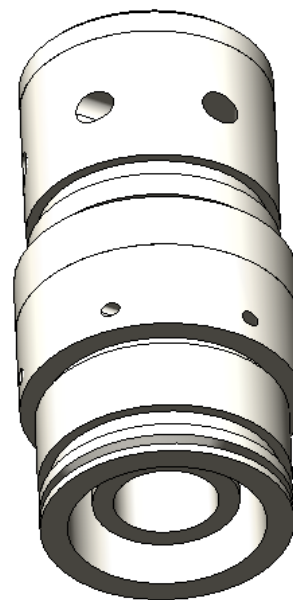


Sistema de Combustão

Bloco de Injeção

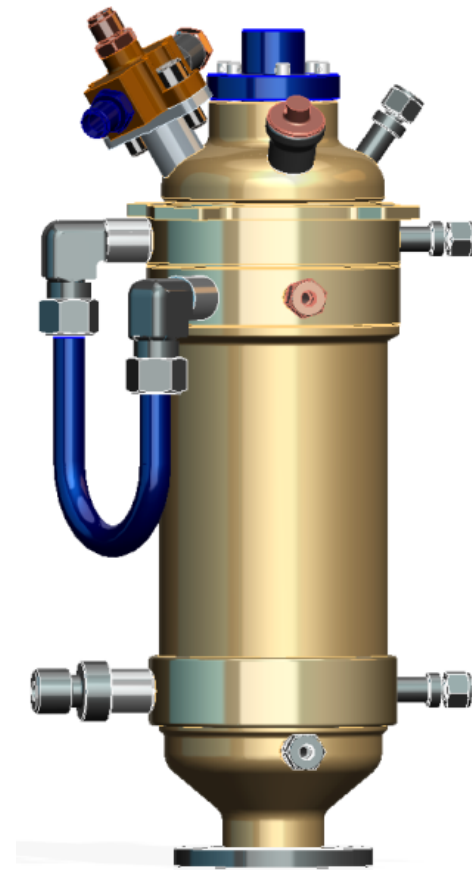


Injetores



Sistema de Combustão Gerador de Gás

- Utiliza os mesmos propelentes da câmara de combustão;
- Alimenta a turbobomba;
- Rico em combustível para evitar oxidação dos metais à altas temperaturas;
- Razão de mistura limitada pela máxima temperatura admissível pelo material da turbina.

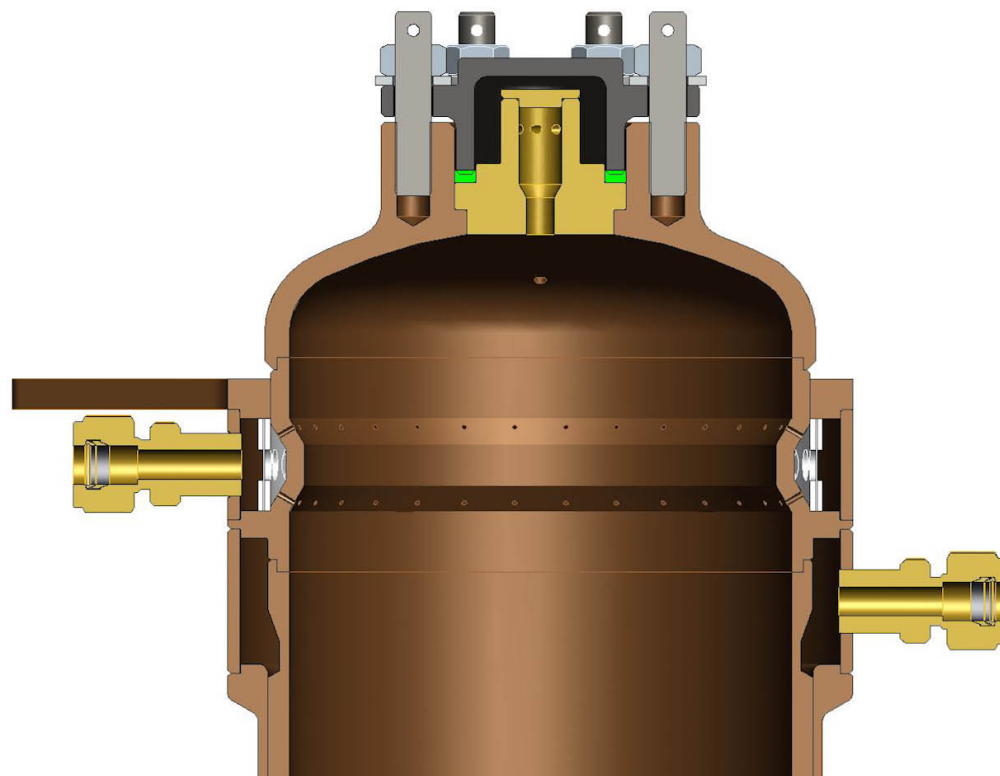


Projeto do Gerador de Gás

Injetor

Cinta de Injeção

Jaqueta de resfriamento



Sistema de Alimentação

- Funções:
 - Fornecer o par propelente nas pressões, vazões e temperaturas necessárias ao correto funcionamento do Sistema de Combustão.
 - Preparação para início de operação e limpeza após funcionamento do Motor.
- Principais requisitos:
 - Preparação para operação;
 - Partida da Turbobomba;
 - Regulagem da razão de mistura;
 - Regulagem do módulo do vetor empuxo;
 - Desligamento do Motor.

Sistema de Alimentação

Principais Características da Tubobomba:

Bomba de oxidante, bomba de
combustível e turbina em um mesm
eixo.

Rotação: 24.000 rpm

Turbina:

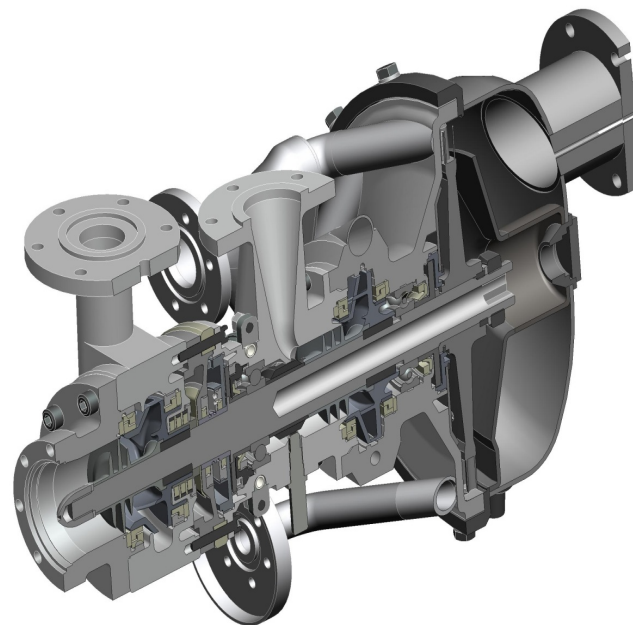
Potência: 400 kW

Pressão de entrada: 4,7 MPa

Pressão de saída: 0,35 MPa

Vazão de gás: 1,13 kg/s

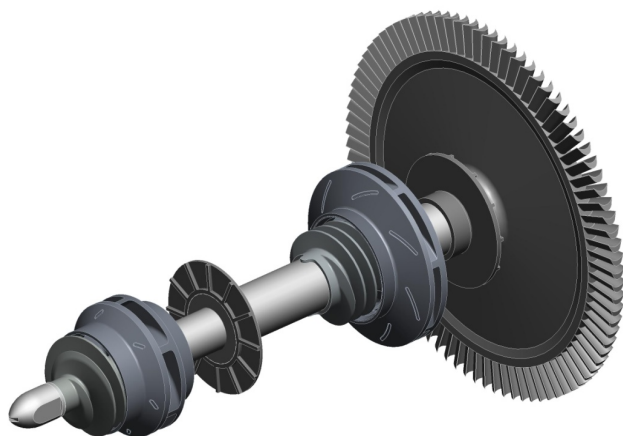
Temperatura máxima nas pás: 900 K



Insert Mode
Clipping State:A

Sistema de Alimentação

Principais Características da Turbobomba



Insert Model

Bomba de Oxidante:

Pressão de entrada: 0,4 MPa

Pressão de saída: 7,6 MPa

Temperatura de operação: 90 K

Vazão mássica: 14,0 kg/s

Bomba de Combustível:

