



**Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências
Departamento de Engenharia Mecânica**

Francielle Alves da Silva

Estudo da perda de carga de um processo de filtragem de combustível JET-A em
uma instalação aeroportuária.

**Recife - PE
2023**

FRANCIELLE ALVES DA SILVA

Estudo da perda de carga de um processo de filtragem de combustível JET-A em
uma instalação aeroportuária

Trabalho de conclusão do curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Pernambuco, como requisito
parcial para a obtenção do grau de
Bacharel Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Augusto Bueno Figueiredo

Recife

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Silva, Francielle Alves da.

Estudo da perda de carga de um processo de filtragem de combustível JET-A em uma instalação aeroportuária. / Francielle Alves da Silva. - Recife, 2023.
55 p

Orientador(a): Flávio Augusto Figueiredo

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2023.

1. Combustível. 2. Filtragem. 3. Perda de Carga. I. Figueiredo, Flávio Augusto. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

BANCA EXAMINADORA

Monografia intitulada “Estudo da perda de carga de um processo de filtração de combustível JET-A em uma instalação aeroportuária” aprovada como requisito à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica apresentada a Universidade Federal de Pernambuco, pela seguinte banca examinadora:

Data de Aprovação: 28 / 09 / 2023.

Prof. Flávio Augusto Bueno Figueiredo. (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Janaína Moreira de Meneses
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Marcus Costa de Araújo
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me possibilitou realizar um dos meus objetivos, me mantendo persistente com fé.

Agradeço a minha mãe Fernanda Alves e ao meu pai Luiz Claudio por investirem na minha educação desde o ensino fundamental, onde me incentivaram a buscar conhecimento na Universidade, me mostrando que era possível mesmo em momentos difíceis. Também a minha irmã Maria Gabrielle que nasceu para completar a família tornando meus dias mais leves. Meu esposo Hélder Campos teve papel fundamental durante o ensino superior, me apoiando, acreditando no meu potencial e entendendo minha ausência em determinados momentos.

Aos meus familiares e amigos que me incentivaram a estudar e me auxiliaram quando preciso, avôs, tios e primos, especialmente minha avó Sebastiana que não se encontra presente fisicamente, mas fez parte da minha criação e sempre acreditou na mulher no mercado de trabalho. Minhas amigas Ingrid e Natalia me acompanharam e compartilharam as conquistas comigo desde o ensino fundamental, Thaís e Weverton estudaram comigo, me escutaram em diversos momentos e continuam sendo amigos incentivadores.

Agradeço também ao Professor Flávio Figueiredo pelas orientações durante o desenvolvimento desse trabalho, além de todos professores que me ensinaram em cada disciplina do curso.

Gratidão a todos.

RESUMO

O combustível JET A utilizado na aviação necessita de um processo de filtragem rigoroso, para a eliminação de impurezas e água, pois é essencial que as aeronaves sejam abastecidas com produto de qualidade garantindo a segurança do equipamento e da sociedade. A análise de qualidade do produto está presente desde a distribuição até a entrega ao cliente final. Notou-se que existiam oportunidades de melhorias nesse processo, em busca de maior eficiência, reduzindo os custos operacionais. O presente estudo analisa o atual processo de filtragem através do *layout* da tubulação e vasos filtrantes em uma das linhas antes de armazenagem do produto. Assim, foi verificada a perda de carga ao longo da tubulação em trechos retos e dos equipamentos presentes na mesma, assim como dos filtros micrônicos e separadores coalescentes com obtenção de dados em campo, analisando também se os itens atuais estão de acordo com a necessidade. Com isso, foi possível identificar melhorias nos equipamentos da tubulação e nos vasos filtrantes verificando a viabilidade em relação ao custo de substituição.

Palavras-chave: Combustível; Filtragem; Perda de Carga.

ABSTRACT

The JET A fuel used in aviation requires a rigorous filtering process, for the elimination of impurities and water, since it is essential that the aircraft are supplied with a quality product, guaranteeing the safety of the equipment and Society. The product quality analysis is present from distribution to delivery to the final customer. It was noted that there were opportunities for improvements in this process, in search of greater efficiency, reducing operating costs. The present study analyzes the filtering process through the layout of the piping and filtering vessels in one of the lines before product storage. Thus, the load losses along the pipe in straight sections and the equipment present in it, as well as the micron filters and coalescing separators, were verified with data obtained in the field, also analyzing whether the current items are in accordance with the need. With this, it was possible to identify improvements in the piping equipment and in the filtering vessels, verifying the viability in relation to the cost of replacement.

Keywords: Fuel; Filtering; Load losses.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Filtro Cesta	14
Figura 2. Filtro Micrônico	15
Figura 3. Filtro Separador	16
Figura 4. Filtro monitor.....	16
Figura 5. Gráfico de rugosidade relativa em função do diâmetro	19
Figura 6. Ábaco de Moody.....	20
Figura 7. Linha de sucção.....	24
Figura 8. Linha de descarga	25
Figura 9. Sistema de bombeamento	25
Figura 10. Conexões de tubulações	27
Figura 11. Válvulas de gaveta com redução de engrenagens	28
Figura 12. Válvula de retenção portinhola	28
Figura 13. Válvula de globo	29
Figura 14. Válvula de esfera	30
Figura 15. Válvula de segurança	31
Figura 16. Fluxograma das etapas do projeto TCC	33
Figura 17. Sistema de telemetria	34
Figura 18. Manômetro linha 1C	35
Figura 19. Manômetro do filtro.....	35
Figura 20. Dados diários do diferencial de pressão	36
Figura 21. Tanque de passagem	38
Figura 22. Descarga de produto	39
Figura 23. Layout das bombas	39
Figura 24. Layout da tubulação	39
Figura 25. Filtro micrônico	40
Figura 26 Filtro separador coalescentes.....	41
Figura 27. Filtro micrônico	44
Figura 28. Filtro separador coalescente.....	45
Figura 29. Ficha filtro micrônico.....	47
Figura 30. Ficha filtro separador coalescente	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Comprimentos Equivalentes para Entradas e Saídas.....	22
Tabela 2. Comprimentos Equivalentes válvulas	23
Tabela 3. Comprimentos Equivalentes joelhos, curvas e tês.....	23
Tabela 4. Dados do JET A.....	34
Tabela 5. Comprimento equivalente total	42
Tabela 6. Comprimento equivalente total	46

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	OBJETIVOS	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	LÍQUIDOS INFLAMÁVEIS.....	12
2.1.1	Combustível na aviação.....	12
2.2	FILTRAGEM	14
2.2.1	Filtro cesta	14
2.2.2	Filtro micrônico.....	15
2.2.3	Filtro separador	15
2.2.4	Filtro monitor	16
2.3	TUBULAÇÃO.....	17
2.3.1	Escoamento	17
2.3.2	Perda de carga.....	17
2.3.3	Características do sistema	24
2.3.4	Acessórios das tubulações	26
2.4	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	31
3	METODOLOGIA.....	32
3.1	DESCRIÇÃO DE ETAPAS.....	32
4	DISCUSSÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	38
4.1	CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA.....	38
4.2	DIMENSIONAMENTO DA TUBULAÇÃO	41
4.3	DIMENSIONAMENTO DA FILTRAGEM.....	44
4.3.1	Filtro micrônico.....	44
4.3.2	Filtro separador coalescente.....	45
4.4	ESCOLHA DOS EQUIPAMENTOS.....	45
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	49
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
	ANEXOS	54

1 INTRODUÇÃO

Segundo o Ministério da Infraestrutura (2018), o Brasil possui 2499 aeroportos, o que o torna a segunda nação com o maior número de aeroportos do mundo. Conforme um estudo realizado pela Associação Internacional de Transporte Aéreo (IATA), em 2017 o setor de transporte aéreo contribuiu com US\$ 18,8 bilhões para o PIB e pode atingir US\$ 88 bilhões até 2037 com políticas favoráveis (IATA, 2017).

Com esse aumento no setor, tende influenciar no sistema energético, o consumo de energia elétrica no Brasil em fevereiro de 2022 teve alta de 1% em relação ao mês em 2021, segundo a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE, 2022). Sendo assim, cada vez mais é necessária a busca pela redução do consumo, a eficiência energética busca obter o mesmo resultado utilizando menos energia durante o processo. Nesse contexto, torna-se necessário a implementar medidas para o uso da energia racional e eficiente.

O combustível utilizado na aviação passa por rigoroso controle de qualidade desde o recebimento do produto até o momento de abastecimento das aeronaves. Lidar com combustíveis de avião requer cuidados especiais. De acordo com SERIPA (2013) a garantia do voo da aeronave não é apenas abastecer, pois desde a etapa de drenagem dos tanques até o abastecimento, passando pelo manuseio e armazenamento, o ideal é que os procedimentos previstos sejam cumpridos corretamente. Com isso, a filtragem do combustível é essencial, pois possibilita a retenção de micropartículas sólidas e água do combustível.

Portanto, esse trabalho é motivado pela necessidade de obter uma maior eficiência energética no processo de filtragem do combustível JET-A em uma Instalação responsável pelo recebimento, armazenamento e abastecimento de aeronaves. Assim, esse projeto busca reduzir os custos no processo de filtragem a partir da eficiência energética. Isto é, será analisado diferentes equipamentos de filtragem que atendem a necessidade e o *layout* de tubulações para a obtenção de menores perdas de carga a partir de um dimensionamento adequado.

Dessa forma, o intuito desse projeto é a obtenção de filtros que possibilitem um dimensionamento mais eficiente em prol da redução de custo para a empresa, conseqüentemente podendo ser utilizado para projetar melhorias pela equipe de engenharia no processo de filtragem. Além disso, contribuirá para estudos similares

de engenheiros de outras instalações.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral é promover o processo de filtragem mais eficiente na instalação, reduzindo custos, a qual atua com recebimento, controle de qualidade, armazenamento e abastecimento de combustível, a partir da diminuição da perda de carga no processo de filtragem. Os objetivos específicos são:

- Identificar outros possíveis equipamentos que atendem a necessidade de filtragem do combustível da aviação;
- Analisar a substituição de válvulas e conexões para obter menor perda de carga no sistema.
- Analisar novos *layouts* da tubulação que possibilitem menos perda de carga.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 LÍQUIDOS INFLAMÁVEIS

De acordo com a NR-20 (2022), norma regulamentadora em relação a execução do trabalho com inflamáveis e combustíveis, a principal referência para caracterizar um líquido como inflamável ou combustível é o ponto de fulgor (PF). Segundo Moraes (2008) e Cunha (2008), o ponto de fulgor é a menor temperatura, na qual o combustível ao ser aquecido, sob condições controladas, gera uma quantidade de vapor suficiente para formar uma mistura inflamável com o ar, ou seja, quanto maior o ponto de fulgor do combustível ele apresenta menor perigo de explosão.

Ainda segundo a NR-20 (2022), combustíveis são produtos que possuam um ponto de fulgor superior a 60°C e inferior ou igual a 93°C, e os líquidos inflamáveis são líquidos com ponto de fulgor superior a 60°C. Líquidos que possuem ponto de fulgor superior a 60°C, quando armazenados e transferidos aquecidos a temperaturas iguais ou superiores ao seu ponto de fulgor, se equiparam aos líquidos inflamáveis (NR-20, 2022).

