

MODELAGEM MATEMÁTICA E DIMENSIONAMENTO DE VÁLVULA ROTATIVA APLICADA AO TRANSPORTE PNEUMÁTICO DE SÓLIDOS

MATHEMATICAL MODELING AND DESIGN OF A ROTARY VALVE APPLIED
TO PNEUMATIC CONVEYING OF SOLIDS

Engenharias • 22/09/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/790014437](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/790014437)

Josiel Neres Vinhote¹

Siomara Dias da Rocha²

RESUMO

O transporte pneumático de sólidos é amplamente utilizado em diversos setores industriais devido à sua flexibilidade operacional, segurança e facilidade de automação. Nesse contexto, as válvulas rotativas desempenham papel fundamental no controle da alimentação de partículas sólidas em sistemas pressurizados, atuando simultaneamente como dispositivos de dosagem e vedação dinâmica. Este trabalho tem como objetivo realizar a modelagem matemática e o dimensionamento mecânico de uma válvula rotativa aplicada a sistemas de transporte pneumático de sólidos. A metodologia empregada baseou-se em revisão bibliográfica, definição de parâmetros geométricos do equipamento, modelagem matemática dos fenômenos envolvidos e simulação computacional para análise de desempenho. Foram analisadas variáveis como pressão diferencial, rotação do rotor e variação da folga entre rotor e carcaça, avaliando-se seus impactos no vazamento de ar, no torque resistente e na potência requerida para operação do sistema. Os resultados obtidos indicam que pequenas variações na folga mecânica podem provocar aumentos significativos no vazamento e redução da eficiência volumétrica da válvula. Além disso, verificou-se que o torque requerido cresce proporcionalmente com o aumento da pressão diferencial, exigindo adequada seleção do sistema de acionamento. A análise demonstrou que o controle dimensional do conjunto e a correta seleção do motoredutor são fatores determinantes para garantir eficiência operacional, estabilidade do transporte pneumático e redução do consumo energético do sistema.

Palavras-chave: Transporte pneumático; Válvula rotativa; Modelagem matemática; Eficiência volumétrica; Sistemas industriais.

ABSTRACT

Pneumatic conveying of solids is widely used across various industrial sectors due to its operational flexibility, safety, and ease of automation. In this context, rotary valves play a fundamental role in controlling the feed of solid particles into pressurized systems, acting simultaneously as metering devices and dynamic seals. This study aims to perform the mathematical modeling and mechanical sizing of a rotary valve for use in pneumatic solids conveying systems. The methodology employed was based on a literature review, the definition of the equipment's geometric parameters, mathematical modeling of the underlying phenomena, and computational simulation for performance analysis. Variables such as differential pressure, rotor speed, and the clearance between the rotor and the housing were analyzed to evaluate their impact on air leakage, resistive torque, and the power required for system operation. The results indicate that small variations in mechanical clearance can lead to significant increases in leakage and a reduction in the valve's volumetric efficiency. Furthermore, it was found that the required torque increases in proportion to the differential pressure, necessitating the proper selection of the drive system. The analysis demonstrated that dimensional control of the assembly and the correct selection of the gear motor are decisive factors in ensuring operational efficiency, stability in pneumatic conveying, and reduced system energy consumption.

Keywords: Pneumatic conveying; Rotary valve; Mathematical modeling; Volumetric efficiency; Industrial systems.

1. INTRODUÇÃO

O transporte de materiais particulados constitui uma etapa fundamental em diversos processos industriais, especialmente nos

setores alimentício, químico, farmacêutico, cimenteiro e de mineração. Entre as tecnologias utilizadas para essa finalidade, o transporte pneumático de sólidos destaca-se pela sua elevada eficiência operacional, pela possibilidade de automação do processo e pela redução de contaminação do material transportado. Esse tipo de sistema baseia-se no deslocamento de partículas sólidas por meio de um fluido gasoso, normalmente ar, através de tubulações fechadas, formando um escoamento bifásico gás-sólido que permite o transporte contínuo de materiais granulares ou pulverulentos (RHODES, 2008).