Pressão de entrada: 0,25 MPa

Pressão de saída: 10,6 MPa

Temperatura de operação: 303 K

Vazão mássica: 9,5 kg/s

Grupo Rotativo

Componentes do Sistema de Alimentação

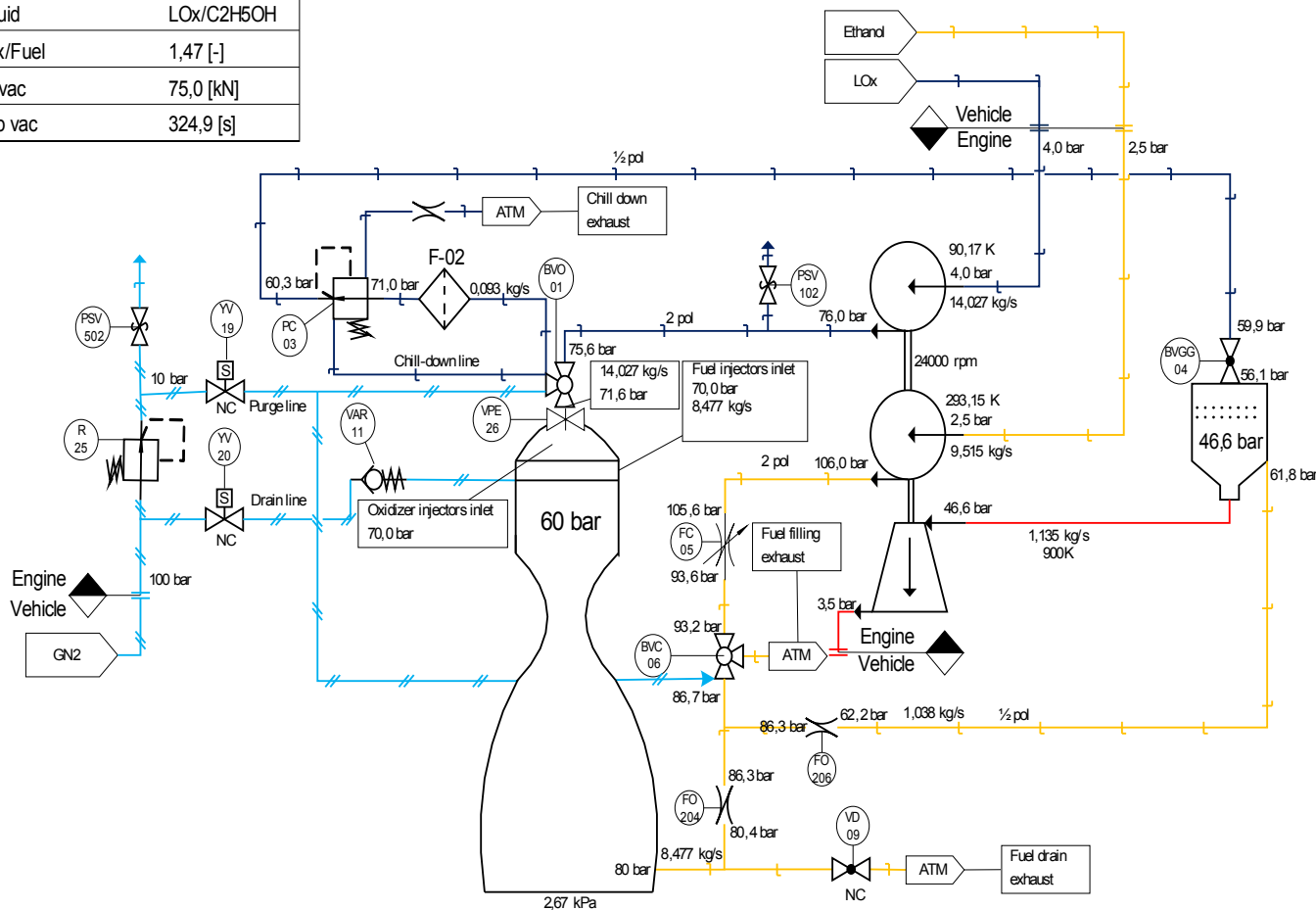
- Linha de Oxidante:
 - ✓ Tubulação de oxidante
 - ✓ Filtro de oxigênio líquido – F02
 - ✓ Bloco de válvulas de oxidante – BVO 01
 - ✓ Bloco de válvulas do gerador de gás – BVGG 04
 - ✓ Válvula de segurança – V10
 - ✓ Válvula de pré-estágio – VPE 26
 - ✓ Regulador de Empuxo – PC 03

Componentes do Sistema de Alimentação

- Linha de Combustível:
 - ✓ Tubulação de combustível
 - ✓ Bloco de válvulas de combustível – BVC 06
 - ✓ Válvula dreno de combustível – VD 09
 - ✓ Orifício calibrado da CC – OC 07
 - ✓ Orifício calibrado do GG – OC 08
 - ✓ Regulador de Razão de Mistura – FC 05

Diagrama do ciclo do Motor L75

L75E	
Fluid	LOx/C ₂ H ₅ OH
Ox/Fuel	1,47 [-]
F vac	75,0 [kN]
Isp vac	324,9 [s]



Letter Codes
BVC – Fuel Valves Block
BVGG – Gas Generator Valves Block
BVO – Oxidizer Valves Block
F-02 – Oxidizer Filter
FC – Mixture ratio Valve
FO – Flow Orifice
PC – Thrust Regulator
PSV – Pressure Safety Valve
R – Pressure Regulator
VAR – Check Valve
VD – Drain Valve
VPE – Pre-stage valve
YV – Event-driven Valve

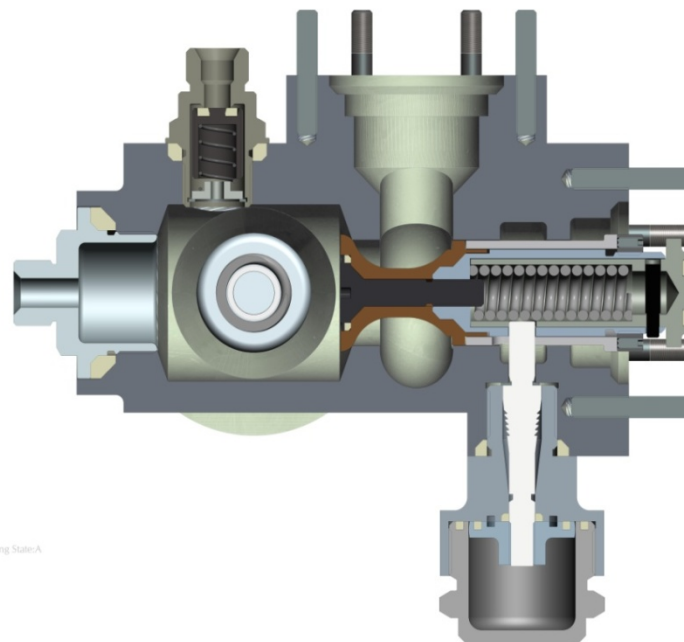
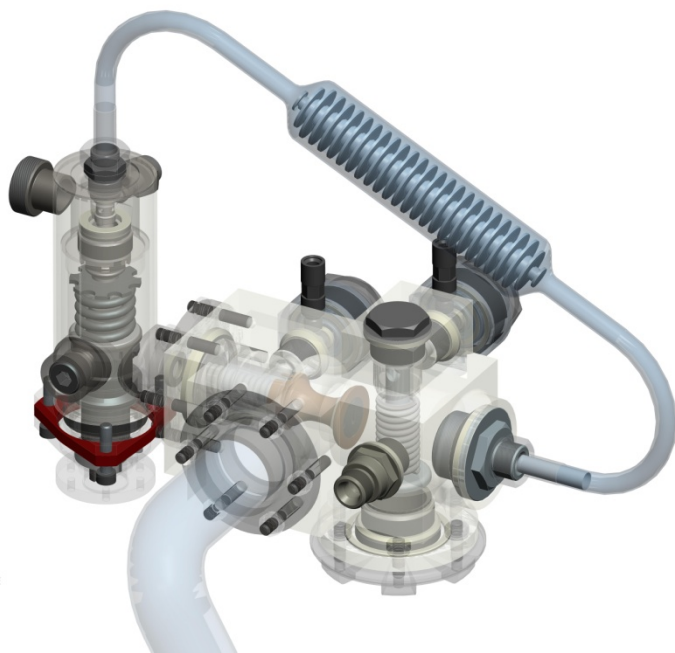
Number Codes
1XX – Oxidizer Line
2XX – Fuel Line
3XX – Thrust Chamber
4XX – TPU and GG
5XX – Purge and drain lines

— Liquid Oxygen
— Ethanol
— Gaseous Nitrogen
— Burnt Gases

Bloco de válvulas de oxidante

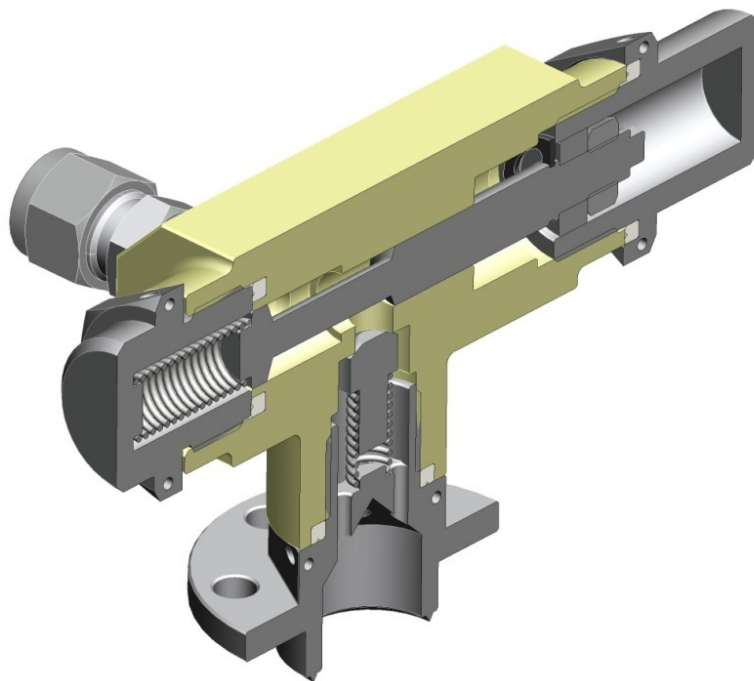
BVO 01

- Composta por 03 válvulas, sendo duas válvulas do tipo globo com acionamento pirotécnico e uma válvula anti-retorno;
- Funções de pré-resfriamento do regulador de empuxo, limpeza do cabeçote de injeção da CE e GG e interrupção do fluxo de oxidante para a CE no desligamento.