Para haver o fogo, é preciso um conjunto de componentes, oxigênio, calor e combustível, formando um triângulo do fogo, onde cada componente forma um dos seus lados (BAROLI, 1975). Para Baroli (1975) se um dos elementos for eliminado, o triângulo do fogo deixará de existir e o fogo é extinto. Onde a presença de fogo é uma preocupação no manuseio de líquidos inflamáveis em uma instalação.

2.1.1 Combustível na aviação

No Brasil são comercializados dois combustíveis aeronáuticos derivados de petróleo: a gasolina de aviação, utilizada nos motores de pistão e o querosene de aviação, empregado nas turbinas aeronáuticas (CGEE, 2010).

A gasolina de aviação (AVGAS) apresenta alto índice de desempenho, além de outras características especiais para o uso aeronáutico. Quimicamente, é uma mistura de hidrocarbonetos predominantemente de 5 a 10 átomos de carbono, em geral obtida por processos desenvolvidos para produção de compostos com alto número de octano tais como: reforma catalítica, isomerização, polimerização e alquilação (CGEE, 2010).

Com componentes mais pesados do que a gasolina, contendo entre 9 a 16 átomos de carbono, o querosene de aviação (JET A) corresponde à fração de produtos destilados do petróleo bruto em sua maior parte entre 150 e 190°C, constituído de hidrocarbonetos alifáticos, naftênicos e aromáticos, com um ponto de inflamação que oferece mais segurança que a gasolina e bastante adequado para uso em turbinas a gás (CGEE, 2010).

Para que esse derivado de petróleo apresente características adequadas à geração de energia para motores de turbina a gás, diversos critérios físicoquímicos são requeridos durante a sua produção, que incluem desde fluidez (escoamento), estabilidade (estocagem) até a adequada combustão para esses motores (PETROBRAS, 2021). Sendo assim, segundo a Petrobras (2021) as características necessárias fundamentais no JET A, líquido inflamável com ponto de fulgor 38 °C, são:

- Escoamento a baixa temperatura: objetiva garantir que o combustível seja perfeitamente bombeado e com escoamento contínuo durante o voo em grandes altitudes, onde a temperatura externa alcança valores da ordem de -50 °C, e que seja disperso adequadamente na câmara de combustão. Essa característica é avaliada pelos ensaios com JET A de ponto de congelamento -40 °C e viscosidade máxima a -20° C de 8 mm²/s.
- Estabilidade Térmica: a temperatura do querosene de aviação pode atingir 150°C em ensaios laboratoriais, e ao retornar ao tanque de armazenamento pode favorecer a degradação térmica do combustível armazenado, produzindo depósitos que podem afetar o fluxo de combustível, a transferência de calor nos trocadores e a combustão pela obstrução de injetores, por isso é essencial garantir a estabilidade.
- Combustão: é avaliada pelas propriedades do poder calorífico mínimo de 42,8 MJ/kg e garante que o combustível utilizado produza energia necessária para uma determinada autonomia de voo. Também através do Ponto de fuligem mínimo de 25 mm e teor de aromáticos de 25% que permitem a geração de uma chama que não ocasione formação significativa de fuligem e de depósitos, preservando a vida útil da câmara de combustão.

Além disso, de acordo com a Petrobras (2021) o JET A deve ser analisado em relação a corrosividade e dissolução de elastômeros para evitar danos aos metais no

abastecimento e nos elastômeros empregados na vedação das conexões. Também a ausência de água faz parte do critério de qualidade, pois sua presença pode provocar cristalização a baixas temperaturas, possibilidade de crescimento de microrganismos no armazenamento e formação de H_2SO_4 , que ocasionará corrosão em equipamentos.

2.2 FILTRAGEM

A filtração tem por objetivo remover material particulado e água livre, dispersos no JET A-1 e na AVGAS 100L. Tais substâncias indesejáveis podem incorporar-se durante as fases de manuseio. Os contaminantes, permanecendo por período prolongado no combustível podem afetar algumas de suas características. Os filtros devem atender rigorosamente os critérios definidos pela NR-13 (2019), que estabelece requisitos mínimos para gestão da integridade estrutural dos vasos de pressão (Código PP-2BR-00301, 2018).

A presença do material particulado pode entupir filtros a bordo da aeronave e restringir o volume de combustível chegando ao motor. Já a presença de água pode provocar congelamento do combustível ou apagar a turbina durante a queima. Qualquer que seja a falha o resultado pode ser catastrófico (Roger, 2012).

2.2.1 Filtro cesta

De acordo com a NBR 15216 (2005), o filtro cesta é um dispositivo utilizado na retenção de material particulado de maior granulometria. O procedimento PP-2BR-00301 (2018) detalha que os contaminantes sólidos são retidos através de uma cesta com malha metálica de aço inoxidável, com cerca de 150 micrômetros.

Figura 1. Filtro Cesta



Fonte: ASCA (2022)

2.2.2 Filtro micrônico

Segundo a NBR 15216 (2005) o filtro micrônico é um dispositivo de filtragem cujos elementos filtrantes são dimensionados para diferentes tamanhos de partículas. Para o combustível da aviação são utilizados elementos que retêm impurezas sólidas com dimensões iguais ou inferiores a $5 \mu m$.

Figura 2. Filtro Micrônico



Fonte: FILMACH (2022)

2.2.3 Filtro separador

A NBR 15216 (2005) traz o filtro separador como equipamento utilizado para remover água e impurezas sólidas do combustível em dois estágios de filtragem: no primeiro os elementos coalescedores retêm os sólidos e coalescem as gotas de água, e no segundo o elemento separador repele a água, impedindo que as gotículas residuais, que não decantaram para a bacia de drenagem por gravidade, fluam com o combustível através do elemento separador.

De acordo com o procedimento PP-2BR-00301 (2018) o filtro coalescedor/separador é capaz de reter os contaminantes com dimensões superiores a $0,5 \mu m$ em instalação fixa e $0,3 \mu m$ nos equipamentos móveis, além disso, separa água dispersa no JET A até $15 ppm$.

Figura 3. Filtro Separador



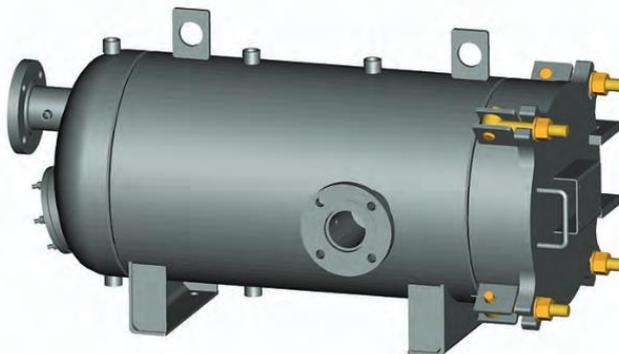
Fonte: FILMACH (2022)

2.2.4 Filtro monitor

Seguindo a NBR 15216 (2005) temos o filtro monitor como dispositivo de filtragem para remoção de partículas sólidas e água não dissolvida dos combustíveis da aviação. Onde tem a capacidade de interromper o fluxo do combustível quando o nível de saturação dos elementos filtrantes atinge grau inaceitável. Esse tipo de filtro geralmente é instalado em veículos abastecedores como último estágio de filtração antes do abastecimento da aeronave.

De acordo o procedimento PP-2BR-00301 (2018) o filtro monitor retém partículas com dimensões superiores a $0,5 \mu m$, apesar de não repelir a água como o separador, ele absorve por reação química com partículas de água, formando uma substância viscosa que é retirada por uma estrutura de fibras.

Figura 4. Filtro monitor



Fonte: PARKER (2022)

2.3 TUBULAÇÃO

A análise do *layout* da tubulação possibilita o dimensionamento de forma mais eficiente em relação ao diâmetro, material e formato de acordo com a necessidade do processo.

2.3.1 Escoamento

Para Fox et al. (2014) um escoamento laminar é aquele em que as partículas fluidas se movem em trajetória linear e um escoamento turbulento é aquele em que as partículas fluidas rapidamente se misturam enquanto se movimentam, descrevem vórtices, ao longo do escoamento devido a flutuações aleatórias no campo tridimensional de velocidades.

White (2009) descreve que em condutos forçados, o regime de escoamento é laminar para números de Reynolds menores do que 2000, $Re < 2000$, e turbulento para número de Reynolds maiores do que 4000, $Re > 4000$. Para números de Reynolds entre 2000 e 4000 o regime de escoamento pode ser considerado transitório.

De acordo com Fox et al. (2014) no escoamento turbulento não podemos avaliar a queda de pressão analiticamente, devemos recorrer a resultados experimentais e utilizar a análise dimensional para correlacioná-los.

2.3.2 Perda de carga

De acordo com Macintyre (1987) a perda de carga representa a energia dissipada involuntariamente pelo líquido em escoamento devido ao atrito interno contra as paredes e perturbações no escoamento.

Segundo Fox et al. (2014), na equação de Bernoulli é possível adicionar um fator de perda de carga, h_{lt} , a qual pode ser utilizado para calcular a diferença de pressão entre dois pontos quaisquer em uma tubulação, desde que possa ser determinado.

$$\left(\frac{p_1}{\rho} + \frac{\bar{v}_1^2}{2} + gz_1\right) - \left(\frac{p_2}{\rho} + \frac{\bar{v}_2^2}{2} + gz_2\right) = h_{lt} \quad (2.1)$$

Onde p é a pressão [Pa], ρ a massa específica [kg/m^3], V a velocidade média do escoamento [m/s], g a aceleração da gravidade [m/s^2], z a altura que o fluido se encontra [m] e h_{lt} a perda de carga total. A perda de carga total, h_{lt} , é considerada como a soma das perdas maiores, h_l , causadas por efeitos de atrito no escoamento completamente desenvolvido em tubos de seção constante, com as perdas localizadas, h_{lm} , causadas por entradas, acessórios, variações de área e outras (Fox et al., 2014).

2.3.2.1 Perda de carga normal (h_{fN})

De acordo com Fox et al. (2014) a perda de carga normal pode ser expressa como a perda de pressão para escoamento completamente desenvolvido em um tubo horizontal de área constante.

Como a perda de carga representa a energia mecânica convertida em energia térmica por efeitos de atrito, a perda de carga para escoamento completamente desenvolvido em tubos de área constante depende tão somente dos detalhes do escoamento através do duto. A perda de carga é independente da orientação do tubo (FOX et al., 2014).

Para determinação da perda de carga em escoamentos turbulentos, têm-se a equação de Darcy-Weisbach. Cardoso *et al.* (2008) afirmam que a equação de Darcy-Weisbach é a mais precisa em relação às demais, pois ela não assume um coeficiente de rugosidade constante para todos os tipos de diâmetros e velocidades de escoamento:

$$h_l = f \frac{L \bar{V}^2}{D 2g} \quad (2.2)$$

Onde f é o fator de atrito, D diâmetro [m], L comprimento [m], e rugosidade do tubo, V a velocidade média do escoamento [m/s] e g a aceleração da gravidade [m^2/s].