Nos sistemas de transporte pneumático, diversos componentes desempenham funções essenciais para garantir o desempenho adequado do processo. Entre esses elementos, os dispositivos de alimentação são responsáveis por controlar a introdução do material sólido na linha de transporte pressurizada.

Nesse contexto, as válvulas rotativas, também conhecidas como válvula rotativa (*rotary valves*), são amplamente utilizadas devido à sua capacidade de realizar dosagem volumétrica contínua ao mesmo tempo em que promovem a vedação entre regiões com diferentes níveis de pressão (KLINZING et al., 2010). Esse tipo de equipamento possui um rotor com compartimentos que gira no interior de uma carcaça, permitindo a transferência controlada de partículas sólidas do reservatório para a linha de transporte.

Apesar de sua ampla utilização industrial, o desempenho das válvulas rotativas depende diretamente de diversos fatores de projeto, como a geometria do rotor, o número de câmaras, as tolerâncias dimensionais, a diferença de pressão entre entrada e saída e as características físicas do material transportado. Pequenas

variações nas folgas entre o rotor e a carcaça podem provocar vazamentos de ar, comprometendo a eficiência volumétrica do sistema e aumentando o consumo energético do processo. Dessa forma, o dimensionamento inadequado desses equipamentos pode resultar em instabilidade no transporte pneumático, perda de eficiência operacional e aumento de custos de manutenção.

Diante desse cenário, se faz necessário desenvolver estudos que permitam compreender de maneira mais aprofundada a influência dos parâmetros geométricos e operacionais no desempenho das válvulas rotativas utilizadas em sistemas de transporte pneumático. A modelagem matemática associada à simulação computacional tem se mostrado uma ferramenta importante nesse contexto, pois permite analisar o comportamento do sistema sob diferentes condições de operação, reduzindo custos experimentais e auxiliando no processo de projeto de equipamentos industriais.

Nesse contexto, surge o seguinte problema de pesquisa: de que forma as variáveis geométricas e operacionais, especialmente a folga entre rotor e carcaça, influenciam o vazamento de ar, o torque resistente e a eficiência volumétrica de válvulas rotativas utilizadas em sistemas de transporte pneumático de sólidos? A investigação desse problema possui relevância tanto do ponto de vista científico quanto industrial, uma vez que contribui para o aprimoramento do dimensionamento desses equipamentos e para o aumento da eficiência energética dos sistemas de transporte pneumático.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo realizar a modelagem matemática e o dimensionamento mecânico de uma válvula rotativa aplicada ao transporte pneumático de sólidos, analisando a influência de parâmetros operacionais e construtivos

no desempenho do equipamento. Busca-se, ainda, avaliar o impacto da variação da folga entre rotor e carcaça sobre o vazamento de ar, o torque necessário para acionamento e a eficiência volumétrica do sistema, utilizando ferramentas de simulação computacional como apoio à análise do comportamento do equipamento em diferentes condições operacionais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA OU REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Transporte Pneumático de Sólidos

O transporte pneumático de sólidos consiste no deslocamento de partículas granulares ou pulverulentas por meio de um fluido gasoso, geralmente ar, através de tubulações fechadas. A energia necessária para o deslocamento das partículas é fornecida pelo fluido transportador, que deve possuir velocidade suficiente para vencer o peso das partículas, as forças de atrito com a tubulação e as perdas de carga ao longo do sistema.

Conforme descrito em Mills (2016), os sistemas de transporte pneumático podem ser classificados principalmente em:

- Fase diluída (*dilute phase*): caracterizada por altas velocidades do gás e baixa concentração de sólidos, com partículas suspensas individualmente no escoamento.
- Fase densa (*dense phase*): caracterizada por menores velocidades do gás e elevada concentração de sólidos, podendo ocorrer escoamento em regime de pistão, plug ou leito móvel.