Bloco de válvulas do gerador de gás BVGG 04

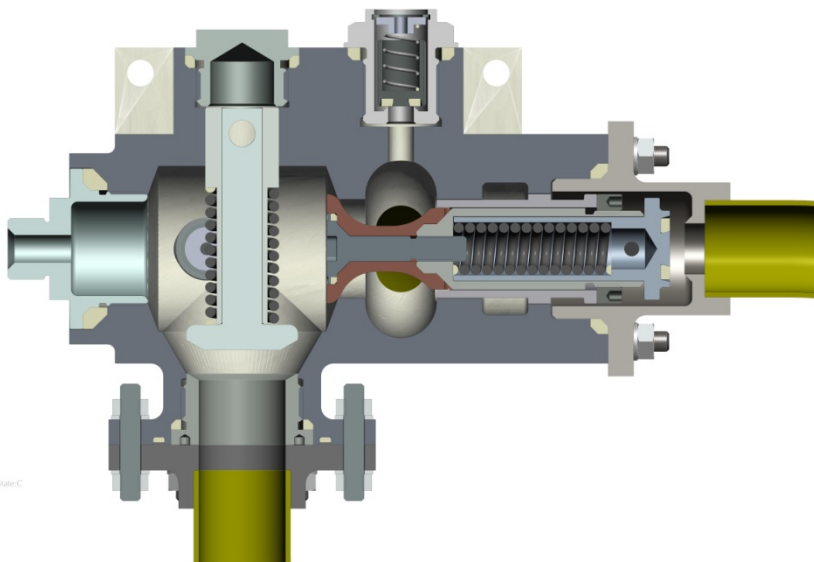
- Composto por 02 válvulas, uma do tipo globo com acionamento pirotécnico e uma válvula anti-retorno.
- Funções de interromper o fluxo de oxidante para o GG e impedir o retorno de oxidante para as linhas de alimentação.



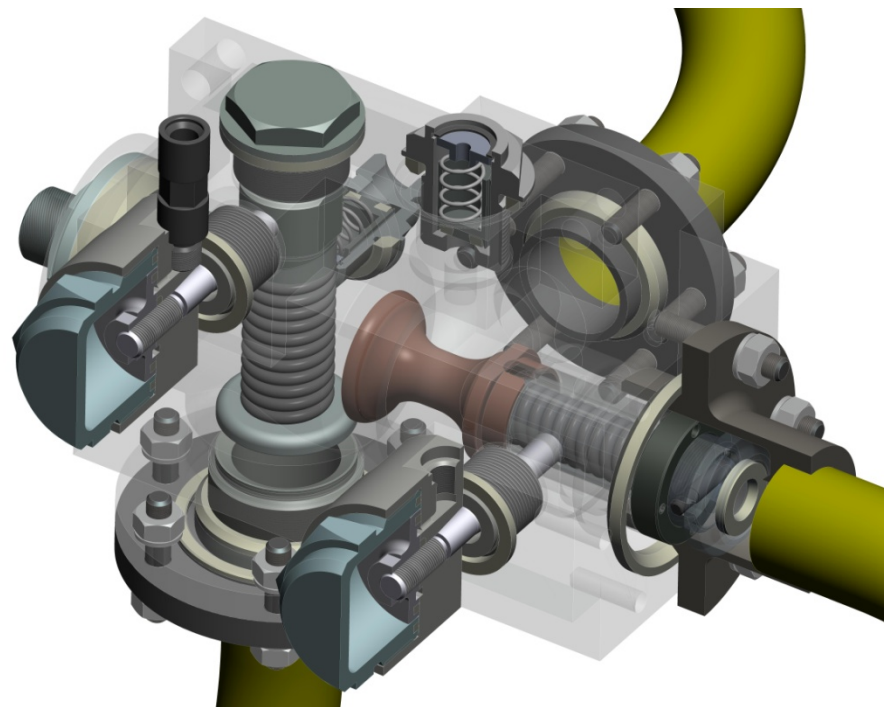
Bloco de válvulas de Combustível

BVC 06

- Composto por quatro válvulas: duas do tipo globo com acionamento pirotécnico, uma válvula anti-retorno e uma válvula de segurança;
 - Funções: permitir a limpeza das linhas de combustível, atuar em casos de sobrepressão na linha de combustível e interromper o fluxo de combustível para a CE e GG no desligamento do Motor.



Clipping State C



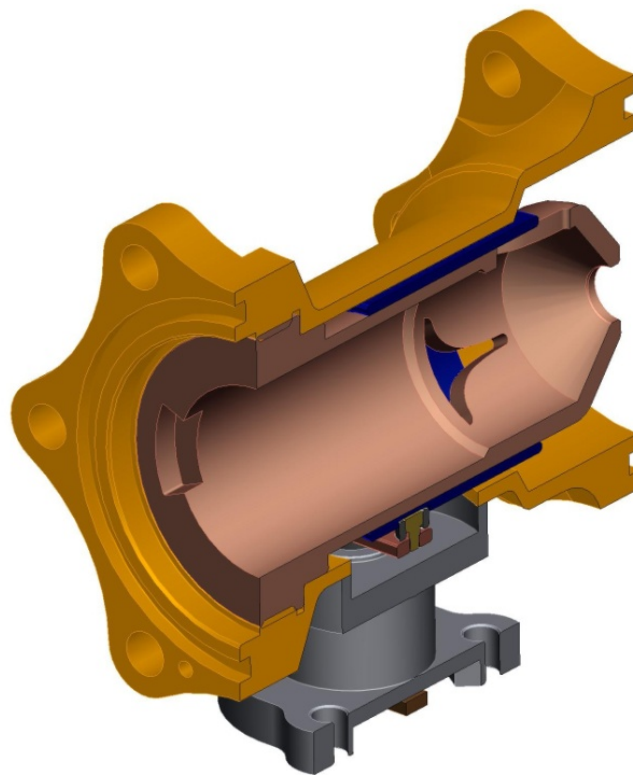
Regulador de Empuxo PC03

- É calibrado em banco de ensaios para o valor de empuxo desejado antes de ser instalado no Motor;
- Faz a regulação do empuxo mecanicamente.



Regulador de Razão de Mistura FC05

- Faz a regulação da razão de mistura a partir de comando do Sistema de Controle.



