



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA ESPACIAL – INPE

PROVA DISCURSIVA

TG15

CALDEIRAS, VASOS DE PRESSÃO, LINHAS PRESSURIZADAS, BOMBAS DE VÁCUO, ENSAIOS PADRONIZADOS DE QUALIFICAÇÃO EM GERAL. PROJETO, OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE SISTEMAS DE VÁCUO E INSTRUMENTAÇÃO ASSOCIADA



SUA PROVA

- Além deste caderno contendo **5 (cinco)** questões discursivas **com as respectivas folhas de rascunho**, você receberá do fiscal de prova as folhas de textos definitivos;



TEMPO

- Você dispõe de **4 (quatro) horas** para a realização da prova;
- **2 (duas) horas** após o início da prova, é possível retirar-se da sala, sem levar o caderno de questões;
- A partir dos **30 (trinta) minutos** anteriores ao término da prova é possível retirar-se da sala **levando o caderno de questões**.



NÃO SERÁ PERMITIDO

- Qualquer tipo de comunicação entre os candidatos durante a aplicação da prova;
- Anotar informações relativas às respostas em qualquer outro meio que não seja no caderno de questões e nas folhas de textos definitivos;
- Levantar da cadeira sem autorização do fiscal de sala;
- Usar o sanitário ao término da prova, após deixar a sala.



INFORMAÇÕES GERAIS

- Verifique se seu caderno de questões está completo, sem repetição de questões ou falhas. Caso contrário, **notifique imediatamente o fiscal da sala**, para que sejam tomadas as devidas providências;
- Confira seus dados pessoais, especialmente nome, número de inscrição e documento de identidade e leia atentamente as instruções para preencher as folhas de textos definitivos;
- Para o preenchimento das folhas de textos definitivos, use somente caneta esferográfica, fabricada em material transparente, com tinta preta ou azul;
- Assine seu nome apenas no(s) espaço(s) reservado(s) no cartão de respostas;
- Caso você tenha recebido caderno de cargo **diferente** do impresso em suas folhas de textos definitivos, o fiscal deve ser **obrigatoriamente** informado para o devido registro na ata da sala;
- O preenchimento das folhas de textos definitivos é de sua responsabilidade e **não será permitida a troca de folha de texto definitivo em caso de erro cometido pelo candidato**;
- Para fins de avaliação, serão levadas em consideração apenas os textos das folhas de textos definitivos;
- A FGV coletará as impressões digitais dos candidatos na lista de presença;
- Os candidatos serão submetidos ao sistema de detecção de metais quando do ingresso e da saída de sanitários durante a realização das provas.
- **Boa prova!**

Questão 1

Atenção: Esta questão irá propor a você a elaboração de um relatório sucinto, conforme modelo fornecido, já parcialmente preenchido. Você deverá usar as 30 linhas disponibilizadas, sem excedê-las. Não precisa usar o espaço todo. Sua letra deverá ser legível. Na avaliação serão considerados o conhecimento sobre tema, a utilização correta do idioma oficial, a compreensão do problema proposto e a capacidade de exposição. Você poderá se referir à Figura 1 e à Tabela 1 apresentadas como fruto de seu trabalho e considerar que ambas são partes anexas a seu relatório. Poderá agregar análises e comentários não explicitados no enunciado, segundo seu domínio sobre o tema, enriquecendo seu relatório de forma consistente. Poderá, também, incluir trechos extraídos do enunciado. Não há “pegadinhas”. Bom relatório!

Enunciado da questão:

Seu supervisor solicitou a você um **estudo técnico-econômico** para a seleção de uma eletrobomba pressurizadora, dentre várias opções disponíveis no mercado. Pretende-se padronizar o modelo escolhido, que deverá ser utilizado em dezenas de linhas de água, motivo pelo qual é importante que seja selecionado o modelo que apresente **a melhor combinação custo-consumo energético-desempenho**. Foram impostos seis requisitos às bombas, que devem ser atendidos. São eles os seguintes, sendo os dois primeiros igualmente os mais importantes:

- 1º) Custo médio do pressurizador: até R\$ 1.250,00;
- 2º) Potência elétrica máxima: 250 W;
- 3º) Desempenho mínimo: pressão ≥ 6 mca com vazão de 25 litros/minuto;
- 4º) Máxima queda de pressão ($\Delta p = P_{\text{máx}} - P_{25 \text{ l/min}}$): 6 mca;
- 5º) Máxima elevação de pressão: 18 mca;
- 6º) Peso máximo: 5 kg;

Foram identificados 14 pressurizadores no mercado, 3 dos quais apresentam chave seletora para operarem em 3 velocidades distintas: 1, 2 e 3. Esses apresentam 3 curvas de operação, enquanto os outros 11, por operarem com velocidade única, apresentam apenas uma curva de operação. Há, portanto, 20 curvas a serem analisadas, conforme mostrado na Figura 1. Espécimes de 3 velocidades que tiverem pelo menos uma de suas curvas compatível com os requisitos deverão ser considerados elegíveis.

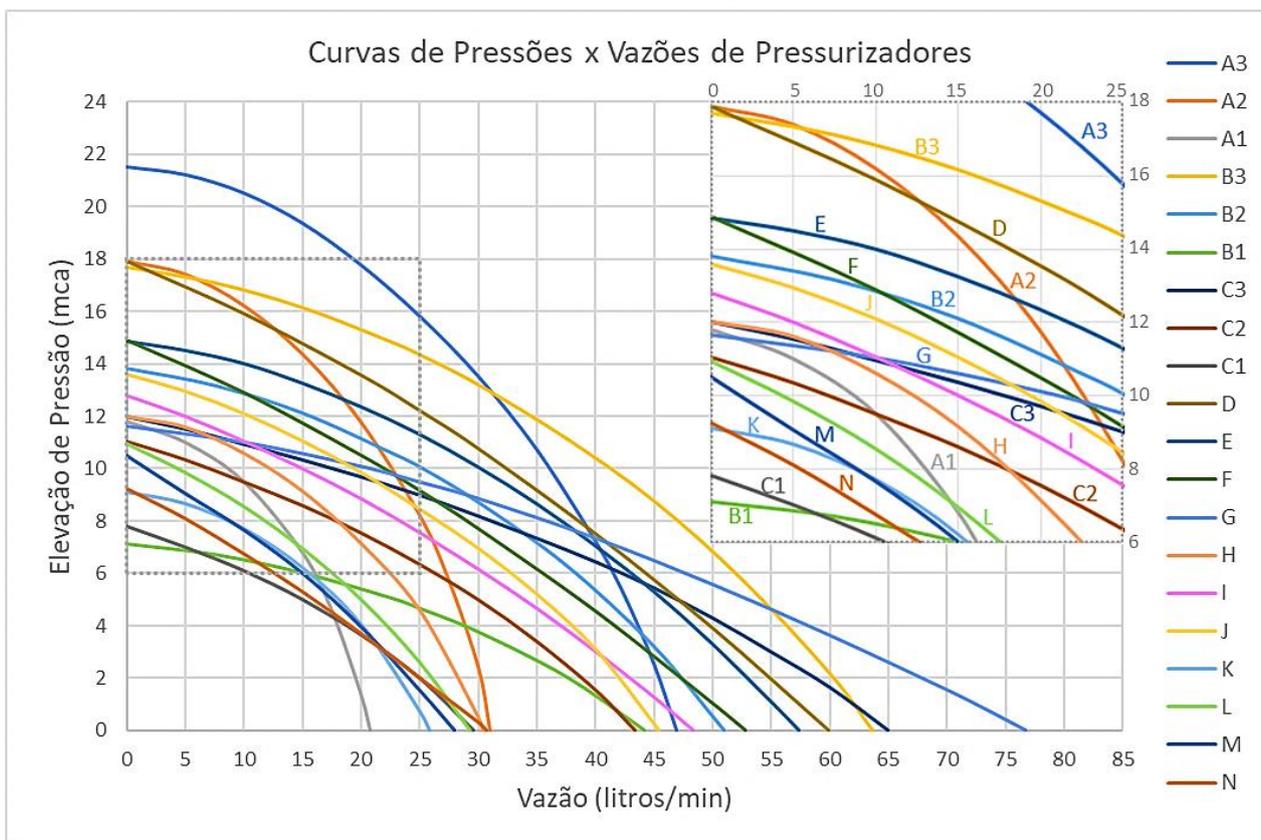


Figura 1 – Curvas de operação Pressão x Vazão dos pressurizadores analisados.