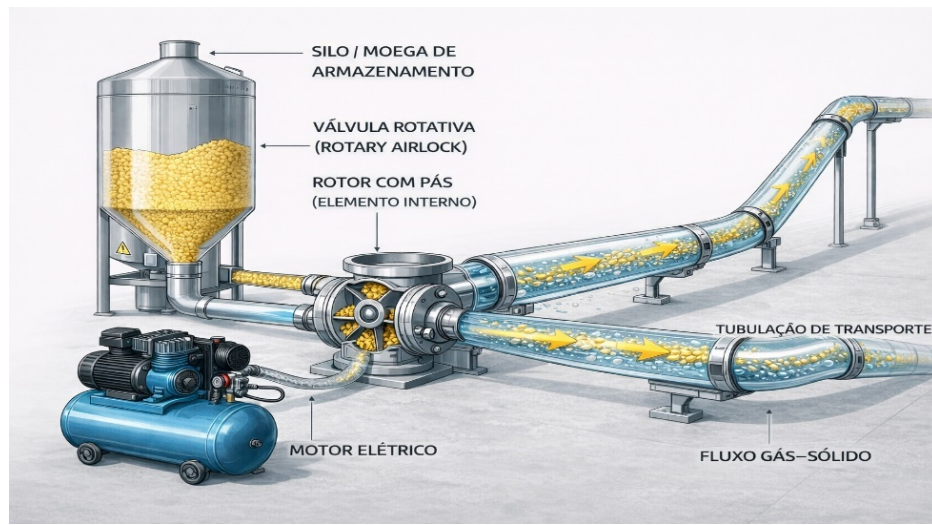
A seleção do regime de operação depende de variáveis como:

- Densidade aparente e granulometria do material;
- Vazão mássica requerida;
- Distância e geometria da linha de transporte;
- Limitações de abrasão e degradação das partículas;
- Consumo energético admissível.

Sob a ótica do dimensionamento, um dos elementos críticos do sistema é o dispositivo de alimentação. Esse componente deve introduzir o sólido na linha pressurizada de forma contínua, controlada e estável, evitando variações bruscas de vazão e minimizando perdas de pressão.

Nesse contexto, a válvula rotativa atua como um dos principais dispositivos de dosagem e vedação dinâmica. Sua função é permitir a transferência controlada de material entre regiões com diferentes níveis de pressão, garantindo o isolamento entre o reservatório de alimentação (tipicamente à pressão atmosférica) e a linha de transporte pressurizada. O desempenho global do sistema depende diretamente da eficiência desse mecanismo, uma vez que falhas no controle de vazão ou excesso de vazamento de ar podem comprometer a estabilidade do escoamento bifásico e aumentar o consumo energético do sistema. A Figura 1 apresenta de forma ilustrativa um modelo de aplicação da válvula rotativa em processos indústrias.

Figura 1. Sistema de transporte pneumático com válvula rotativa (Rotary Airlock).



Fonte: Autoria própria, 2026.

2.2. Válvulas Rotativas Como Dispositivos de Alimentação

A válvula rotativa, também denominada *Rotary Airlock Valve*, é um equipamento mecânico composto por um rotor com compartimentos (alvéolos) que gira no interior de uma carcaça, promovendo dosagem volumétrica contínua. Segundo *Powder Technology 2023*, a eficiência do sistema depende diretamente:

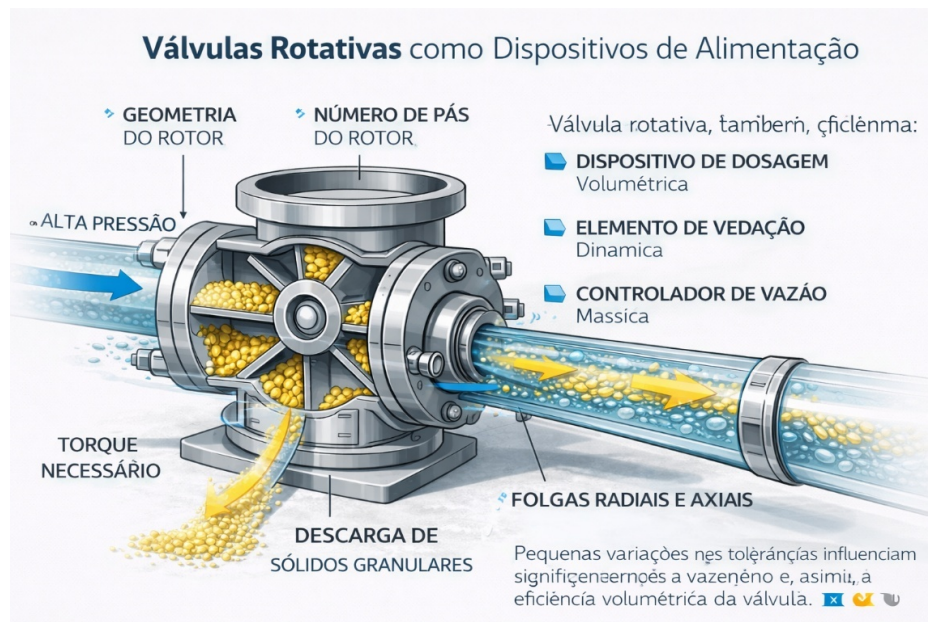
- Da geometria do rotor
- Do número de pás
- Das folgas radiais e axiais
- Da diferença de pressão entre entrada e saída

O equipamento atua simultaneamente como:

- Dispositivo de dosagem
- Elemento de vedação dinâmica
- Controlador de vazão mássica

A literatura aponta que pequenas variações nas tolerâncias mecânicas influenciam significativamente o vazamento de ar e, consequentemente, a eficiência volumétrica do sistema. A Figura 2 demonstra em detalhe o princípio de funcionamento.

Figura 2. Válvulas rotativas como dispositivos de alimentação



Fonte: Autoria própria, 2026.

2.3. Dimensionamento de Vazão

O dimensionamento da vazão em válvulas rotativas é tradicionalmente baseado no volume geométrico dos compartimentos e na rotação do eixo.

A vazão volumétrica teórica pode ser expressa na Equação 1, a seguir:

$$Q_t = V_c \cdot n \cdot RPM \text{ (Equação 1)}$$

Onde:

- V_c = volume de uma câmara

- n = número de câmaras
- RPM = rotações por minuto

Entretanto, conforme discutido, o enchimento raramente é total, sendo necessário aplicar um fator de eficiência volumétrica.

A vazão real depende:

- Da densidade aparente do sólido
- Do fator de enchimento
- Do vazamento de ar pelas folgas

Assim, o dimensionamento exige correção do modelo ideal para representar condições reais de operação.

2.4. Modelagem Matemática do Vazamento

Um dos principais desafios no projeto de válvulas rotativas é o vazamento de ar através das folgas entre rotor e carcaça. Esse fenômeno compromete:

- A estabilidade do transporte
- O consumo energético
- A eficiência global do sistema

O vazamento pode ser modelado com base em equações de escoamento compressível através de orifícios, considerando:

- Área efetiva da folga
- Diferença de pressão
- Densidade do ar

Modelos simplificados utilizam, conforme a Equação 2, a seguir:

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \text{ (Equação 2)}$$

$Q \rightarrow$ Vazão volumétrica (m^3/s)

$C_d \rightarrow$ Coeficiente de descarga (adimensional)

$A \rightarrow$ Área do orifício ou folga (m^2)

$\Delta P \rightarrow$ Diferença de pressão entre montante e jusante (Pa)

$\rho \rightarrow$ Densidade do fluido (kg/m^3)

A incorporação desse termo ao modelo matemático permite estimar a eficiência volumétrica real da válvula.

2.5. Dimensionamento Mecânico da Válvula Rotativa

O dimensionamento mecânico tem como objetivo garantir que a estrutura e o sistema de acionamento suportem os esforços provenientes da diferença de pressão e do carregamento de material particulado.