Sistema de Ignição

Objetivos

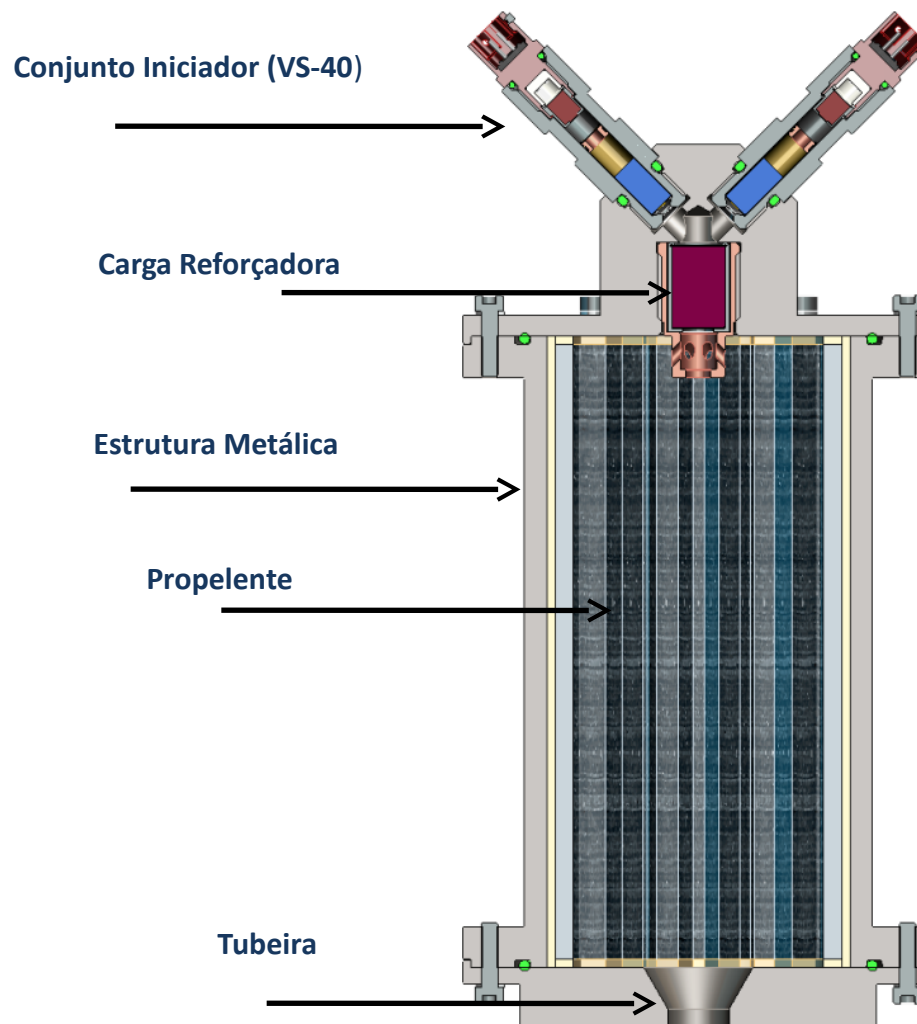
- Ignitar:
 - Câmara de Empuxo
 - Gerador de gás

- Iniciar as válvulas pirotécnicas

- Dar a partida na turbobomba

Sistema de Ignição

Sistema de partida da turbobomba

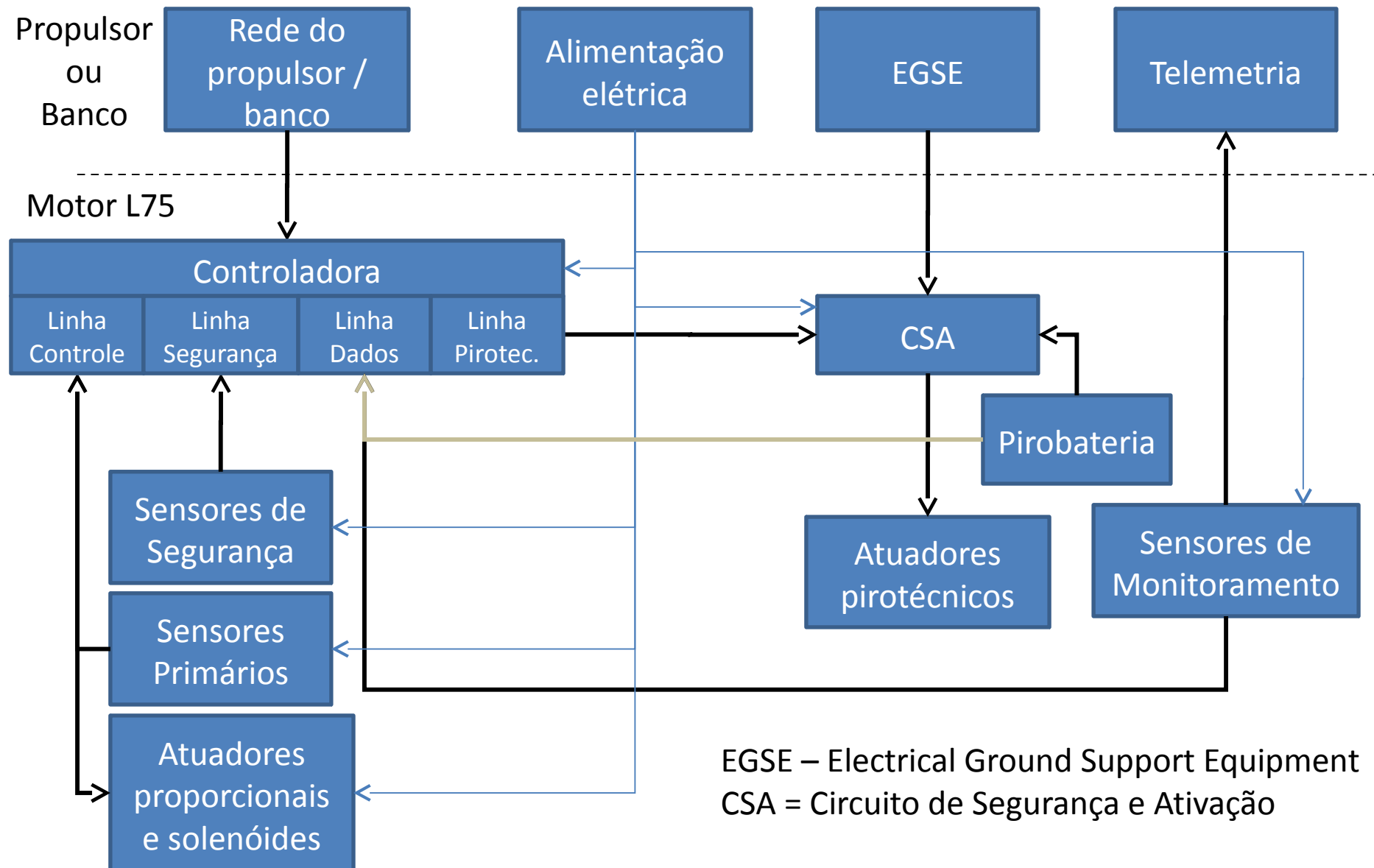


Sistema de Controle

Principais Funções

- Gerenciar a operação do motor
- Estados e modos
- Controlar o motor
- Eventos pré-partida
- Eventos de partida
- Leis de controle
- Eventos de parada
- Eventos de emergência e contingência
- Monitorar integridade do motor
- Impedir ignição intempestiva de pirotécnicos

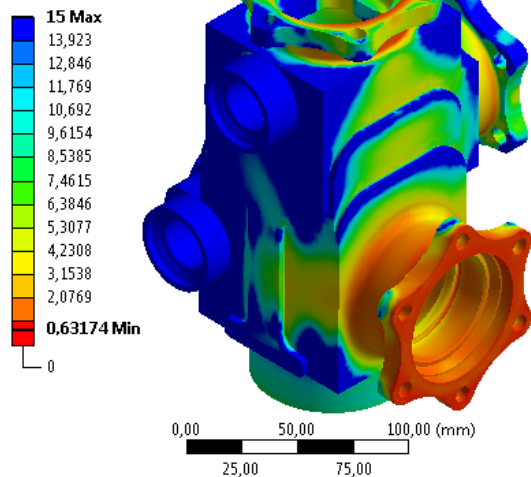
Arquitetura de hardware



Resultados das análises estruturais

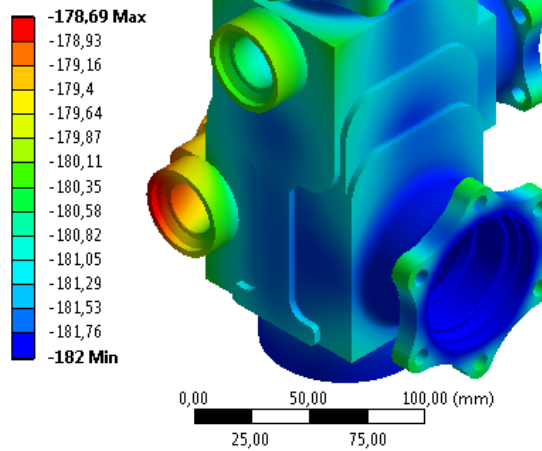
E: Static Structural v3

Safety Factor
Type: Safety Factor
Time: 1
18/02/2011 09:34



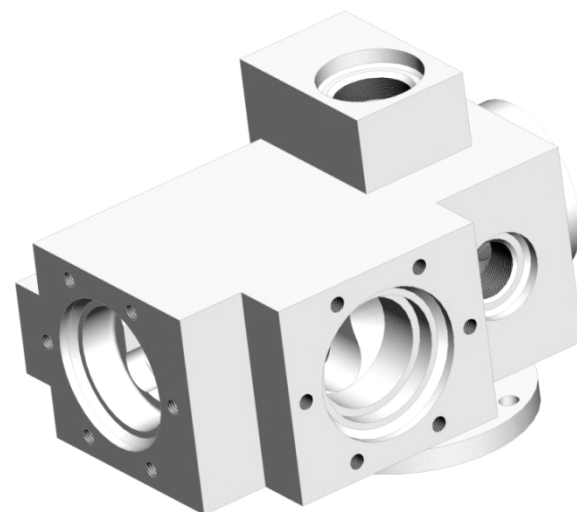
H: Steady-State Thermal v3

Temperature
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 1
18/02/2011 09:30