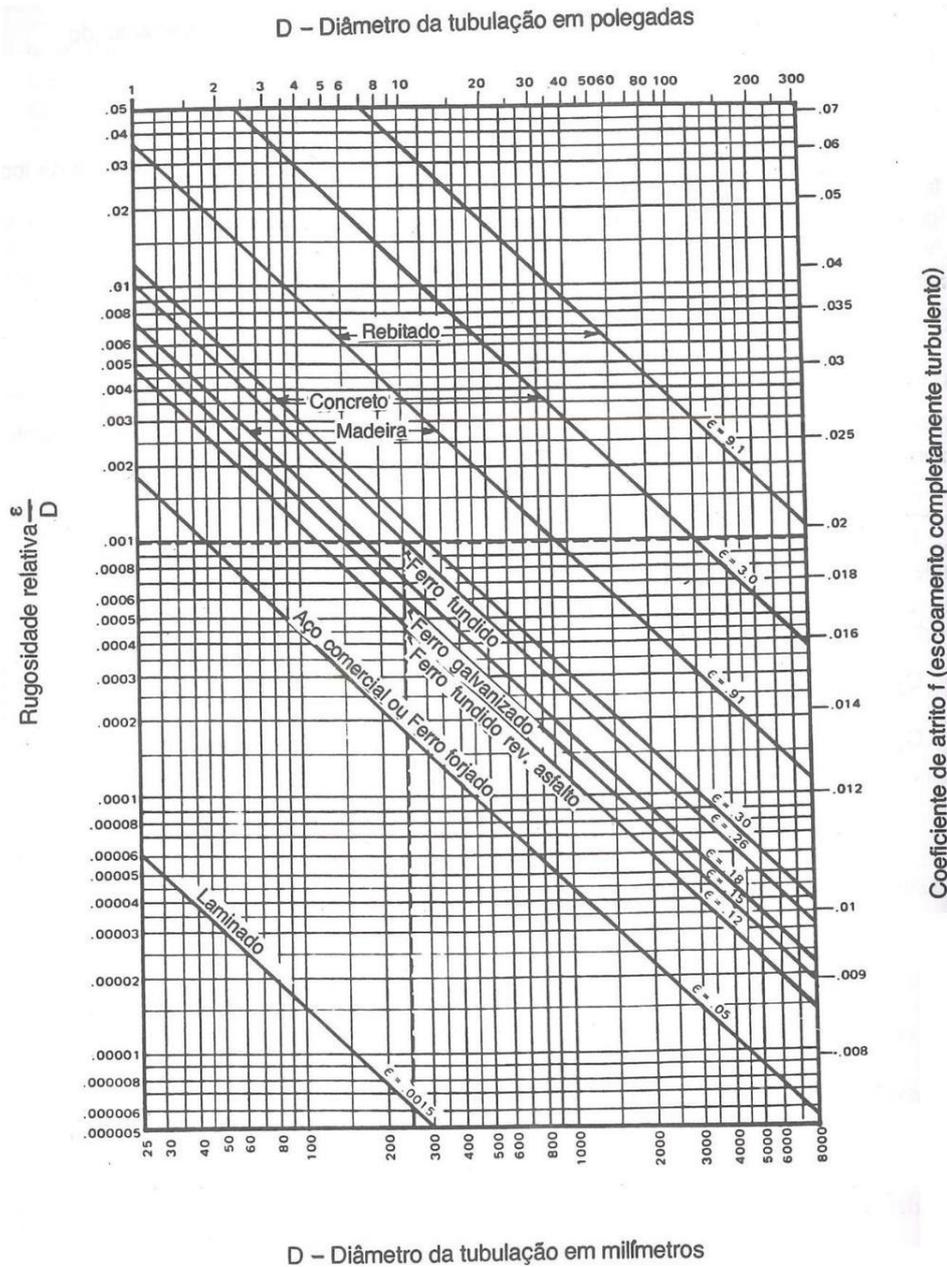
No escoamento laminar, a queda de pressão pode ser calculada analiticamente para o escoamento completamente desenvolvido em um tubo horizontal (FOX *et al.*, 2014), onde o fator de atrito da Equação (2.2), pode ser determinado abaixo:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.3)$$

FOX *et al.* (2014) traz o *Ábaco de Moody* como uma das maneiras de encontrar o coeficiente de atrito no regime turbulento (Figura 5), onde utiliza-se o

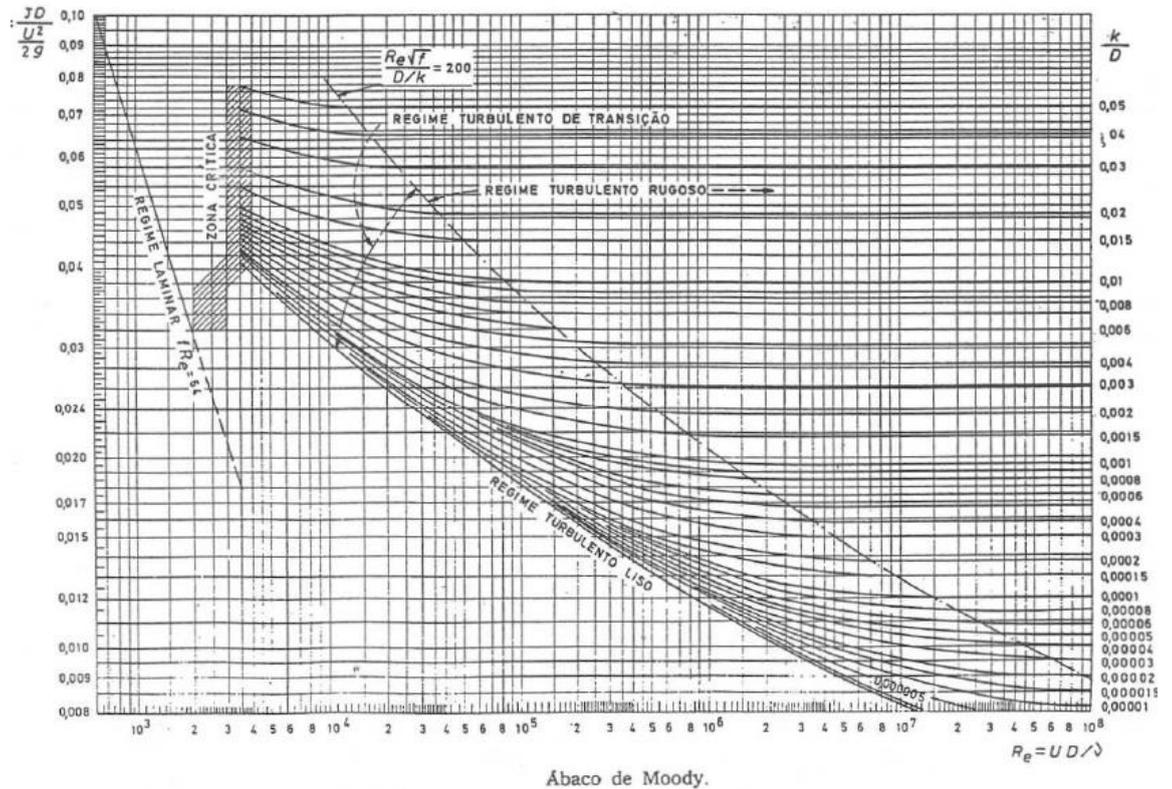
número de Reynolds e rugosidade relativa dependentes do material de diâmetro interno da tubulação. O fator de atrito decresce com o aumento do número de Reynolds enquanto o escoamento permanece laminar. Na transição, f aumenta bruscamente. No regime de escoamento turbulento, o fator de atrito decresce gradualmente e, por fim, nivela-se em um valor constante para grandes números de Reynolds (FOX *et al.*, 2014).

Figura 5. Gráfico de rugosidade relativa em função do diâmetro



Fonte: MATTOS e FALCO (1998)

Figura 6. Ábaco de Moody



Fonte: FOX *et al.* (2014)

2.3.2.2 Perda de carga localizada (h_{fL})

Perdas de carga localizadas ou singulares, ocorrerem especificamente em pontos ou partes bem determinadas da tubulação, ao contrário do que acontece com as perdas em consequência do escoamento ao longo dos encanamentos. A presença de acessórios, necessários para a operação do sistema, concorre para que haja alteração de módulo ou direção da velocidade média, e consequentemente de pressão. E suas equações são específicas para cada tipo de acessório como junções, válvulas, curvas etc., dependendo então exclusivamente do projeto hidráulico realizado (NETTO, 1998).

FOX *et al.*, 2014 traz na literatura a determinação da perda de carga gerada por acidentes e acessórios através do método de comprimentos equivalentes, onde adiciona ao trecho reto da tubulação um comprimento que equivale à perda de carga gerada por eles nas mesmas condições. Ainda segundo FOX *et al.* (2014), essas perdas são resultado da separação do escoamento, a energia é eventualmente

dissipada por forte mistura nas zonas separadas e são relativamente menores, se o sistema incluir longos trechos retos de tubo de seção constante. A perda de carga localizada tradicionalmente é calculada da seguinte forma:

$$h_{fL} = k \frac{\bar{v}^2}{2} \quad (2.4)$$

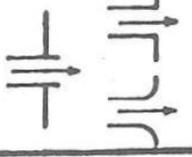
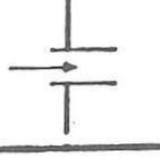
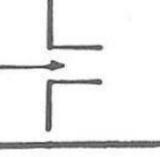
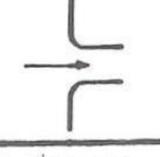
Onde o coeficiente de perda K , deve ser determinado experimentalmente para cada situação, ou

$$h_{fL} = f \frac{L_{total}}{D} \frac{\bar{v}^2}{2} \quad (2.5)$$

Onde L_{total} é o comprimento equivalente de um tubo reto.

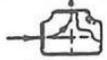
Para escoamento em curvas e acessórios de uma tubulação, o coeficiente de perda, K , varia com o diâmetro do tubo do mesmo modo que o fator de atrito, f , para o escoamento em um tubo de seção reta constante. Consequentemente, o comprimento equivalente, L_{total}/D , tende para uma constante para diferentes diâmetros de um dado tipo de acessório (FOX *et al.*, 2014).