Os espécimes A, B e C apresentam 3 opções de velocidades.

Fundamentada na Figura 1, nos catálogos dos fabricantes e nos requisitos a serem atendidos, a Tabela 1 a seguir apresenta parâmetros relevantes que você consolidou. Para auxiliá-lo em suas análises, você definiu dois “fatores de mérito” e os normalizou com relação ao maior deles de sua categoria (veja notas explicativas junto à Tabela).

Tabela 1 – Parâmetros comparativos dos pressurizadores analisados.

Espécime	Curva	Preço médio (R\$)	Potência máxima (watt)	Pressão máxima (mca)	Pressão @ 25 l/min (mca)	Queda de pressão (mca)	Peso (kg)	¹ Fator de mérito Fm1 (mca ₂₅ /R\$)	² Fator de mérito Fm2 (mca ₂₅ /W)	Atende aos requisitos? Sim / Não
A	A3	1.000	350	21,5	15,8	5,7	5,0	1,00	0,72	
	A2		250	17,9	8,2	9,7		0,52	0,52	
	A1		150	11,8	0	11,8		0,00	0,00	
B	B3	1.250	330	17,7	14,4	3,3	5,2	0,73	0,69	
	B2		264	13,8	10,1	3,7		0,51	0,61	
	B1		176	7,1	4,7	2,4		0,24	0,42	
C	C3	875	245	12,0	9,0	3,0	5,0	0,65	0,58	
	C2		210	11,1	6,4	4,7		0,46	0,48	
	C1		140	7,8	2,0	5,8		0,14	0,23	
D	D	825	350	17,9	12,2	5,7	6,6	0,94	0,55	
E	E	1.100	305	14,9	11,3	3,6	5,2	0,65	0,59	
F	F	750	248	14,9	9,2	5,7	4,6	0,78	0,59	
G	G	1.250	220	11,6	9,5	2,1	4,7	0,48	0,69	
H	H	600	160	12,0	4,6	7,4	2,8	0,49	0,46	
I	I	550	150	12,8	7,6	5,2	3,1	0,87	0,80	
J	J	1.100	135	13,6	8,5	5,1	5,0	0,49	1,00	
K	K	575	120	9,1	0,7	8,4	2,8	0,08	0,09	
L	L	375	120	11,0	2,6	8,4	2,8	0,44	0,34	
M	M	750	120	10,5	1,5	9,0	2,5	0,13	0,20	
N	N	450	100	9,3	2,0	7,3	2,5	0,28	0,32	

¹ Os fatores de mérito 1 correspondem aos quocientes entre as pressões dos espécimes a 25 l/min e os preços médios de mercado, expressos em **mca/R\$**. Estão normalizados com relação ao maior desses valores encontrado nessa coluna.

² Os fatores de mérito 2 correspondem aos quocientes entre as pressões dos espécimes a 25 l/min e suas potências elétricas máximas, expressos em **mca/W**. Estão normalizados com relação ao maior desses valores encontrado nessa coluna.

A) O que a questão pede a você:

- A₁** Identifique quais espécimes atendem aos requisitos e informe-os na seção “Resultados e conclusões” do relatório.
- A₂** Preencha a seção “Pressurizadores – Análises e comentários” do relatório, incluindo a descrição dos fatores de mérito e comentando suas interpretações em suas análises.
- A₃** Também na seção “Resultados e conclusões” do relatório, indique e justifique, mediante prós, contras e graus de aderência aos requisitos impostos, a escolha do pressurizador que apresenta a melhor combinação custo-consumo energético-desempenho. Considere os dois primeiros requisitos como sendo os mais preponderantes para eleger o melhor classificado no ranking. Compare o escolhido com o segundo colocado.

B) Partes de seu relatório consideradas já preenchidas por você (portanto, não precisa repeti-las):

RELATÓRIO REFERENTE À SELEÇÃO DE PRESSURIZADORES

Objetivo

Este relatório apresenta um estudo técnico-econômico para a escolha de um pressurizador entre 14 modelos disponíveis no mercado. O objetivo é identificar o modelo que apresente a melhor combinação custo-consumo energético-desempenho, para que sejam adquiridas várias unidades para uso em dezenas de linhas de água, de forma padronizada, conforme solicitado pela gerência.