Distribuição de temperatura
para o Corpo do Bloco de
Válvula Oxidante

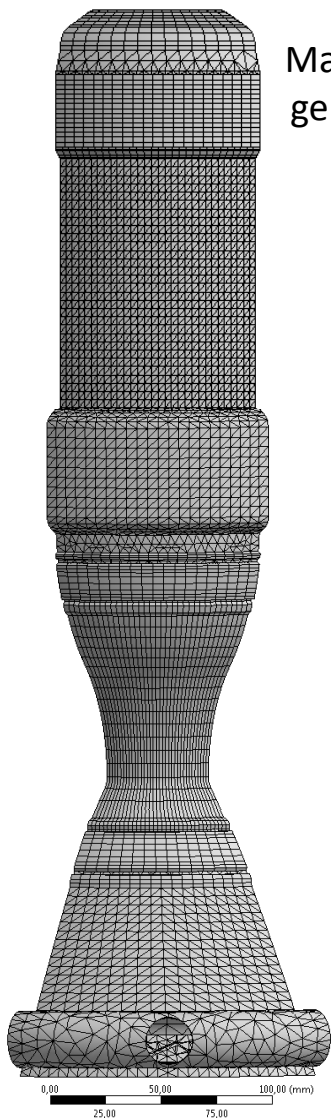
Modelo final para ensaios de
funcionalidade em banco



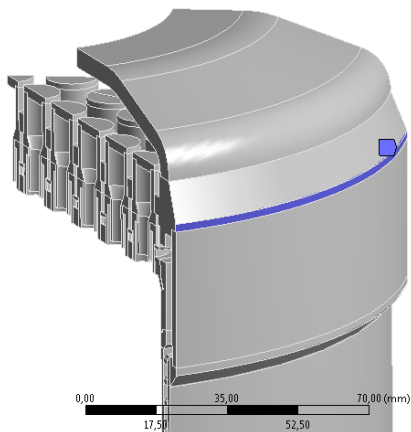
Corpo do Bloco de Válvula de Oxidante sob
condições térmicas criogênicas

Modelos	Tensões de Von Mises [MPa]	Temperatura Máxima [°C]	Fator de segurança	Fator de segurança real
1	1210,40	-176,78	0,5097	2,9797
2	1037,60	-178,71	0,5946	3,0646
3	976,60	-178,69	0,6317	3,1017

Resultados das análises estruturais

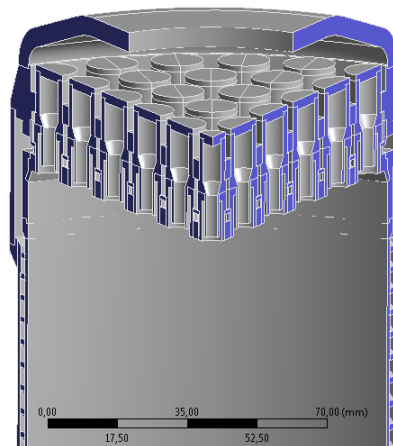
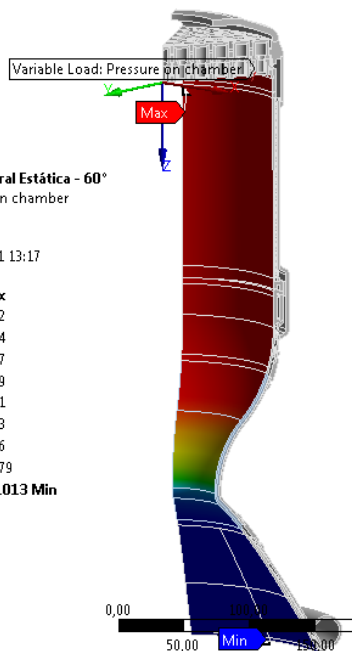


Malha de elementos finitos gerada para a câmara curta

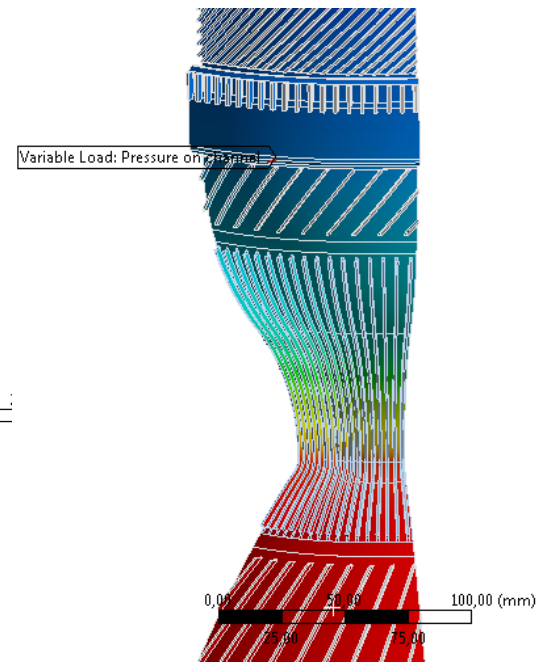


B: Estrutural Estática - 60°
Pressure on chamber
Time: 1, s
Unit: MPa
14/10/2011 13:17

7 Max
6,2312
5,4624
4,6937
3,9249
3,1561
2,3873
1,6186
0,84979
0,081013 Min



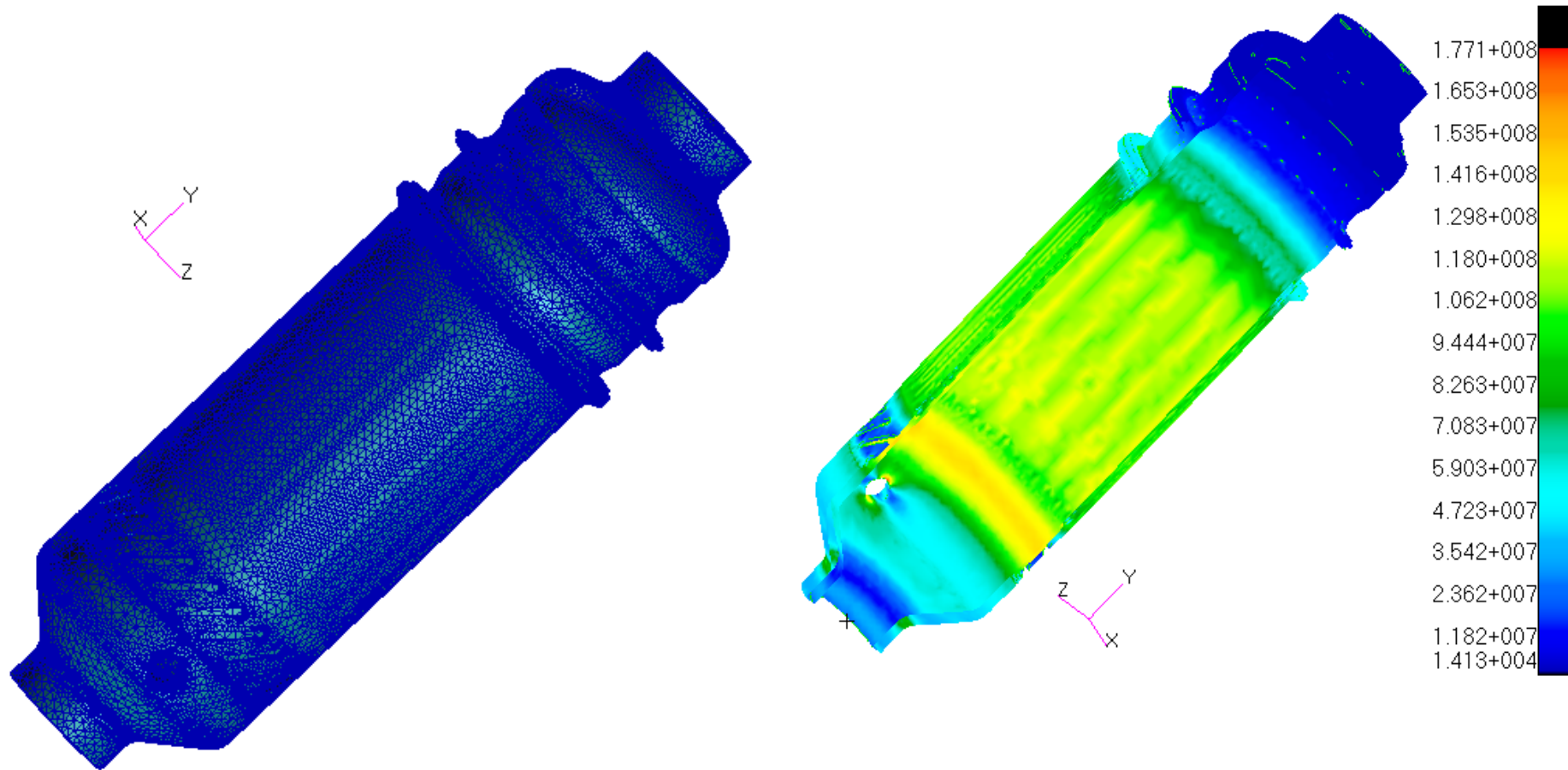
Condições de contorno de pressão



Condições de contorno de fixação e simetria

Resultados das análises estruturais

Tensões de Von Mises (Pa)