Tabela 1. Comprimentos Equivalentes para Entradas e Saídas

Diâmetro Nominal (Polegada)	Saídas $K = 1,0$	Entradas		
		$K = ,78$	$K = ,5$	$K = ,24$
				
1/2	2 (0,61)	1,5 (0,46)	1 (0,30)	0,5 (0,15)
3/4	3 (0,91)	2,5 (0,76)	1,5 (0,46)	0,75 (0,23)
1	4 (1,22)	3 (0,91)	2 (0,61)	1 (0,30)
1 1/2	7 (2,13)	5,5 (1,68)	3,5 (1,07)	1,75 (0,53)
2	9 (2,74)	7 (2,13)	4,5 (1,37)	2,25 (0,69)
3	15 (4,57)	12 (3,66)	7,5 (2,29)	3,75 (1,14)
4	20 (6,10)	16 (4,88)	10 (3,05)	5 (1,52)
6	36 (10,98)	29 (8,84)	18 (5,49)	9 (2,74)
8	48 (14,63)	38 (11,59)	24 (7,32)	12 (3,66)
10	62 (18,90)	49 (14,94)	31 (9,45)	15 (4,57)
12	78 (23,78)	60 (18,29)	39 (11,89)	19 (5,79)
14	88 (26,83)	70 (21,34)	44 (13,41)	22 (6,71)
16	100 (30,49)	78 (23,78)	50 (15,24)	25 (7,62)
18	120 (36,59)	95 (28,96)	60 (18,29)	30 (9,15)
20	136 (41,46)	107 (32,62)	68 (20,73)	34 (10,37)
24	170 (51,83)	135 (41,16)	85 (25,91)	42 (12,80)

Fonte: MATTOS e FALCO (1998)

Tabela 3. Comprimentos Equivalentes joelhos, curvas e tês

Diâmetro nominal (in.)	Joelho (3) 90° 		Curvas (3) 90° 			
	Raio curto R = 1D	Raio longo R = 1,5D	R = 5D	R = 10D	Fluxo pelo ramal	Fluxo direto
1 1/2	4.5 (1,37)	3 (0,91)	2.5 (0,76)	4 (1,22)	8 (2,44)	3 (0,91)
2	5.25 (1,60)	3.5 (1,07)	3 (0,91)	5 (1,52)	11 (3,35)	3.5 (1,07)
2 1/2	6 (1,83)	4 (1,22)	3.5 (1,07)	6 (1,83)	13 (3,96)	4 (1,22)
3	7.5 (2,29)	5 (1,52)	4 (1,22)	7.5 (2,29)	16 (4,88)	5 (1,52)
4	10.5 (3,20)	7 (2,13)	5.5 (1,68)	10 (3,05)	20 (6,10)	7 (2,13)
6	15 (4,57)	10 (3,05)	8.5 (2,59)	15 (4,57)	30 (9,15)	10 (3,05)
8	21 (6,40)	14 (4,27)	11 (3,35)	20 (6,10)	40 (12,20)	14 (4,27)
10	24 (7,32)	16 (4,88)	14 (4,27)	25 (7,62)	50 (15,24)	16 (4,88)
12	32 (9,76)	21 (6,40)	16 (4,88)	30 (9,15)	60 (18,29)	21 (6,40)
14	33 (10,06)	22 (6,71)	19 (5,79)	33 (10,06)	65 (19,82)	22 (6,71)
16	39 (11,89)	26 (7,93)	21 (6,40)	38 (11,59)	75 (22,87)	26 (7,93)
18	44 (13,41)	29 (8,84)	24 (7,32)	42 (12,80)	86 (26,22)	29 (8,84)
20	48 (14,63)	32 (9,76)	27 (8,23)	50 (15,24)	100 (30,49)	32 (9,76)
22	53 (16,16)	36 (10,98)	30 (9,15)	55 (16,77)	110 (33,54)	36 (10,98)
24	57 (17,38)	38 (11,59)	32 (9,76)	60 (18,29)	120 (36,59)	38 (11,59)
30	75 (22,87)	50 (15,24)	40 (12,20)	75 (22,87)	155 (47,26)	50 (15,24)
36	90 (27,44)	60 (18,29)	50 (15,24)	90 (27,44)	180 (54,88)	60 (18,29)
42	105 (32,01)	70 (21,34)	56 (17,07)	101 (30,79)	210 (64,02)	70 (21,34)
48	120 (36,59)	80 (24,39)	62 (18,90)	120 (36,59)	250 (76,22)	80 (24,39)
52	135 (41,16)	90 (27,44)	72 (21,95)	130 (39,63)	260 (79,27)	90 (27,44)

Fonte: MATTOS e FALCO (1998)

Tabela 2. Comprimentos Equivalentes válvulas

Diâmetro Nominal (Polegadas)	Válvulas gaveta (abertura total)	Válvulas globo (2) (abertura total)			Válvula de retenção		Válvulas de esfera ou macho (abertura total)	Válvula de três vias (Área de abertura 80% da área tubo)		Válvula borboleta (abertura total)	Diâmetro Nominal (Polegadas)
		90°	60°	45°	Portinhola	Levanamento		Fluxo direto	Fluxo pelo ramal		
1 1/2"	1.75 (0,53)	46 (14,02)	23 (7,01)	18 (5,49)	17 (5,18)	20 (6,10)	2.5 (0,76)	6 (1,83)	20 (6,10)	6 (1,83)	1 1/2"
2"	2.25 (0,69)	60 (18,29)	30 (9,15)	24 (6,52)	22 (6,71)	25 (7,62)	3.5 (1,07)	7.5 (2,29)	24 (7,32)	8 (2,36)	2"
2 1/2"	2.75 (0,84)	70 (21,34)	38 (11,59)	30 (9,15)	27 (8,23)	30 (9,15)	4 (1,22)	9 (2,74)	30 (9,15)	10 (3,05)	2 1/2"
3"	3.5 (1,07)	90 (27,44)	45 (13,72)	38 (11,59)	35 (10,67)	38 (11,59)	5 (1,52)	12 (3,66)	36 (10,98)	12 (3,66)	3"
4"	4.5 (1,37)	120 (36,59)	60 (18,29)	48 (14,63)	45 (13,72)	50 (15,24)	6.5 (1,98)	15 (4,57)	48 (14,63)	15 (4,57)	4"
6"	6.5 (1,98)	175 (53,35)	88 (26,83)	72 (21,95)	65 (19,82)	75 (22,87)	10 (3,05)	22 (6,71)	70 (21,34)	23 (7,01)	6"
8"	9 (2,74)	230 (70,12)	120 (36,59)	95 (28,96)	90 (27,44)	100 (30,49)	13 (3,96)	30 (9,15)	95 (28,96)	27 (8,23)	8"
10"	12 (3,66)	280 (85,37)	150 (45,73)	130 (39,63)	120 (36,59)	130 (39,63)	16 (4,88)	38 (11,59)	120 (36,59)	35 (10,67)	10"
12"	14 (4,27)	320 (97,56)	170 (51,83)	145 (44,21)	140 (42,68)	150 (45,73)	19 (5,79)			40 (12,20)	12"
14"	15 (4,57)	380 (115,85)	190 (57,53)	160 (48,78)	150 (45,73)	170 (51,83)	20 (6,10)			45 (13,72)	14"
16"	17 (5,18)	420 (128,05)	220 (67,07)	180 (54,88)	170 (51,83)	190 (57,93)	22 (6,71)			50 (15,24)	16"
18"	18 (5,49)	480 (146,34)	250 (76,22)	205 (62,50)	180 (54,88)	210 (64,02)	24 (7,32)			58 (17,68)	18"
20"	20 (6,10)	530 (161,59)	290 (88,41)	240 (73,17)	200 (60,98)	240 (73,17)	27 (8,23)			64 (19,51)	20"
22"	25 (7,62)	580 (176,83)	300 (91,46)	255 (77,74)	240 (73,17)	260 (79,27)	30 (9,15)			70 (21,34)	22"
24"	32 (9,76)	630 (192,07)	330 (100,61)	270 (82,32)	250 (76,22)	290 (88,41)	33 (10,06)			78 (23,78)	24"
										100 (30,49)	30"
										125 (38,11)	36"
										145 (44,21)	42"
										165 (50,30)	48"
										175 (53,35)	52"

Fonte: MATTOS e FALCO (1998)

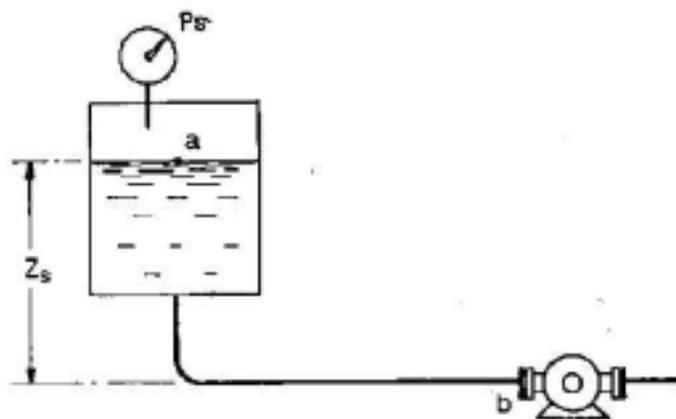
2.3.3 Características do sistema

A carga é uma característica da bomba enquanto que a altura manométrica é uma característica do sistema, apenas devendo-se considerar que a carga expressa em medida linear nos diz a altura manométrica que a bomba é capaz de vencer em determinada vazão (MATTOS E FALCO, 1998).

2.3.3.1 Altura manométrica de sucção (H_s)

De acordo com Mattos e Falco (1998) a altura manométrica de sucção é a quantidade de energia por unidade de peso já existente no flange de sucção para uma determinada vazão, aplicando o teorema de Bernoulli entre um ponto tomado na superfície livre do reservatório de sucção e o flange de sucção da bomba.

Figura 7. Linha de sucção



Fonte: MATTOS e FALCO (1998)

Assim, obtendo a Equação (2.6):

$$H_s = Z_s + \frac{P_s}{\gamma} - h_{fs} \quad (2.6)$$

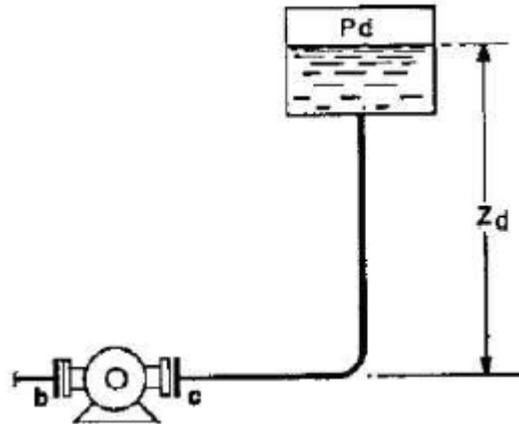
Onde Z_s é a altura estática de sucção [m], P_s a pressão manométrica no reservatório de sucção [N/m^2], γ peso específico [N/m^3] e h_{fs} perda de carga na linha de sucção e acessórios de sucção [m].

2.3.3.2 Altura manométrica de descarga (H_d)

Segundo Mattos e Falco (1998) a altura manométrica de descarga é a quantidade de energia por unidade de peso que deve existir no flange de descarga

para que o fluido alcance o reservatório de descarga nas condições exigidas de vazão e pressão, onde é calculada de forma análoga a de sucção, aplicando o teorema de Bernoulli entre o flange de descarga e o ponto final de descarga.

Figura 8. Linha de descarga



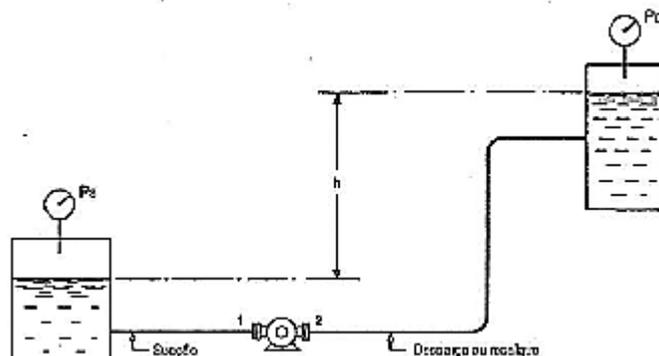
Fonte: MATTOS e FALCO (1998)

Assim, obtendo a Equação (8):

$$H_d = Z_d + \frac{P_d}{\gamma} - h_{fd} \quad (2.7)$$

Onde Z_d é a altura estática de descarga [m], P_d a pressão manométrica no reservatório de descarga [N/m^2], γ peso específico [N/m^3] e h_{fd} perda de carga na linha de descarga e acessórios de descarga [m].