Os principais parâmetros de projeto são:

- Torque resistente no eixo

- Potência do motor
- Tensões atuantes no eixo
- Seleção de materiais
- Fator de segurança estrutural

O projeto deve considerar simultaneamente cargas mecânicas e o diferencial de pressão operacional.

2.5.1. Cálculo do Torque Necessário

O torque requerido no eixo é resultante de:

- Diferença de pressão
- Peso do material nas câmaras
- Atrito (material, carcaça e mancais).

Torque devido à pressão, conforme Equação 3, a seguir:

$$T_p = \Delta P \cdot A \cdot r \text{ (Equação 3)}$$

- ΔP = diferença de pressão (Pa)
- A = área projetada exposta à pressão (m²)
- r = raio médio do rotor (m)

Torque devido ao peso do material, conforme Equação 4, a seguir:

$$T_g = m_s \cdot g \cdot r \text{ (Equação 4)}$$

Onde:

- m_s = massa de material na câmara (kg)
- $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- r = raio do centro de massa

Torque devido ao atrito, conforme Equação 5, a seguir:

$$T_f = \mu \cdot N \cdot r_f \text{ (Equação 5)}$$

Onde:

- μ = coeficiente de atrito
- N = força normal
- r_f = raio efetivo de contato

Torque total de projeto, conforme Equação 6, a seguir:

$$T_{total} = T_p + T_g + T_f \text{ (Equação 6)}$$

Aplicando fator de segurança, Equação 7:

$$T_{projetado} = T_{total} \cdot FS \text{ (Equação 7)}$$

Onde normalmente:

$$1,5 \leq FS \leq 3$$

2.5.2. Potência do Motor

A potência mecânica necessária conforme Equação 8, a seguir:

$$P = \frac{T \cdot \omega}{\eta} \text{ (Equação 8)}$$

Onde:

- T = torque (N·m)
- ω = velocidade angular (rad/s)
- η = rendimento do sistema

Conversão para RPM na Equação 9, a seguir:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot RPM}{60} \text{ (Equação 9)}$$

Forma prática industrial segue na Equação 10, a seguir:

$$P(KW) = \frac{T \cdot RPM}{9550 \cdot \eta} \text{ (Equação 10)}$$

Fórmula mais utilizada em dimensionamento de motores.

2.5.3. Verificação da Resistência do Eixo

O eixo deve ser verificado quanto à tensão máxima de cisalhamento devido à torção.

Tensão de torção conforme Equação 11, a seguir:

$$\tau = \frac{T \cdot c}{J} \text{ (Equação 11)}$$

Para eixo circular maciço:

$$J = \frac{\pi d^4}{32}$$

Logo:

$$\tau_{max} = \frac{16T}{\pi d^3}$$

Critério de segurança:

$$\tau_{max} < \frac{\sigma_{adm}}{FS}$$

Onde:

- σ_{adm} = tensão admissível do material

2.6. Simulação Computacional

Com o avanço da modelagem numérica, a simulação computacional tornou-se ferramenta essencial no projeto de equipamentos industriais.

Softwares como *MATLAB (Versão R2024b e R2024a / ano 2024)* e *Python (Versão 3.13.0 / ano 2024)*, (com bibliotecas *NumPy* e *SciPy*) permitem:

- Resolver sistemas de equações não lineares
- Simular variações de pressão
- Analisar influência da rotação
- Gerar curvas de eficiência

Estudos recentes publicados em *Advanced Powder Technology* destacam que a integração entre modelagem matemática e simulação computacional reduz custos experimentais e melhora a precisão do projeto. Heng, New e Wilson (2019), por exemplo, demonstraram que um modelo numérico Euleriano aplicado a um sistema industrial de transporte pneumático apresentou resultados de pressão e vazão compatíveis com dados reais. De forma semelhante, Sung et al. (2021) utilizaram simulação para avaliar a influência da distribuição granulométrica sobre a hidrodinâmica do transporte pneumático, obtendo boa concordância entre os resultados numéricos e dados experimentais.