Requisitos

Foram impostos seis requisitos a serem atendidos. São eles os seguintes, sendo os dois primeiros igualmente os mais importantes: 1º) custo médio do pressurizador: até R\$ 1.250,00; 2º) potência elétrica máxima: 250 W; 3º) desempenho mínimo: pressão ≥ 6 mca com vazão de 25 litros/minuto; 4º) máxima queda de pressão ($\Delta p = P_{\text{máx}} - P_{25\text{l/min}}$): 6 mca; 5º) máxima elevação de pressão: 18 mca; 6º) peso máximo: 5 kg.

C) Partes de seu relatório que você deverá incluir nas 30 linhas disponibilizadas:

Pressurizadores – Análises e comentários

(Escrever suas análises e comentários, conforme indicado em A₂)

Resultados e conclusões

(Escrever seus resultados e conclusões, conforme indicado em A₁ e em A₃. Incluir as frases abaixo nessa seção)

Após as análises, os espécimes que atendem aos requisitos são:

Dentre eles, o mais indicado para compra é o espécime “_____”.

Justificativa.

Questão 2

Um motor foguete bipropelente (Etanol/Peróxido de Hidrogênio) foi posto em testes em um banco de ensaios com simulação de altitude, com um empuxo nominal de 190 N, no vácuo, para uma alta razão de expansão na tubeira. Esse tipo de banco simula as condições encontradas em altitude orbital. Para isso o banco retira os gases de combustão gerados pelo motor por meio de um sistema de vácuo através de um bocal de ejeção de vapor superaquecido. Depois, esses gases, junto ao vapor do ejetor, precisam ser resfriados para 51°C para separação e descarte. Para isso são injetados jatos de água fria, a 11°C, no fluxo de gases provenientes do bocal de exaustão do motor foguete e do ejetor de vapor. O esquema do banco pode ser visto na Figura 1.