Figura 9. Sistema de bombeamento



Fonte: MATTOS e FALCO (1998)

2.3.3.3 Altura manométrica total (H)

De acordo com Mattos e Falco (1998) a altura manométrica é diferente para cada vazão e é calculada pela diferença entre a altura manométrica de descarga (H_d) e altura manométrica de sucção (H_s).

Assim, obtendo a Equação (2.8) e (2.9):

$$H = H_d - H_s \quad (2.8)$$

$$H = (Z_d - Z_s) + \left(\frac{P_d - P_s}{\gamma}\right) + (h_{fd} + h_{fs}) \quad (2.9)$$

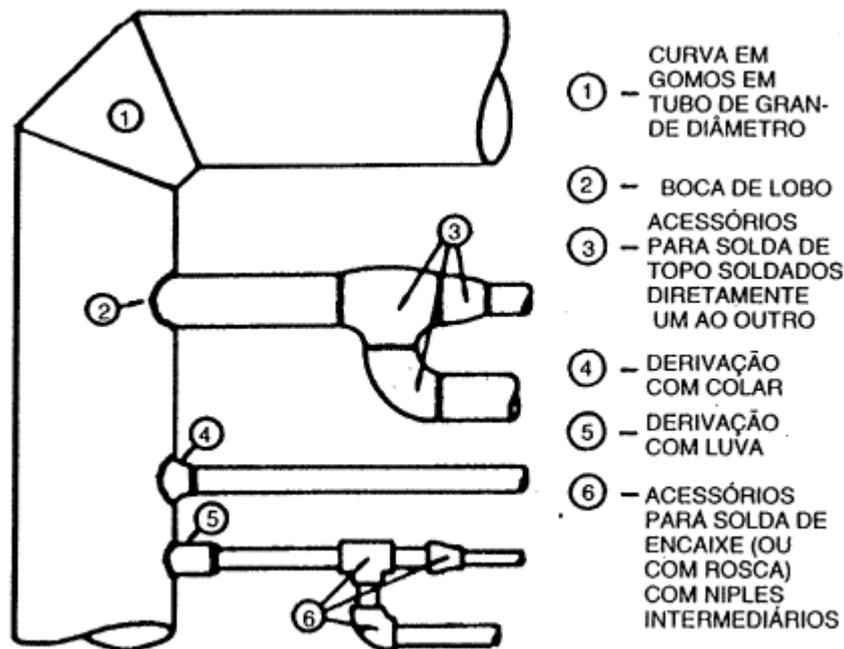
2.3.4 Acessórios das tubulações

2.3.4.1 Conexões

De acordo com Telles (1997) as conexões da tubulação são classificadas de acordo com as finalidades e tipos:

- Mudanças de direção em tubulações: curvas de raio longo, raio curto e de redução, e joelhos de redução;
- Derivações em tubulações: tês normais, de 45° e de redução, peças em Y, cruzetas de redução, selas, colares e anéis de reforço;
- Mudanças de diâmetro em tubulações: reduções concêntricas, excêntricas e bucha;
- Ligações em tubos entre si: luvas, uniões, flanges, niples e virolas;
- Fechamentos da extremidade de um tubo: tampões, bujões e flanges cegos.

Figura 10. Conexões de tubulações



Fonte: TELLES (1997)

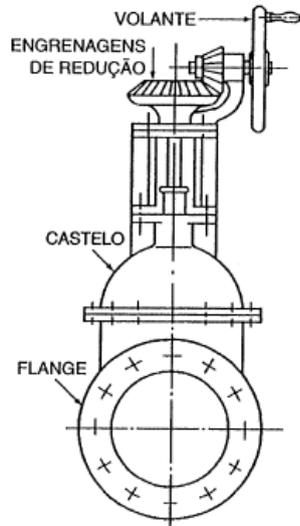
2.3.4.2 Válvulas

De acordo com Telles (1997) as válvulas mais importantes são as de bloqueio, de regulagem, que permitem o fluxo em apenas um sentido, que controlam a pressão de montante e de contrapressão, podendo ter operação manual, motorizada ou automática.

2.3.4.2.1 Válvulas de gaveta

Telles (1997) trás o conceito de que as válvulas de gaveta são as válvulas de bloqueio de líquidos por excelência, empregadas em quaisquer diâmetros, na maioria das tubulações de água, óleos e líquidos em geral, são usadas para quaisquer pressão e temperatura. Elas só devem trabalhar completamente abertas ou completamente fechadas, pois são válvulas de bloqueio e não de regulagem. Quando parcialmente abertas, causam perdas de carga muito elevadas e laminagem da veia fluida, acompanhada muitas vezes de cavitação e violenta corrosão e erosão.

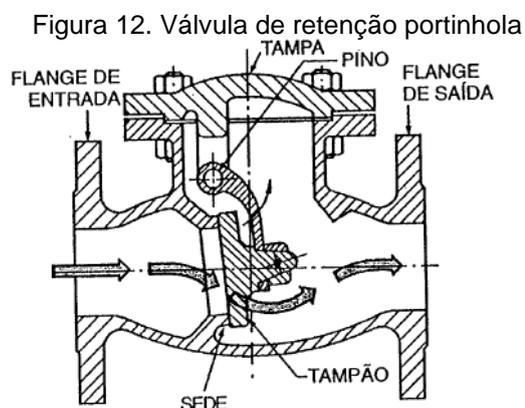
Figura 11. Válvulas de gaveta com redução de engrenagens



Fonte: TELLES (1997)

2.3.4.2.2 Válvulas de retenção

De acordo com Telles (1997) as válvulas de retenção são de operação automática, permitem a passagem do fluido em apenas um sentido, fechando-se automaticamente por diferença de pressões, exercidas pelo fluido em consequência do próprio escoamento. Utilizadas tipicamente em linhas de recalque de bombas quando há mais de uma bomba em paralelo descarregando no mesmo tronco, linhas de recalque de uma bomba para um reservatório elevado e extremidades livres da linha de sucção de uma bomba, no caso de sistemas com sucção não afogada.

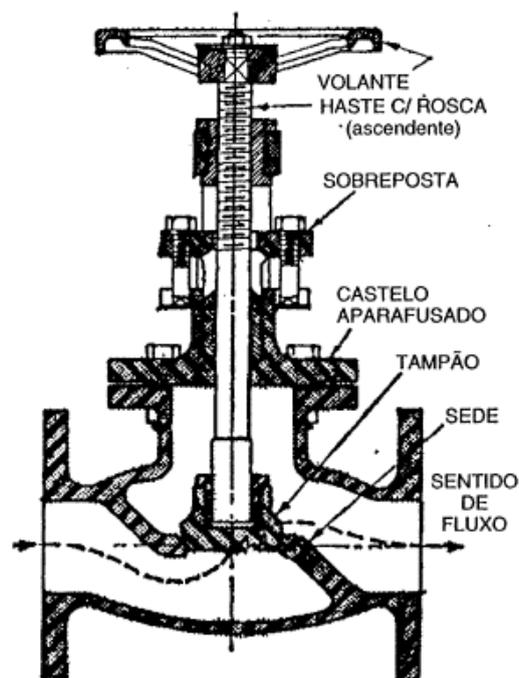


Fonte: TELLES (1997)

2.3.4.2.3 Válvulas de globo

Nas válvulas de globo o fechamento é feito por meio de um tampão que se ajusta contra uma única sede, cujo orifício está geralmente em posição paralela ao sentido geral de escoamento do fluido. As válvulas de globo dão uma vedação bem melhor do que as válvulas de gaveta, podendo-se conseguir, principalmente em válvulas pequenas, uma vedação absolutamente estanque. (TELLES, 1997).

Figura 13. Válvula de globo

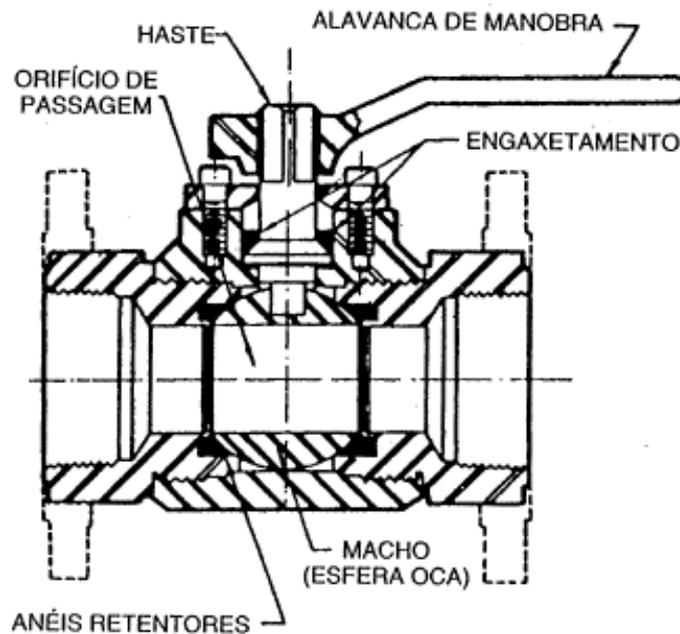


Fonte: TELLES (1997)

2.3.4.2.4 Válvulas de esfera

Segundo Telles (1997) nessas válvulas o fechamento é feito pela rotação de uma peça esfera, onde há um orifício bloqueado no interior do corpo da válvula de fecho rápido. Elas são ideais para fluidos que tendem a deixar depósitos sólidos, por arraste, polimerização e coagulação por exemplo, a superfície interna lisa dificulta a formação deles. As válvulas de esfera convencionais não são adequadas para serviços em temperaturas elevadas, devido a limitação de temperatura dos anéis retentores não-metálicos.

Figura 14. Válvula de esfera

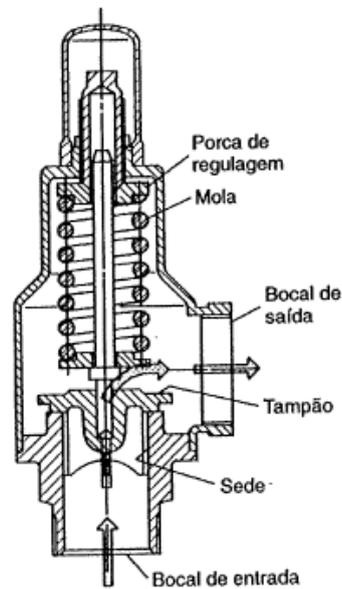


Fonte: TELLES (1997)

2.3.4.2.5 Válvulas de segurança e de alívio

De acordo com Telles (1997) são válvulas que controlam a pressão a montante abrindo-se automaticamente, quando essa pressão ultrapassar um determinado valor para qual a válvula foi calibrada, fechando-se quando a pressão diminuir. São chamadas de válvulas de segurança ao trabalhar com fluidos elásticos e de alívio com líquidos, que são fluidos incompressíveis.

Figura 15. Válvula de segurança



Fonte: TELLES (1997)

2.4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Para a eficiência energética de um sistema de filtragem é necessário analisar a perda de carga do filtro, segundo Fox et al. (2014) uma perda de carga grande significa que o custo de operação do dispositivo é alto, ele consumirá boa quantidade de energia do fluido. Um alto custo inicial deve ser amortizado durante a vida útil do dispositivo.