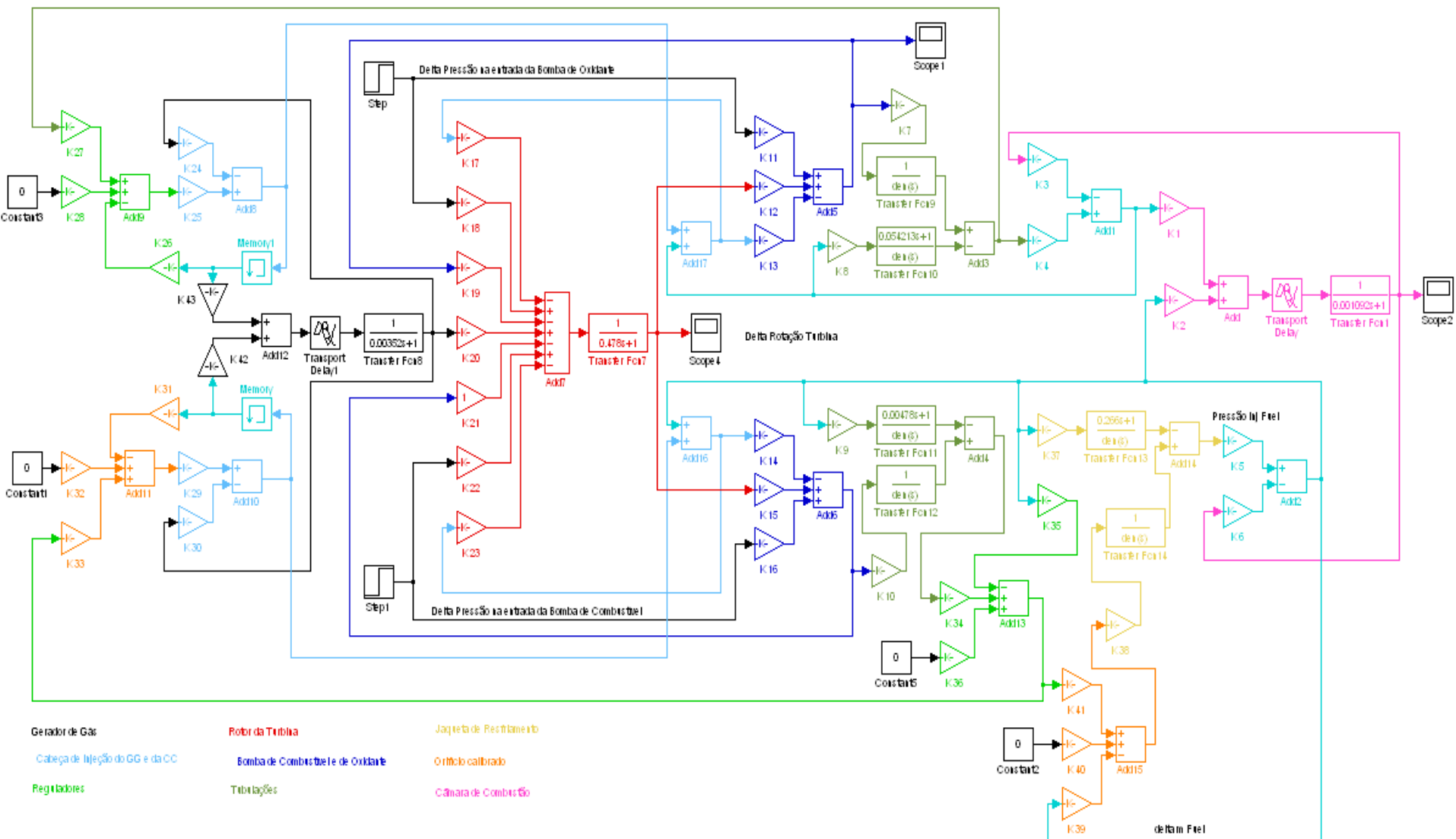


Modelo Matemático dos Componentes

Hipóteses:

- Os modelos dos componentes do sistema foram linearizados em torno do ponto de operação;
- Pequenas variações em torno dos valores nominais de operação do motor;
- Análise em o regime permanente;
- Valores de entrada e saída correspondem a flutuações relativas em relação ao valor nominal.

Modelo Matemático dos Componentes

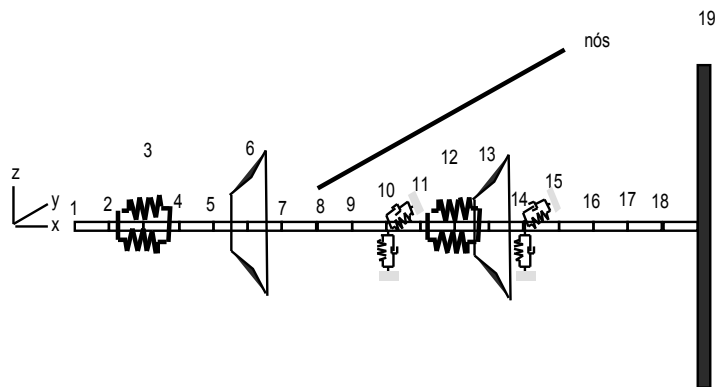


Análise dinâmica da TPU

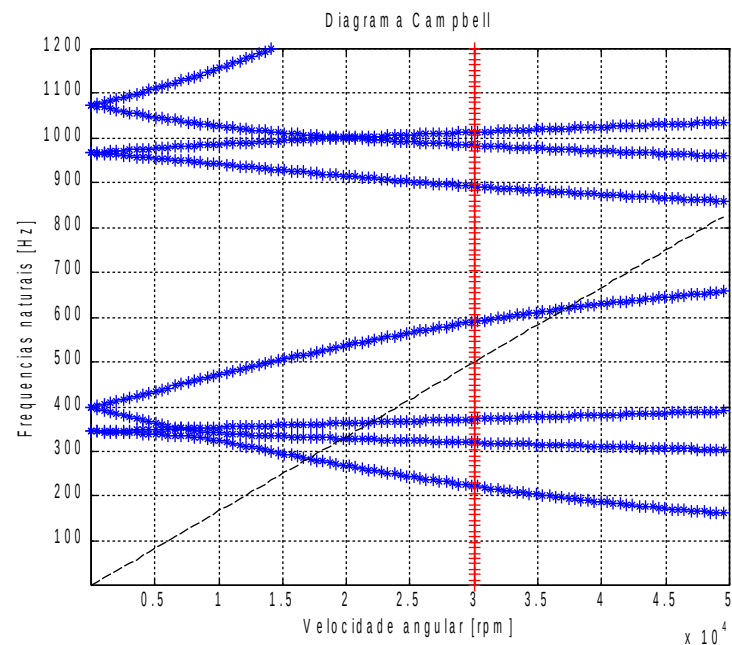
- Em um rotor ideal toda a energia fornecida é convertida em rotação. Em um rotor real parte da energia de rotação é convertida em movimentos transversais.
- Imperfeições do rotor, características dos mancais e excitações externas causam vibrações transversais ao eixo de rotação. Estas vibrações ocasionam o surgimento do efeito giroscópico.
- Em repouso um rotor comporta-se dinamicamente como uma estrutura estacionária, com formas modais semelhantes as de uma viga. À medida que o rotor começa a girar o acoplamento dos deslocamentos transversais horizontais e verticais causado pelo efeito giroscópico faz com que cada modo combine o modo de viga com um movimento de precessão.
- Objetivo: desacoplar as frequências ressonantes

Dinâmica de rotores

Modelo de elementos finitos da TPU do L75



Legenda



Vel. Críticas [rpm]

- 1 17031,32
- 2 19739,52
- 3 21882,49
- 4 37154,30

Desempenho, aspectos térmicos, estruturais e funcionais da CE

Análise paramétrica da Câmara de Combustão:

- Desempenho: abordagens analíticas;
 - Cargas térmicas: avaliações generalizadas por modelos de correlação empírica [1,3]:
 - Fluxo de calor convectivo;
 - Fluxo de calor por radiação;
 - Estimativa da mistura do filme de refrigeração;

Análise Estrutural: abordagens analíticas tradicionais;

Perdas de pressão: correlações empíricas.