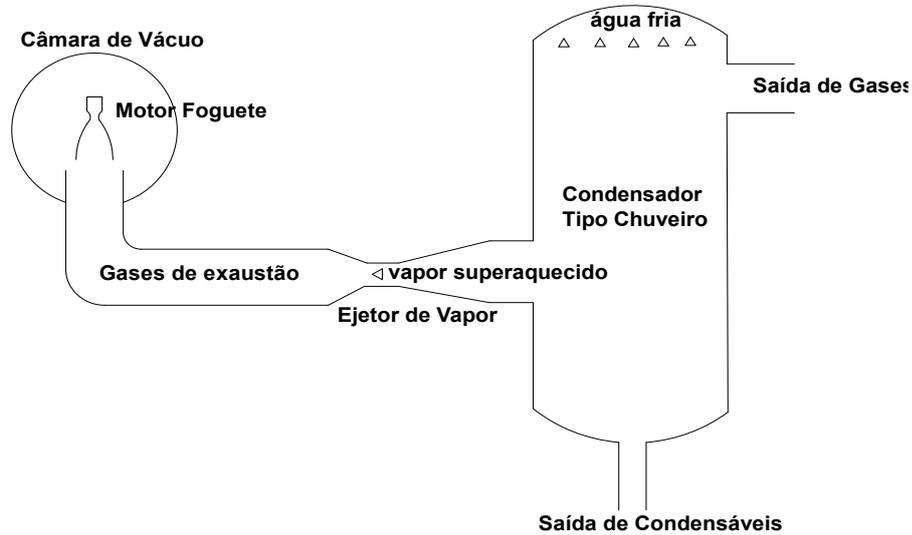


Figura 1 - Banco de Testes com Simulação de Altitude

- A) A vazão mássica de gases de combustão do motor foguete é de 35 g/s. A temperatura dos gases de combustão é de 1251°C. Considere os calores específicos da água e dos gases de combustão iguais. Despreze a mudança de fases dos componentes dos gases de combustão.
- B) Determine a vazão mássica de água fria necessária para resfriamento somente dos gases de combustão.
- C) O sistema do banco pode produzir e bombear uma vazão mássica de água fria de 21 kg/s. Compare e analise a vazão necessária para resfriar os gases de combustão com a vazão disponível no sistema.
- D) A pressão de linha é de 3 bar (3×10^5 Pa). A eficiência da bomba é de 50%. Considere a aceleração da gravidade como 10 m/s². Determine a potência requerida para bombear a água do sistema de resfriamento na vazão de 21 kg/s. Responda no Sistema Internacional de Unidades (SI) ou seus múltiplos.
- E) A pressão absoluta na saída do motor foguete é de 0,013 bar (10 mmHg). Determine a leitura exibida no vacuômetro mostrado na Figura 2 a seguir. Explique essa leitura. Considere a pressão atmosférica ao nível do mar.

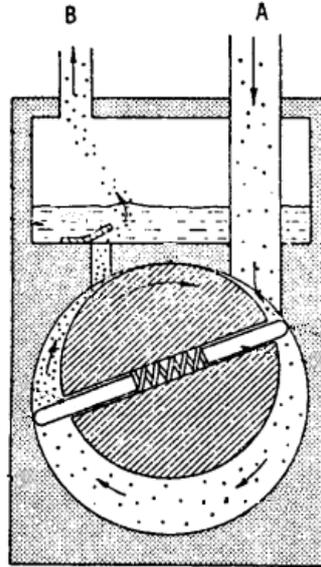


Figura 2 - Vacuômetro

Questão 3

Uma bomba de vácuo de palhetas rotativas é um tipo de bomba de vácuo que é utilizada em vários setores e aplicações para remover ar ou outros gases de uma câmara selada ou sistema. Este equipamento também é chamado de bomba mecânica ou de vácuo primário.

As questões a seguir se referem às bombas primárias tradicionais, que funcionam com óleo, isto é, **não** se referem às bombas de vácuo “secas”. Na figura abaixo temos o desenho esquemático de uma bomba rotativa.



- A) A operação de uma bomba de vácuo de palhetas rotativas pode ser dividida em três estágios. **Descreva como funciona uma bomba de vácuo de palhetas rotativas, ou seja, descreva como a bomba retira gás da câmara selada reduzindo a sua pressão.**
- B) O óleo serve para vários propósitos na operação de uma bomba de vácuo de palhetas rotativas. **Descreva a importância e as principais funções do óleo neste tipo de bomba de vácuo.**
- C) Para garantir a operação eficiente de uma bomba de vácuo de palhetas rotativas, uma manutenção regular é essencial. **Identifique as atividades de manutenção de rotina que podem ajudar a manter sua bomba operando em condições ideais.**
- D) **Explique quais problemas podem surgir no sistema e no vácuo final gerado, caso o óleo de uma bomba de vácuo venha a superaquecer durante a sua operação.**

Questão 4

Caldeiras a vapor são frequentemente associadas a turbinas, especialmente em aplicações de geração de energia elétrica. Nesse processo, o vapor d'água gerado na caldeira é direcionado para uma turbina, onde sua energia é utilizada para operar um gerador elétrico. Em seguida, o vapor é resfriado em uma condensadora para retornar à caldeira e reiniciar o ciclo.

Obs.: Para esta questão, considere que todas as grandezas estão representadas em unidades do Sistema Internacional.

Sabendo que todos os itens abaixo se referem a um sistema como descrito acima, responda ao que se pede a seguir.

- A) Considerando a temperatura do vapor que sai da caldeira T_q e o rendimento igual a η equivalente a uma fração f ($0 < f < 1$) do rendimento teórico máximo, determine a temperatura T_s do fluido de trabalho na saída da unidade condensadora.
- B) Se o vapor chega na turbina a uma taxa mássica representada por dm/dt , com uma entalpia específica h_1 e deixa a turbina com uma entalpia específica h_2 , qual a potência P gerada?
- C) Sabe-se que caldeiras podem ser divididas basicamente em duas categorias: flamotubulares e aquatubulares. Cite duas vantagens de cada tipo, justificando brevemente.
- D) O tratamento da água empregada em caldeiras é essencial para garantir a eficiência operacional, prolongar a vida útil do equipamento e garantir a segurança dos operadores e das instalações. Falhas no tratamento da água utilizada em caldeiras são uma das principais causas de acidentes. Explique, sucintamente, de que forma o uso de água não tratada pode resultar em um acidente na operação de uma caldeira.