O mais importante fator na otimização energética é conseguir a mais baixa perda de carga ao longo do ciclo de vida do filtro. O desafio é manter a eficiência de retenção especificada à menor perda de carga possível (TROX, 2019).

3 METODOLOGIA

Esse trabalho é classificado como pesquisa bibliográfica e de campo em relação aos procedimentos, quantitativa quanto a abordagem, aplicada referente a finalidade e descritiva no que se refere aos objetivos.

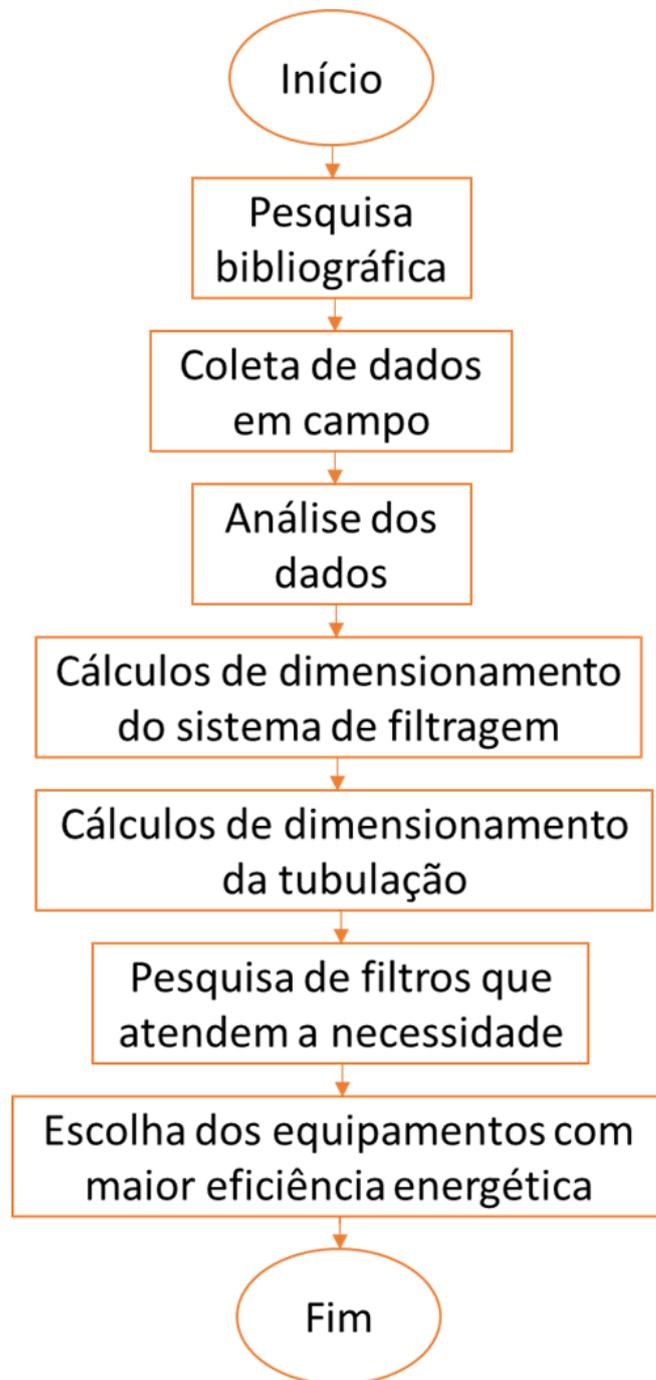
3.1 DESCRIÇÃO DE ETAPAS

Inicialmente a pesquisa será através de teses, livros, dissertações e artigos. Após isso, será definida quais filtros e parte da tubulação será analisada, pois existem três linhas de filtragem no processo, onde as características são semelhantes, logo o critério de escolha será o equipamento com maior disponibilidade de coleta de dados, o qual funcionou todos os dias ao longo do período analisado.

A partir disso, haverá o levantamento de dados. Os dados de entrada referentes a tubulação serão definidos através de diâmetro e *layout*, os dados do equipamento de filtragem serão determinados de acordo com vazão e pressão. Além disso, são necessárias as informações técnicas do combustível analisado.

No dimensionamento, será analisado o consumo na etapa de filtragem. Assim, serão selecionados equipamentos da tubulação e o filtro adequado que forneça maior eficiência energética. Isso será fundamentado através do cálculo da perda de carga em busca de otimização.

Figura 16. Fluxograma das etapas do projeto TCC



Fonte: Autoria própria

- Pesquisa Bibliográfica

O presente trabalho iniciou-se com pesquisa bibliográfica em relação ao processo de filtragem do combustível da aviação, detalhando especificações do mesmo, através de teses, livros, dissertações e artigos relacionados com mecânica

dos fluidos e máquinas hidráulicas.

Segue na Tabela 04 as características do JET A que serão utilizadas nas próximas seções, obtidas segundo a Petrobras (2021) e presente no ANEXO I.

Tabela 4. Dados do JET A

Massa Específica (ρ)	836,60 kg/m ³
Peso específico (γ)	8207,05 N/m ³
Viscosidade cinemática (ν)	2 mm ² /s

Fonte: Autoria própria

- Coleta de dados em campo

Referente à tubulação, será realizada a medição com trena do comprimento e diâmetro, assim como as medições dos acessórios presentes na parte horizontal.

Para análise da vazão nas linhas de filtragem tem-se o sistema de telemetria ENRAF, o qual fornece os valores de temperatura e vazão em tempo real, Figura 17. Os equipamentos que compõem o sistema estão inseridos nos tanques de armazenamento. Assim, possibilitando a coleta da vazão na linha de cada filtro. A pressão da linha é obtida através de manômetro presente da tubulação e exposto na Figura 18, onde sua leitura é realizada quando há fluxo de combustível.

Figura 17. Sistema de telemetria



Fonte: Autoria própria

Figura 18. Manômetro linha 1C



Fonte: Autoria própria

Para a obtenção do dado de pressão nos filtros tem-se a presença de manômetros em cada equipamento, o qual permite analisar a perda de carga através do diferencial de pressão da Figura 19.

Figura 19. Manômetro do filtro



Fonte: Autoria própria

- Análise de dados

Após a obtenção dos dados em campo, deve-se analisar a coerência dos valores obtidos, comparando com as informações presentes no histórico das coletas. Onde tem-se uma planilha, como ilustrado na Figura 20, com informações diárias das leituras de vazão e pressão de cada linha de filtragem.

Figura 20. Dados diários do diferencial de pressão

GRÁFICO DE CONTROLE DE DIFERENCIAL DE PRESSÃO DOS VASOS FILTRANTES				
Dia	Leitura medida DP	Leitura vazão	Vazão Máxima Operac.	DP Corrigida
	PSI	LPM	LPM	PSI
1	10	1900	2271	12,0
2	10	1898	2271	12,0
3	10	1898	2271	12,0
4	13	1763	2271	16,7
5	10	1882	2271	12,1
6	11	1913	2271	13,1
7	11	1828	2271	13,7
8	11	1833	2271	13,6
9	11	1833	2271	13,6
10	11	1833	2271	13,6

Fonte: Autoria própria

- Dimensionamento do sistema de filtragem

Para o filtro separador coalescente o fabricante fornece como vazão máxima 2252,075 LP e diferencial de pressão máximo de 15 *psi*.

Para determinação da perda de carga tem-se a equação de Darcy-Weisbach (MATOS e FALCO, 1998), utilizando a pressão em peso específico:

$$h_{fd, filtro} = \frac{\Delta P}{\gamma} \quad (3.1)$$

- Dimensionamento da tubulação

No trecho vertical da tubulação de área constante, o cálculo da perda e carga é através da Equação (2.2.), o qual fornece a energia por unidade de peso perdida na linha de descarga, em metros, e altura manométrica pela Equação (2.7).

Para perda de carga na descarga será utilizado o método do comprimento equivalente, assim como abordado na seção 2.3.2.2, tendo as perdas de cargas normais e localizadas calculadas em termos de comprimento.

- Filtros semelhantes

Nessa etapa será realizada pesquisa bibliográfica referente aos filtros que atendem aos critérios de filtragem de impurezas e água do querosene da aviação no mercado. Onde será analisado a atual marca do filtro instalado e de demais fornecedores que atendem a norma internacional EI1596 (2006) referente ao funcionamento, a ASME VIII (2007) quanto ao cálculo estrutural e NR-13 (2019) do ministério do trabalho do Brasil.

- Configuração mais eficiente

Análise de acessórios que forneçam menor perda de carga ao longo da tubulação, podendo ser substituídos, mantendo a funcionalidade em uso. Assim como, escolha de um vaso filtrante que forneça maior eficiência entre os analisados.

4 DISCUSSÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA

O sistema analisado é referente a etapa de filtragem de combustível JET-A após o seu recebimento por caminhões tanques na ilha de descarga, onde ocorre o transporte exclusivamente do querosene da aviação, segue por gravidade até um tanque de passagem localizado no subsolo, Figura 21.

Figura 21. Tanque de passagem



Fonte: Aatoria própria

Após o combustível passar pelo tanque, segue para a etapa de bombeamento, onde a chave de nível inserida no tanque realiza o acionamento automático das 3 bombas centrífugas de 30 cv e 3 motores elétricos WEG, direcionando-o para as linhas de fluxo de combustível independentes como na Figura 23, onde são acionadas a depender do volume armazenado. A sequência de acionamento é pré-estabelecida de forma manual.

Figura 22. Descarga de produto



Fonte: Autoria própria

Figura 23. Layout das bombas



Fonte: Autoria própria

Após a passagem da bomba, o líquido se encaminha pela tubulação vertical de descarga de 3,25 m e diâmetro de 6", onde cada bomba é direcionada a uma linha de filtragem de maneira individual, e pela tubulação horizontal com presença de acessórios, até sua chegada nos filtros.

Figura 24. Layout da tubulação



Fonte: Autoria própria

A primeira etapa de filtragem é através do filtro micrônico presente em cada linha de bombeamento, o qual retém impurezas de $1/2 \text{ micra}$ através de 4 elementos filtrantes e possui vazão máxima de $136,3 \text{ [m}^3/\text{h]}$, imposta pelo fabricante.

Figura 25. Filtro micrônico



Fonte: Autoria própria

A segunda etapa é a filtragem pelo filtro separador coalescente, onde possibilita a retenção de água através de 3 elementos filtrantes e de impurezas por 5 elementos. Sua vazão máxima permitida é de $135,1 \text{ [m}^3/\text{h]}$, estabelecida pelo fabricante.

Figura 26 Filtro separador coalescentes



Fonte: Autoria própria

4.2 DIMENSIONAMENTO DA TUBULAÇÃO

A tubulação vertical de 6" está ligada à saída da bomba e à conexão joelho que conecta a tubulação horizontal, onde o procedimento utilizado foi a soldagem com mesmo material e diâmetro da tubulação.

Como as três linhas possuem características semelhantes, será analisada a linha 1C por não estar em manutenção no período da coleta de dados em campo. A vazão máxima obtida a partir de análise de 3 meses de coleta de dados diárias no acompanhamento do ENRAF, como explanado na seção 3.1, é de 121,7 [m^3/h], onde varia de acordo com a quantidade de caminhões que estão descarregando no momento. Assim, os dados coletados estão na situação de vazão máxima utilizando apenas uma linha de filtragem.