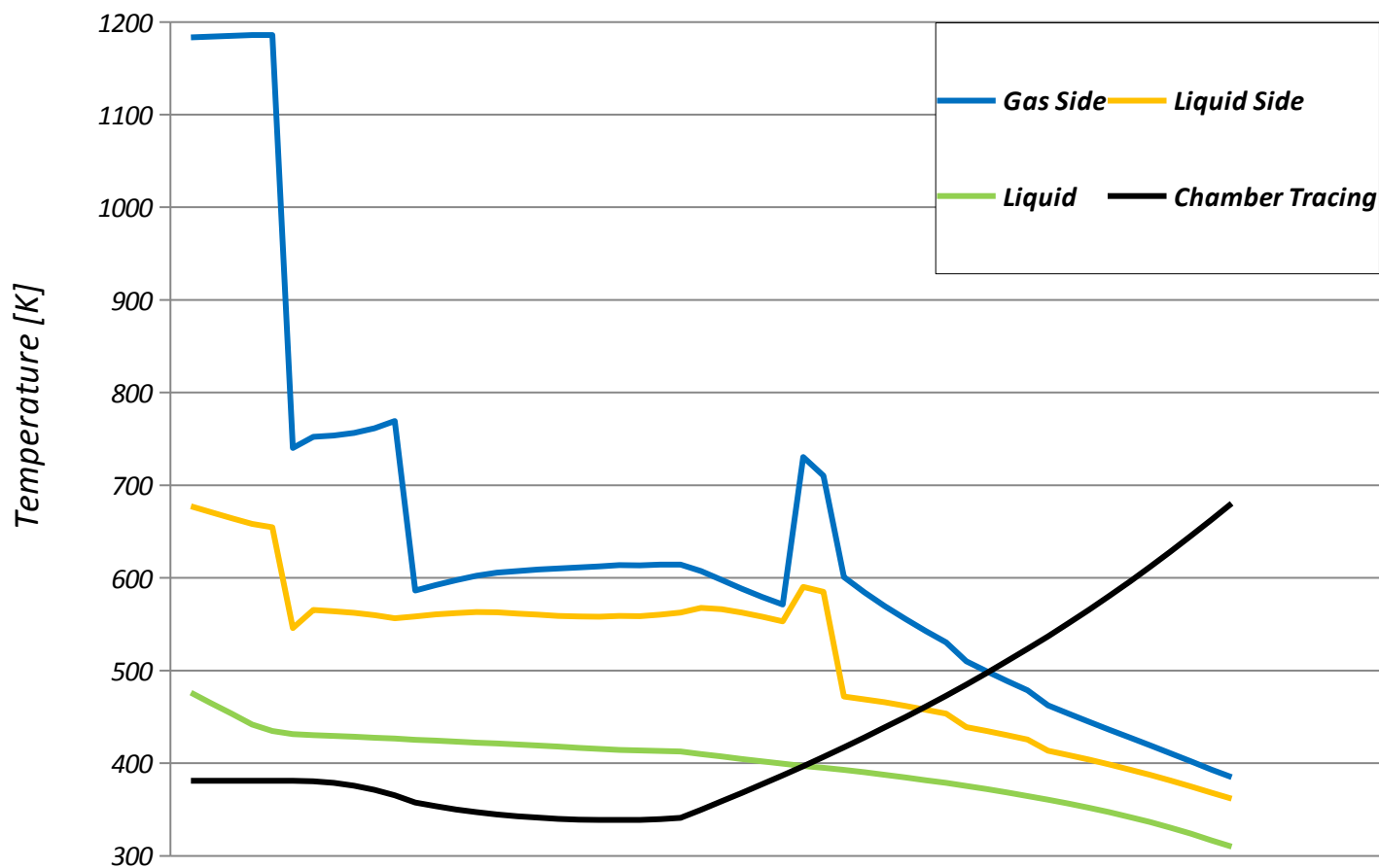
Resultado:

Definições de geometria.

- Objetivo: avaliar a influência dos diversos parâmetros no envelope de funcionamento do motor.

Análise de desempenho

Temperature Profiles in External Cooling



Processos de fabricação do Motor L75

Objetivos:

- Validar e documentar processos de fabricação;
- Garantir repetibilidade;
- Desenvolver processos de soldagem e brasagem;
- Avaliar modificações necessárias para melhoria do projeto, minimizando custos de fabricação;
- Desenvolver e avaliar CDPs de materiais utilizados na fabricação dos conjuntos.

Componentes fabricados do L75



Infraestrutura de bancos de ensaios

Especificações de Ensaios e Infraestrutura de Bancos - DIRETRIZES:

1- Cumprir o Plano de Desenvolvimento e Verificação

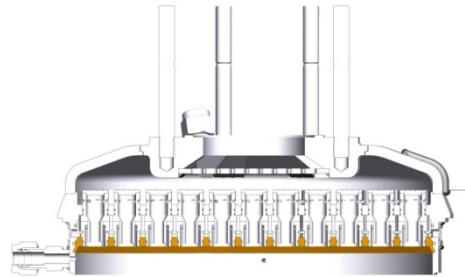
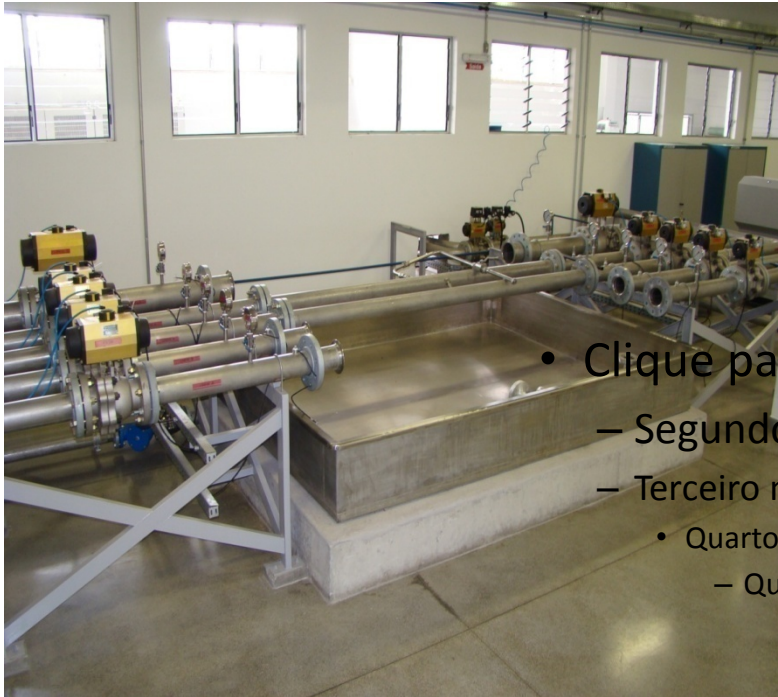
2- Seguir as diretrizes das Normas ECSS:

E-10-02A - Verification

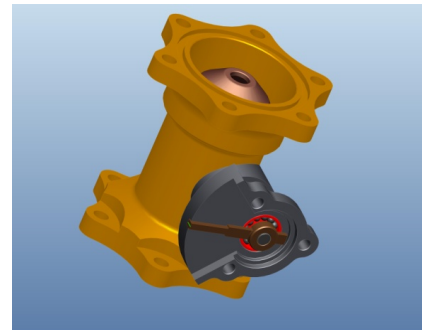
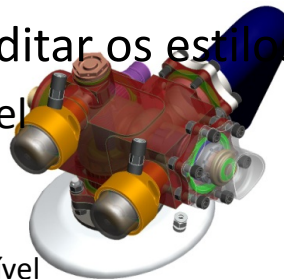
E-10-03A - Testing

3- Construir no IAE a infraestrutura de ensaios não encontrada em instituições nacionais.

Banco de Ensaios Hidráulicos I

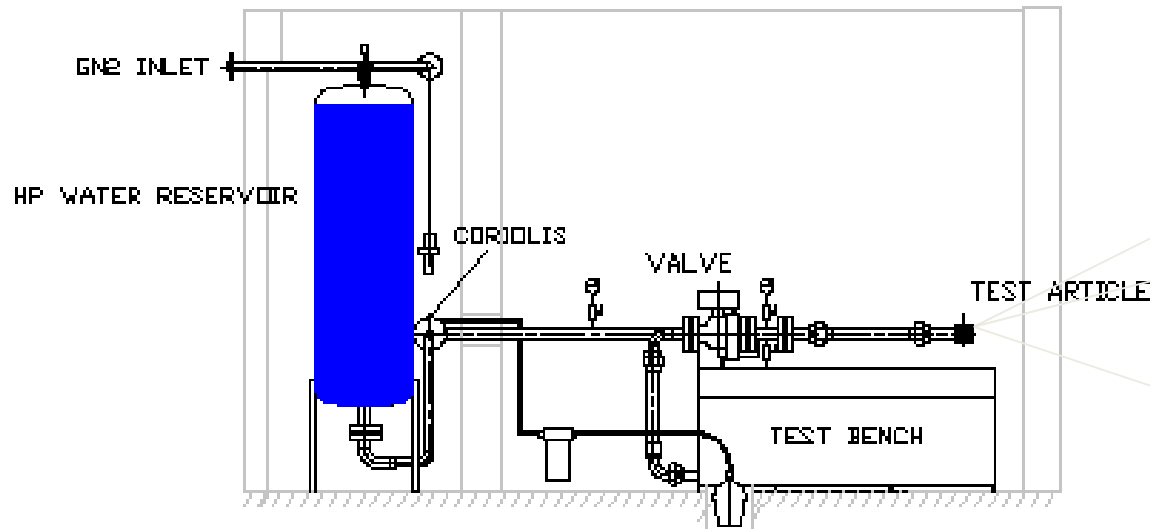


- Clique para editar os estilos do texto mestre
 - Segundo nível
 - Terceiro nível
 - Quarto nível
 - Quinto nível

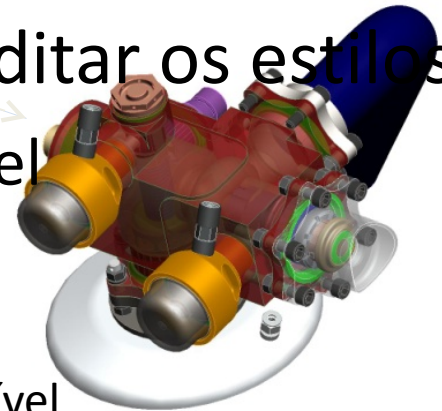


Aplicação: determinar ΔP e vazão em regime permanente das válvulas, reguladores, câmaras de empuxo e gerador de gás.