Questão 5

Após o lançador colocar o satélite em órbita, algumas manobras são necessárias; por exemplo: colocar o satélite na órbita correta, mudar de órbita etc. Essas manobras são realizadas por propulsores (*thrusters*) acoplados ao satélite e o seu funcionamento é feito por meio de comandos enviados da Terra. Estes *thrusters* utilizam propelentes, sendo a hidrazina o mais utilizado, embora atualmente ocorra intensa pesquisa para substituí-lo por outros propelentes. A qualificação desses *thrusters* é feita em câmaras de vácuo com bomba de vácuo, medidores para acompanhar o vácuo, válvulas etc. Quanto melhor o vácuo, melhor para a qualificação, para evitar que as moléculas de ar interfiram no jato expelido pelo propulsor conforme indicado na Figura 1, regime de fluxo de Knudsen com livre caminho médio de 0,1-100mm. Os propulsores são especificados conforme o empuxo obtido: 1N, 10N...400N. Os de baixo empuxo são utilizados em pequenos satélites. Esta questão está relacionada ao dimensionamento do sistema de vácuo com relação a dois *thrusters*: de 1N e de 10N.

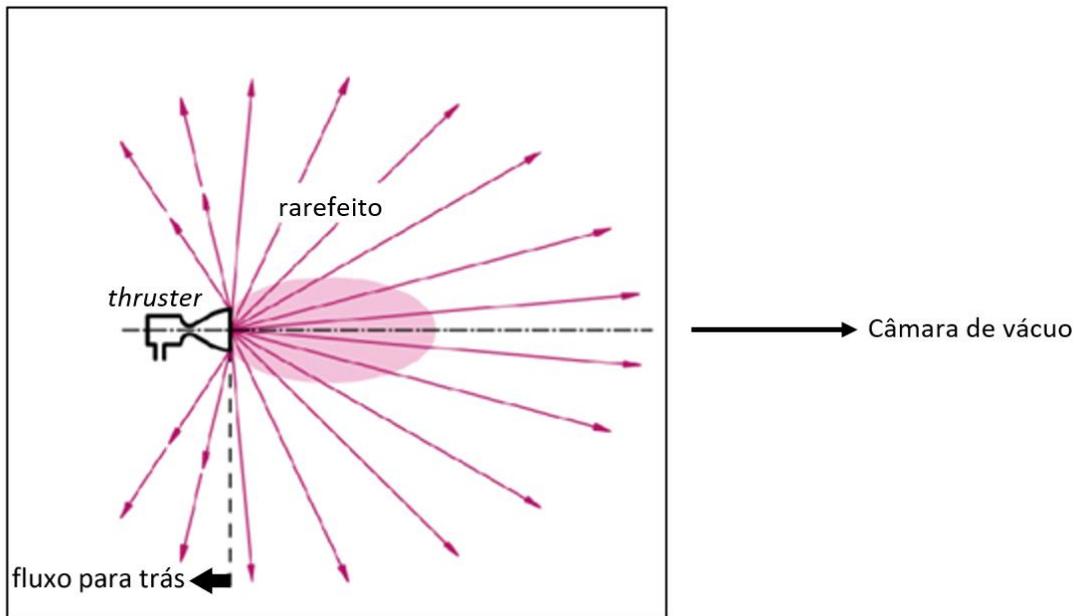


Figura 1 – Thruster dentro da câmara de vácuo, mostrando o jato expelido.
(Ref.: DLR Vacuum Test Facilities for Thruster Plume Investigation, Martin Grabe).

A qualidade do vácuo atingido na câmara de vácuo é classificada como: (I) baixo vácuo, (II) vácuo médio, (III) alto vácuo e (IV) ultra-alto vácuo. Diversas unidades são usadas para medir o vácuo, sendo a medida em mbar uma das mais utilizadas. Nessa unidade a pressão atmosférica é de $1,013 \cdot 10^3$ mbar ao nível do mar, de onde se dá o início ao bombeamento pelas bombas de vácuo (em geral).