4.2.1.1 Altura manométrica de descarga (H_d)

A altura manométrica de descarga será calculada de acordo com a Equação (2.7):

$$H_d = Z_d + \frac{P_d}{\gamma} - h_{fd}$$

Dessa forma, sabendo que a altura geométrica entre o início da tubulação e o flange de sucção da bomba é 0,65 m, tem-se:

$$Z_d = h_{tub} - x \quad (4.1)$$

$$Z_d = 3,90 - 0,65 = 3,25 \text{ m}$$

4.2.1.2 Comprimento equivalente (L_d)

Será utilizado o método do comprimento equivalente. Assim, as perdas de cargas distribuídas e localizadas são calculadas em termos de comprimento. Na tabela 05 tem-se as características dos trechos retos e acessórios presentes na tubulação.

Tabela 5. Comprimento equivalente total

Acessórios	Quantidade	$L_{eq}(m)$	$L_{eq\ total}(m)$	Observações
Curva 90° 6"	1	2,59	2,59	R=5D
Válvula esfera 6"	1	3,05	3,05	Totalmente aberta
Válvula de gaveta 6"	2	1,98	3,96	Totalmente aberta
Válvula de retenção 6"	1	19,82	19,82	Portinhola
Trecho reto 6"	5,24	1	5,24	
Total			34,66	

Fonte: Autoria própria

4.2.1.3 Velocidade de descarga (V_d)

Utilizando a vazão média Q de $121,7 [m^3/h]$, obtemos a velocidade de descarga V_d , onde converte-se Q para $0,0338 m^3/s$ e 6" para 0,1524 metros:

$$V_d = \frac{4 \times Q}{\pi \times D^2} \quad (4.2)$$

$$V_d = \frac{4 \times 0,0338}{\pi \times 0,1524^2}$$

$$V_d = 1,8529 \text{ m/s}$$

Segundo a API 2003 (1998) velocidade máxima permitida nas tubulações para o fluxo de combustíveis com elevada condutividade, (JET A possui condutividade mínima de $70pS/m$), é de $7m/s$, sendo a velocidade calculada aceitável. Isso é devido a esse combustível necessitar de controlar a geração de eletricidade estática.

4.2.1.4 Número de Reynolds (R_e)

Para o cálculo do número de Reynolds utiliza-se o diâmetro da tubulação D_d , a velocidade calculada V_d e a viscosidade cinemática ν :

$$R_e = \frac{(D_d \times V_d)}{\nu} \quad (4.3)$$

$$R_e = \frac{0,1524 \times 1,8529}{0,000002}$$

$$R_e = 1,4119 \times 10^5$$

Por o número de Reynolds ser maior que 2300, tem-se um escoamento turbulento.

4.2.1.5 Coeficiente de atrito (f_d)

O cálculo do coeficiente de atrito f_d depende do número de Reynolds e da rugosidade relativa da tubulação ϵ :

$$f_d = f_d \left(R_e, \frac{\epsilon}{D_D} \right) \quad (4.4)$$

Tem-se que a tubulação possui 6" e material de aço carbono comercial, utiliza-se a figura 5:

$$\left(\frac{\epsilon}{D} \right)_{aço, 6''} = 0,0003 \quad (4.5)$$

Para encontrar o coeficiente de atrito utiliza-se o Ábaco de Moody, Figura 6, baseado na rugosidade relativa e número de Reynolds $1,4119 \times 10^5$:

$$f_d = 0,0155$$

4.2.1.6 Perda de carga (h_l)

Assim, tendo os valores já calculados, a perda de carga, energia por unidade de peso perdida na linha de descarga, pode ser determinada pela seguinte equação:

$$h_l = f_d \frac{L}{D_d} \frac{V_d^2}{2g} \quad (4.6)$$

$$h_l = 0,0155 \times \frac{34,66}{0,1524} \times \frac{1,8529^2}{2 \times 9,81}$$

$$h_l = 0,6169 \text{ m}$$

A altura manométrica é obtida através da altura estática e perda de carga:

$$H_d = Z_d + \frac{P_d}{\gamma} - h_{fd} \quad (4.7)$$

Onde a pressão da linha foi obtida pela leitura do manômetro em campo de

36 *psi* convertendo em N/m^2 , assim como exposto na seção 3.1:

$$H_d = 3,25 + \frac{248211}{8207,05} - 0,6169$$

$$H_d = 32,8767 \text{ m}$$

4.3 DIMENSIONAMENTO DA FILTRAGEM

4.3.1 Filtro micrônico

Para o filtro micrônico da Figura 27, retentor de impurezas micrônicas, foi considerada a maior queda de pressão obtida, exposta na planilha da Figura 20, nos últimos 3 meses.

Figura 27. Filtro micrônico



Fonte: Autoria própria

O resultado obtido de máximo diferencial de pressão, utilizando o manômetro como na figura 20:

$$\Delta P_{micr\acute{o}nico} = 13 \text{ psi}$$

Para determinação da perda de carga no filtro tem-se a Equação (4.8) com a fórmula de Darcy-Weisbach, utilizando o diferencial de pressão em N/m^2 e peso específico da tabela 4:

$$h_{micr\acute{o}nico} = \frac{\Delta P}{\gamma} \tag{4.8}$$

$$h_{micr\acute{o}nico} = \frac{89631,80}{8207,05} \text{ m}$$

$$h_{micr\acute{o}nico} = 10,9213 \text{ m}$$

4.3.2 Filtro separador coalescente

De forma similar à perda de carga do filtro micrônico, o cálculo do separador coalescente da Figura 28, retentor de água e impurezas, é obtido por análise dos 3 últimos meses com vazão $121,7 \text{ m}^3/\text{h}$ e $\Delta P = 4 \text{ psi}$.

Figura 28. Filtro separador coalescente



Fonte: Autoria própria

Para determinação da perda de carga com a fórmula de Darcy-Weisbach, utilizando o diferencial de pressão em N/m^2 e peso específico da Tabela 4:

$$h_{\text{coalescedor}} = \frac{\Delta P}{\gamma} \quad (4.9)$$

$$h_{\text{coalescedor}} = \frac{27579,00}{8207,05} \text{ m}$$

$$h_{\text{coalescedor}} = 3,3604 \text{ m}$$

4.4 ESCOLHA DOS EQUIPAMENTOS

Em prol de maior eficiência no processo, é necessário analisar a perda de carga dos equipamentos presentes no *layout*, em busca de possíveis substituições dos componentes.

No layout atual têm-se uso da válvula de retenção com portinhola, analisando o comprimento equivalente da válvula de retenção por levantamento, Tabela 02, visualiza-se que a troca não é eficiente, pois para 6" a válvula por levantamento tem o comprimento equivalente maior, sendo 22,87 m.

A substituição da válvula esfera pela borboleta não se justifica pela eficiência, isso devido a esfera ter o comprimento equivalente de 3,05 m comparada a borboleta 7,01 m.

Para otimizar o processo, pode-se substituir a válvula esfera por gaveta de abertura total com o comprimento equivalente 1,98 m., onde ambas são válvulas de bloqueio com função similar. A gaveta tem um fechamento lento, controlando o efeito do golpe de aríete.

Obtendo assim o comprimento equivalente da tubulação de 33,59 m e perda de carga $h_l = 0,6168$ m.

Tabela 6. Comprimento equivalente total

Acessórios	Quantidade	$L_{eq}(m)$	$L_{eq\ total}(m)$	Observações
Curva 90° 6"	1	2,59	2,59	R=5D
Válvula esfera 6"	0	3,05	0	Totalmente aberta
Válvula de gaveta 6"	3	1,98	5,94	Totalmente aberta
Válvula de retenção 6"	1	19,82	19,82	Portinhola
Trecho reto 6"	5,24	1	5,24	
Total			33,59	

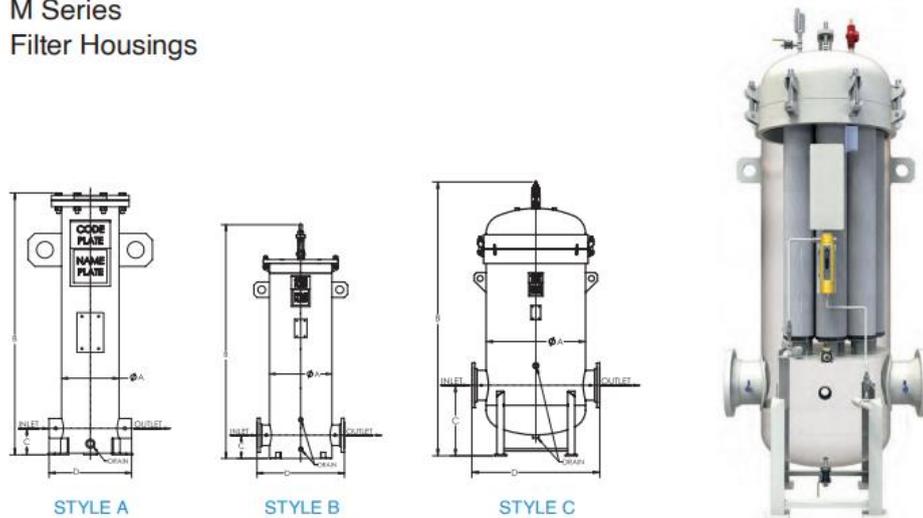
Fonte: Autoria própria

Analisando os filtros presentes na instalação, uma forma de diminuir o custo é analisando a quantidade de elementos filtrantes utilizados, pois a troca do vaso demanda um alto investimento. Foi verificada a ficha técnica do vaso filtrante micrônico e separador coalescente.

Analisando o vaso micrônico pelo fornecedor FACET, Figura 29, o número de 04 elementos filtrantes é compatível com a vazão atual de 2028 LPM.

Figura 29. Ficha filtro micrônico

M Series
Filter Housings



DATA

MODEL NUMBER	MAXIMUM FLOW RATE ⁽¹⁾		CONNECTIONS						ANCHOR BOLT PLAN				WEIGHT WITH CARTRIDGES		
			INLET/OUTLET		SIDE DRAIN		BOTTOM DRAIN		BOLT HOLE DIAMETER		BOLT CIRCLE				NO. OF BOLT HOLES
	gpm	lpm	in	mm	in	mm	in	mm	mm	in	mm	in		lbs	
1M-114	66	250	2	51	N/A	N/A	3/4	19	7/8	22	11 1/4	295	3	110	50
1M-214	133	503	2	51	N/A	N/A	3/4	19	7/8	22	11 1/4	295	3	140	64
1M-314	200	757	2	51	N/A	N/A	3/4	19	7/8	22	11 1/4	295	3	160	73
2M-314	400	1514	4	102	3/4	19	3/4	19	7/8	22	17	432	4	450	204
3M-314	600	2271	4	102	3/4	19	3/4	19	7/8	22	19	483	4	525	238
4M-314	800	3028	6	152	3/4	19	3/4	19	7/8	22	21	533	4	650	295

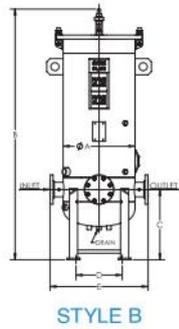
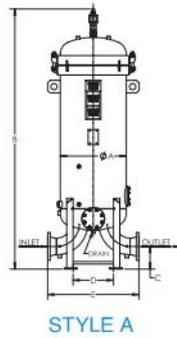
Fonte: FILMACH (2023)

Por outro lado, analisando o vaso separador coalescente, obteve-se pelo fornecedor FACET, viável troca por possuir contrato de compra com a instalação, um filtro mais eficiente, onde é apenas necessário o uso de 02 elementos separadores, ao invés de 03 para vazão de 2028 LPM. Com a diminuição da perda de carga no processo de filtragem tem-se a necessidade de uma bomba centrífuga com menor potência, acarretando menor custo operacional.