Banco de Ensaio Hidráulico II



editar os estilos de
 nível



– Terceiro nível

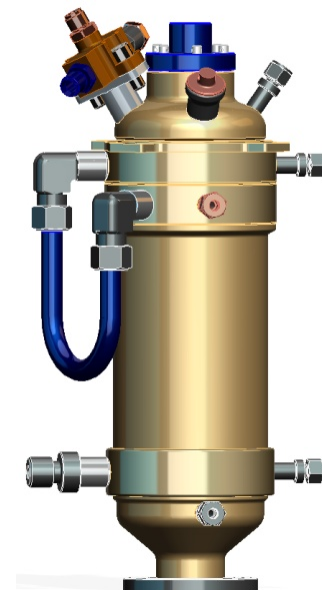
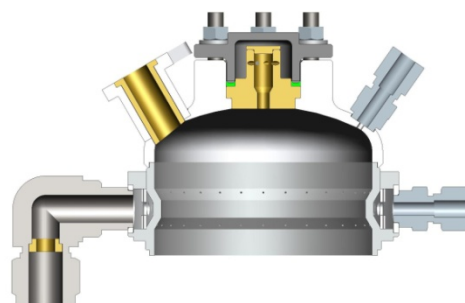
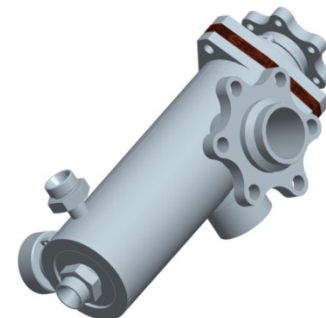
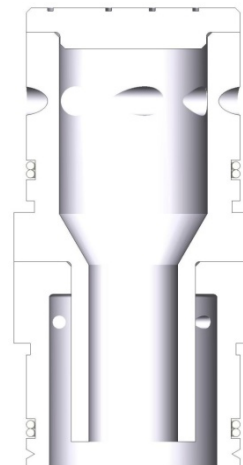
• Quarto nível

– Quinto nível

Aplicação:

- Verificar a funcionalidade de válvulas e reguladores nas pressões e vazões nominais;
- Determinar características de transitório.

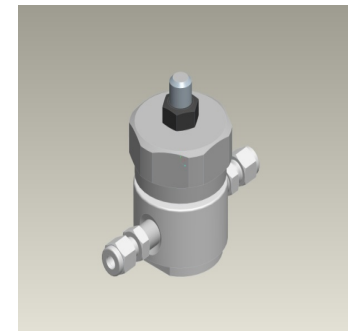
Banco de Ensaio Hidráulico III



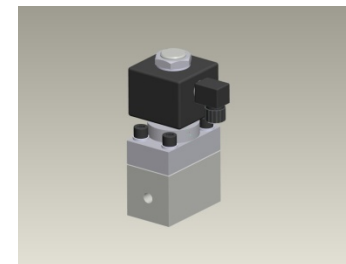
Aplicação:

- Determinar ΔP e vazão das válvulas, injetores, regulador de empuxo, orifícios, cintas de injeção e gerador de gás.
- Características de transitório

Banco de Ensaios de Reguladores



Reducer



Solenoid valve

Aplicação:

- Verificar a funcionalidade em regime permanente e transitório, ΔP e vazão das válvulas solenóides e regulador de pressão.

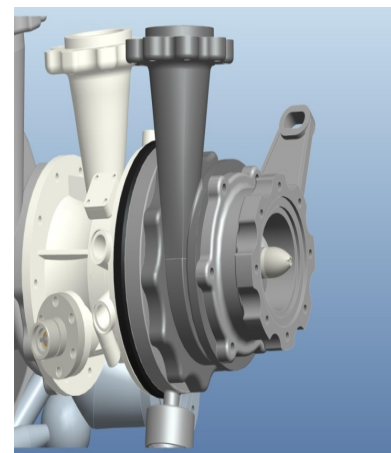
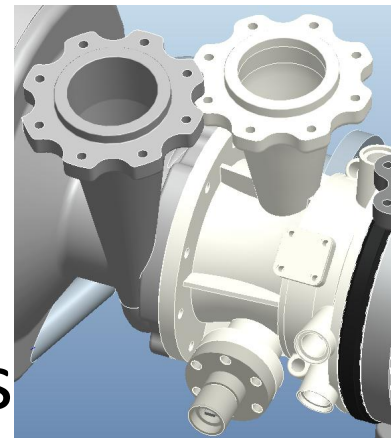
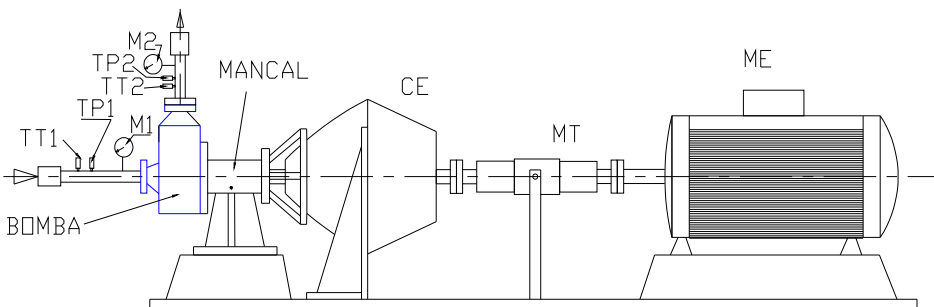
Banco de Ensaios a Quente de 20 kN



Aplicação:

- Determinar as características de desempenho do Gerador de Gás.

Banco de Ensaios das Bombas e Turbina (Fluido modelo)



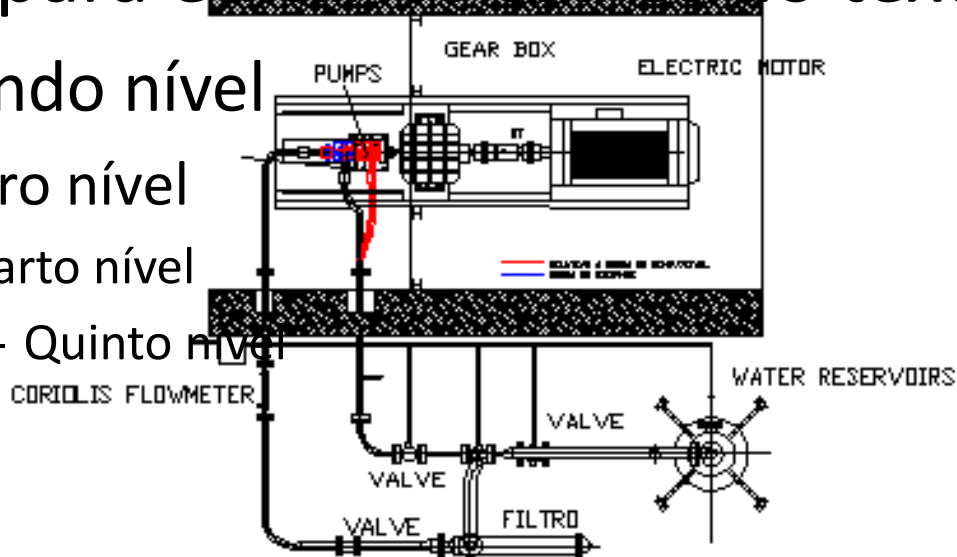
que para editar os estilos do texto mes

Segundo nível

Terceiro nível

- Quarto nível

- Quinto nível



Aplicação:

- Determinar as curvas características de desempenho;
- Características de vibração e estanqueidade.

Metas a serem alcançadas até 2016

- Câmara de combustão: Modelo de Desenvolvimento (DM) fabricado;
- Turbobomba: DM fabricado;
- Válvulas e reguladores: DMs fabricados e testados a frio;
- Sistema de ignição: DMs fabricados e testados;
- Sistema de controle: DM desenvolvido;
- Teste a quente do gerador de gás;
- Teste a frio das bombas;
- Teste a quente do cabeçote/câmara capacitiva no DLR.