- A) Determine a faixa de pressão para (I), (II), (III) e (IV). Utilize potências de 10, pressão em mbar e os símbolos maior do que (>) ou menor do que (<).**
- B) As câmaras de vácuo para testes de thrusters são, em geral, de grandes dimensões (5m³, 10m³ ou mais). Durante a operação o thruster expele gases (Figura 1) e dentro da câmara a equação que governa os parâmetros físicos é a equação**

$$pV = \frac{m}{M} RT$$

em que p é a pressão em mbar, V é o volume em m³, m é a massa do propelente consumido pelo thruster, M é a massa molecular do propelente (para hidrazina N₂H₄ = 32, 1 mol = 32g), $N_{mol} = \frac{m}{M}$ é o número de moles, R é a constante universal dos gases ($R = 83,14 \frac{l \cdot mbar}{K \cdot mol}$, usar 83 nos cálculos) e T é a temperatura em kelvin (K).

O throughput Q (taxa de transferência) é a razão de fluxo de gás e, para T constante, é dado por

$$Q = \frac{d}{dt}(pV) = RT \frac{d}{dt}(N_{mol})$$

Quando o fluxo não muda com o tempo (estado estacionário) Q tem o mesmo valor para toda posição da tubulação, massa é conservada. Com as unidades dadas para R e T , Q tem as unidades de $l \cdot mbar/s$. Uma outra relação quando V é constante é

$$Q = V \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

- B₁** Assuma um propulsor de 1N que consome 0,32 g/s de N₂H₄ para $T = 300K$. Qual o valor de Q neste caso?
- B₂** Um propulsor de 10N consome 3,2 g/s de N₂H₄. Indique o valor de Q para este caso.

C) A relação entre o throughput (Q), a pressão (p) e a velocidade de bombeamento (S) é dada pela equação:

$$Q = p \cdot S$$

na qual S é dada em l/s ou m^3/h . Dessa equação, tendo duas grandezas, é possível determinar a terceira. Assuma que é desejável manter a pressão na câmara $p = 0,1$ mbar por causa do observado na Figura 1 e na introdução (o ideal seria 10^{-3} mbar).

C₁ Para o propulsor de 1N qual seria a velocidade de bombeamento requerida? (dê a resposta em m^3/h).

C₂ Para o propulsor de 10N qual seria a velocidade de bombeamento requerida?

D) A condição de $p = 0,1$ mbar não é a ideal, mas os resultados obtidos em (C) mesmo assim levam a sistemas de bombeamento robustos. Em geral a condição é relaxada para $p = 1$ mbar. **Como ficam, agora, os resultados obtidos em (C)? Neste caso, em que vácuo está o sistema segundo a classificação dada no item (A)?**

E) Suponha agora que você consiga recursos para adquirir dois conjuntos de bombas, cada conjunto composto de uma bomba de palhetas rotativas e uma bomba *roots*, cada conjunto fornecendo $350 m^3/h$ de velocidade de bombeamento.

E₁ Indique se os dois conjuntos devem ser acoplados em série ou em paralelo de modo a obter a velocidade de bombeamento de $700 m^3/h$.

E₂ Calcule o tempo (sem o *thruster* estar funcionando) que leva para, partindo da pressão atmosférica ($1 \cdot 10^3$ mbar), atingir a pressão de base $1 \cdot 10^{-4}$ mbar, em uma câmara de $10 m^3$ com velocidade de bombeamento de $700 m^3/h$.

$$t = \frac{V}{S} \ln \left(\frac{p_0}{p} \right)$$

Dado: $\ln 10 = 2,3$.

Obs.: a velocidade de bombeamento de $350 m^3/h$ é o dado do fornecedor (na boca da bomba). No entanto, entre a boca da bomba e a câmara de vácuo, em geral, existe tubulação que, mesmo com bom projeto, diminui a velocidade de bombeamento, resultando em uma velocidade de bombeamento efetiva ($S_{ef} < S$). Em outras palavras, o tempo real é maior que o tempo calculado a partir da expressão dada.

E₃ Dado um *throughput* de $Q = 9.000 m^3 \cdot mbar/h$, indique quanto tempo decorre para a pressão de $1 \cdot 10^{-4}$ mbar atingir 1mbar na câmara de $10 m^3$.

Realização