Um elemento separador custa aproximadamente R\$2100,00 e tem tempo de vida útil aproximado de 03 anos pelos históricos dos utilizados na instalação.

Figura 30. Ficha filtro separador coalescente

VCS Series
Vertical Coalescer Separators for
EI 1581, 6th Edition, Category C, Type S



DATA

MODEL NUMBER ⁽¹⁾	FLOW RATE		REQUIRED CARTRIDGES				HOUSING LIQUID VOLUME		HOUSING DRY WEIGHT		HOUSING TYPE
	AVIATION FUEL EI 1581, CAT. C, TYPE S		COALESCER		SEPARATOR		gal	ltr	lbs	kgs	
	gpm	lpm	qty	Model	qty	Model					
VCS-222-116	109	413	2	CAA22-5SB	1	SS616FB-5	35	132	525	238	Style B - Flat
VCS-328-218	222	840	3	CAA28-5SB	2	SS618FB-5	65	246	750	340	Style B - Flat
VCS-433-224	333	1261	4	CAA33-5SB	2	SS624FB-5	90	341	900	408	Style B - Flat
VCS-543-243	609	2305	5	CAA43-5SB	2	SS643FB-5	165	625	1200	544	Style A - Dished
VCS-556-340	782	2960	5	CAA56-5SB	3	SS640FB-5	180	681	1225	556	Style A - Dished

Fonte: FILMACH (2023)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse trabalho foi apresentada a análise de carga de uma linha de filtragem de combustível da aviação JET A, analisando o *layout* da tubulação e vasos filtrantes micrônicos e separadores coalescentes, e também da análise da qualidade do produto. Verifica-se uma escassez de literatura teórica através de bibliografias brasileiras, apesar desse processo ser algo presente em todo aeroporto brasileiro, pois o *Joint Inspection Group* (JIG) estabelece a etapa de filtragem como parte do processo de armazenamento e distribuição.

À priori foi calculada a perda de carga da tubulação $h_l = 0,6168 m$ e vasos filtrantes $h_{micr\acute{o}nico} = 10,9213$ e $h_{coalescedor} = 3,3604 m$ através da equação de Darcy-Weisbach no sistema atual, onde a operação possui três linhas de filtrações idênticas e válvulas percorrendo o sistema, essenciais no momento de inspeções e manutenções, onde há necessidade de secagem e isolamento dos vasos.

Por meios dos cálculos realizados, foi possível obter a perda de carga da tubulação e sugerir melhorias, sendo o objetivo principal desse estudo. As válvulas presentes na tubulação têm características de manter o fluxo em um único sentido e estanqueidade. Sendo assim, após obter a perda de carga total do sistema, verificou-se oportunidade de melhoria na substituição das válvulas, onde não é satisfatório substituir a válvula de retenção, porém com a substituição da válvula esfera por gaveta obteve-se um ganho de comprimento equivalente de $1,07 m$, o qual impacta diretamente na perda de carga da tubulação.

Por fim, também foram verificadas fichas técnicas de filtros similares aos presentes na instalação, mesma funcionalidade, tanto micrônicos quanto coalescentes. Notou-se que o micrônico utilizado atualmente, com 4 elementos filtrantes, está adequado para vazão atual fornecida, pois os de outros fabricantes necessitam de mais elementos, assim aumentando o custo anual de manutenção, são mais robustos. Por outro lado, encontrou-se um filtro separador coalescente do mesmo fabricante atual, facilitando a troca em questão de custo, o qual necessita de uma quantidade menor de elementos separadores para a vazão atual, viabilizando a troca que acarretará em menor perda de carga e redução de custo de manutenção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

API 2003 - AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 1998. Disponível em: <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/002/api.2003.1998.pdf>. Acesso em 25 set. 2022.

ASCA, Filtro para tubulação tipo cesta, 2022. Disponível em: <https://www.asca.com.br/produtos/filtros-para-tubulacoes/fc11/>. Acesso em 23 abr. 2022.

ASME (American Society of Mechanical Engineering), Section VIII, Division 1. Rules For Construction of Pressure Vessels, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 15216: Armazenamento de combustíveis – Controle da qualidade no armazenamento, transporte e abastecimento de combustíveis de aviação. Rio de Janeiro, 2005.

BAROLI, Gildo. Princípios de prevenção de incêndios. 2ª. ed. São Paulo, Atlas, 1975.

CARDOSO, G. G. G., FRIZZONE, J. A., REZENDE, R. Fator de atrito em tubos de polietileno de pequenos diâmetros. Acta Scientiarum Agronomy, vol. 30, Maringá, 2008.

CCEE. CONSUMO. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/dados-e-analises/consumo> . Acesso em 20 mar. 2022.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE. Biocombustíveis aeronáuticos: progressos e desafios – Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010. Disponível em: https://www.cgEE.org.br/documents/10182/734063/biocombustiveis_aeronauticos_24012011_9559.pdf. Acesso em 18 abr. 2022.

CUNHA, M. E. Caracterização de biodiesel produzido com misturas binárias de sebo

bovino, óleo de frango e óleo de soja. 2008. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Química. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRS, Porto Alegre, 2008.

EL 1596 - Design and construction of aviation fuel filter vessels, EL specification 1596, 1ª ed, 2006, disponível em: <https://infostore.saiglobal.com/en-us/>. Acesso em 17 set. 2022.

FILMACH. Produtos de Aviação: Vasos e filtros, 2022. Disponível em: <https://www.filmach.com/aviacao#vasos-e-filtros>. Acesso em 22 abr. 2023.

FOX, R.W., McDonald, A.T. and Pritchard, P.J.; Introdução à Mecânica dos Fluidos, 6ª ed. LTC, 2004.

IATA. A importância do transporte aéreo para o Brasil, 2017. Disponível em: <https://www.iata.org/contentassets/bc041f5b6b96476a80db109f220f8904/brazil-o-valor-do-transporte-aereo.pdf>. Acesso em 22 mar. 2022.

MACINTYRE, A. JOSEPH. Bombas e Instalações de Bombeamento. 2ª ed. Rio de Janeiro, SA, 1987.

MINISTÉRIO DA DEFESA. Força Aérea Brasileira. Segundo Serviço Regional de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (SERIPA II). Boletim Informativo de Prevenção de Acidentes Aeronáuticos da Região Nordeste. 9. ed. 2013. Disponível em: <https://www2.fab.mil.br/seripa2/images/previne/Previne-n-09---Cuidado-com-o-combustvel.pdf>. Acesso em 23 mar. 2022.

MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA. Rede de Aeroportos. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transporte-aereo/rede-de-aeroportos>. Acesso em 22 mar. 2022.

MORAES, M. S. A. Biodiesel de sebo: avaliação das propriedades e testes de consumo em motor a diesel. 2008. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Química. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRS, Porto

Alegre, 2008.

NR-13 – Caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de armazenamento, Portaria SEPRT n.º 915, 2019, disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-13.pdf>. Acesso em 20 abr. 2022.

NR-20 – Segurança e Saúde no Trabalho com Inflamáveis e Combustíveis, Portaria MTP n.º 806, 2022, disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-20-atualizada-2022.pdf>. Acesso em 22 jun. 2023.

PARKER., Vessels and housings for fuel filtration, 2022. Disponível em: <https://promo.parker.com/promotionsite/parker-velcon/us/en/vessels-and-housings>. Acesso em 12 mai. 2023.

PETROBRAS. Querosene da Aviação – Informações Técnicas, 2021. Disponível em: <https://petrobras.com.br/data/files/9A/47/97/3E/104ED7105FC7BCD7E9E99EA8/Manual%20de%20Querosene%20de%20Aviacao%202021.pdf>. Acesso em 11 abr. 2022.

PLAMEX. Como funciona a filtração do combustível para aviação, 2020. Disponível em: <http://www.plamex.com.br/blog/detalhes/como-funciona-a-filtragem-do-combustivel-para-aviacao>. Acesso em 30 mar. 2022.

PP-2BR-00301-R, Filtração de combustíveis de aviação, 2018. Disponível em: <https://docero.com.br/doc/s85cxcn>. Acesso em 12 abr. 2022.

Roger, G. Filtros das aeronaves uma questão de segurança, 2012. Disponível em: <https://www.meiofiltrante.com.br/Artigo/624/filtros-das-aeronaves-uma-questao-de-seguranca>. Acesso em 21 abr. 2022.

TELLES, Pedro Carlos da Silva; Tubulações industriais: materiais, projeto e desenho, 9ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 1997.

TROX. TROX energy- saving filters. TROX, 2019. Disponível em: https://www.contimetra.com/Conteudos_F/AC/folhetos/trox/filtros/energy_saving_filters.pdf. Acesso em 18 de mar. 2023.

WHITE, F. M; Mecânica dos fluidos. 7ª ed, Rio de Janeiro, 2009.

ANEXOS

ANEXO A – Informações do JET A FISPQ – Disponibilizado pela empresa

Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico - FISPQ



De acordo com NBR 14725:2019/ASTM D1655 e a RANP nº 856/21

Jet –A					
No InfoSafe	ACMBP BR/pt-br/C	Versão Nº 1.0	Data de Elaboração	21/12/2021	Status EMITIDO

Controle da Exposição Ambiental

Diretrizes locais com relação à emissão limite para substâncias voláteis devem ser observadas para a descarga de ar de exaustão contendo vapor.

Medida de controle de engenharia:

Promova ventilação combinada com exaustão local, especialmente quando ocorrer formação de vapores/névoas do produto. É recomendado tomar disponíveis chuveiros de emergência e lava olhos na área de trabalho.

Perigos térmicos:

Não apresenta perigos térmicos.

9 - PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS**Aspecto**

Líquido claro e puro.

Odor

Hidrocarboneto

pH

Dado não disponível

Ponto de Ebulição Inicial e faixa de Temperatura de Ebulição

150 – 300°C / 302 – 572 °F

Ponto de Congelamento

< -40 °C / < -40°F

Ponto de Fulgor

>38 °C / > 100 °F

Limites de Explosividade

1– 6% (V)

Temperatura de Auto -ignição

>220 °C / >428 °F

Pressão de Vapor

< 1hPa a 20 °C / 68 °F

Gravidade Específica

Dado não disponível

Densidade

771 – 837 kg/m³ a 20°C / 79 °F

Solubilidade em Água

Negligenciável

Solubilidade em outros Solventes

Dado não disponível

Coefficiente de Partição Água/Octanol (log Pow)

2 - 6

Viscosidade Cinemática

1 – 2 mm²/s a 40 °C / 104 °F