3. METODOLOGIA

O presente estudo foi desenvolvido com abordagem aplicada e caráter exploratório, fundamentado em análise bibliográfica, documental e modelagem computacional, com foco no projeto e dimensionamento de uma válvula rotativa para aplicação em sistemas de transporte pneumático.

A pesquisa foi motivada por uma demanda técnica apresentada por empresa do setor industrial especializada em sistemas pneumáticos, a qual identificou a necessidade de desenvolvimento e otimização do equipamento conforme requisitos operacionais específicos.

Dessa forma, a metodologia adotada estruturou-se em etapas sequenciais de concepção, modelagem geométrica, definição de tolerâncias, análise dimensional e validação por meio de ferramentas computacionais.

3.1. Tipo de Pesquisa

A pesquisa caracteriza-se como:

- Aplicada, por estar voltada ao desenvolvimento de um produto técnico com aplicação industrial.
- Exploratória, devido à necessidade de levantamento e análise de fundamentos técnicos para consolidação do projeto.
- Qualitativa e quantitativa, combinando revisão técnica com modelagem matemática e análise dimensional baseada em parâmetros numéricos.

O desenvolvimento foi conduzido por meio de revisão bibliográfica, consulta documental a normas técnicas e aplicação de modelagem assistida por computador.

3.2. Procedimentos Metodológicos

O desenvolvimento do projeto foi estruturado nas seguintes etapas metodológicas:

1. Análise das predefinições e requisitos técnicos.
2. Definição da geometria e dimensões básicas do equipamento.
3. Determinação das tolerâncias dimensionais.
4. Definição e análise das tolerâncias geométricas.
5. Modelagem tridimensional e validação por simulação.

Essas etapas permitiram organizar o processo projetual de forma sistemática e técnica.

3.3. Análise das Predefinições do Projeto

O projeto foi iniciado a partir de requisitos técnicos estabelecidos em conjunto com a empresa parceira, considerando as condições operacionais e limitações construtivas do equipamento. As principais especificações definidas foram:

- Válvula com dimensão nominal de 10”;
- Diâmetro interno do corpo correspondente a 273 mm (10” SCH 10);
- Flanges de entrada e saída conforme norma ANSI B16.5;
- Folga máxima entre rotor e corpo limitada a 0,2 mm;
- Aplicação de fator de segurança mínimo de 1,2 para o sistema de acionamento;
- Velocidade periférica limitada a 400 mm/s;
- Carga linear mínima necessária para ruptura de material de 9 N/mm.

Esses parâmetros foram utilizados como restrições iniciais para o desenvolvimento geométrico e mecânico do equipamento.

3.4. Definição da Geometria e Dimensões Básicas

A válvula rotativa é composta estruturalmente por quatro componentes principais:

Corpo;

- Rotor com câmaras;
- Tampas laterais (mancais);
- Tampa de proteção do lado não acionado.

Com a definição do diâmetro interno do corpo (273 mm), o diâmetro externo do rotor foi estabelecido de acordo com a mesma dimensão nominal, sendo o número de câmaras definido com base na capacidade volumétrica desejada e na aplicação operacional.

As tampas laterais foram projetadas para atuar como suporte estrutural e alojamento dos mancais do eixo. Além disso, foi prevista a inclusão de uma tampa de proteção no lado oposto ao acionamento, garantindo segurança mecânica e proteção contra entrada de contaminantes.

A geometria preliminar foi desenvolvida em ambiente de modelagem tridimensional, permitindo análise dimensional e verificação de interferências entre componentes.

3.5. Definição das Tolerâncias Dimensionais

Considerando a criticidade da folga entre rotor e corpo, foi estabelecido pela empresa parceira que a folga máxima admissível não deve ultrapassar 0,2 mm.

Aplicando um fator de segurança de 20% sobre esse valor, adotou-se como folga de projeto o limite máximo de 0,15 mm.

Para determinação da folga final do conjunto, foi realizada a soma acumulativa das tolerâncias individuais provenientes de:

- Processo de fabricação das peças (corpo, rotor e tampas);
- Tolerâncias comerciais de componentes padronizados (rolamentos);
- Variações dimensionais decorrentes do processo de usinagem.

A análise foi estruturada por meio de planilha de cálculo, segmentada em:

- Cálculo de folgas radiais;
- Cálculo de folgas axiais.

Esse método permitiu a avaliação combinada das variações dimensionais máximas e mínimas, proporcionando maior controle sobre a precisão do conjunto montado.

3.6. Definição das Tolerâncias Geométricas

As tolerâncias geométricas foram consideradas devido à elevada exigência de precisão dimensional imposta pela pequena folga de projeto. Tais tolerâncias referem-se a desvios geométricos independentes das dimensões lineares, envolvendo:

- Planeza;
- Perpendicularidade;
- Concentricidade;
- Circularidade;

- Alinhamento de eixos.

A análise foi fundamentada nas normas técnicas:

- NBR 14646 – Tolerâncias geométricas;
- NBR 6409 – Controle geométrico de peças mecânicas.

Para avaliação do impacto das tolerâncias na montagem final, foi utilizada ferramenta computacional específica integrada ao software Autodesk Inventor, denominada *Tolerance Analysis*, permitindo a simulação da acumulação de desvios geométricos e a verificação do efeito desses desvios na folga final do sistema.

Essa abordagem possibilitou uma análise mais precisa da cadeia de tolerâncias e sua influência no desempenho funcional da válvula rotativa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados obtidos por meio da modelagem matemática, da análise dimensional e da simulação computacional aplicada ao dimensionamento da válvula rotativa de 10". Os dados foram organizados em gráficos e tabelas com o objetivo de avaliar a influência da pressão diferencial, da rotação do rotor e da folga radial sobre o comportamento operacional do equipamento.

4.1. Resultados da Simulação Numérica

A simulação computacional foi realizada considerando a variação da pressão diferencial entre 10 e 200 kPa, diferentes rotações do rotor e três condições de folga radial: 0,10 mm, 0,15 mm e 0,20 mm. Para a

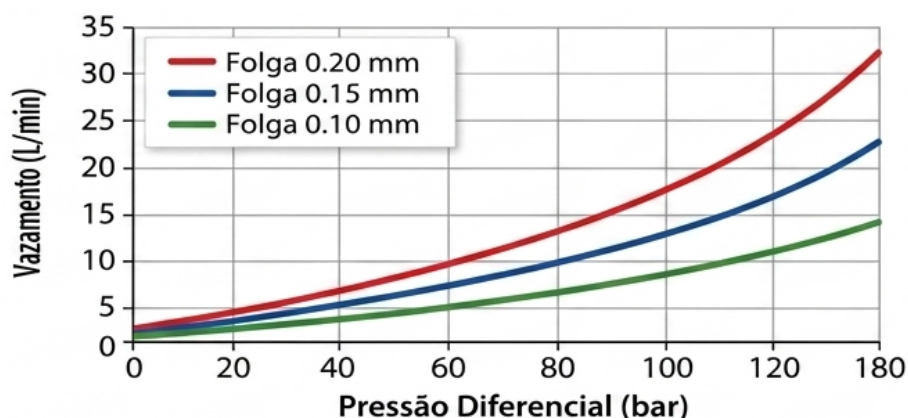
modelagem foram consideradas as propriedades do ar e um coeficiente de descarga baseado na literatura técnica.

Os principais modelos matemáticos empregados foram o cálculo do vazamento pela folga, o torque resistente devido à pressão diferencial e a potência mecânica requerida pelo sistema. A utilização desses modelos permitiu avaliar de forma integrada a influência das condições operacionais e construtivas sobre o desempenho da válvula.

4.1.1. Vazamento em Função da Pressão Diferencial e da Folga

Inicialmente, foi analisada a influência da pressão diferencial sobre o vazamento de ar através das folgas existentes entre o rotor e a carcaça. A Figura 1 apresenta as curvas de vazamento em função da pressão diferencial para as três condições de folga radial avaliadas, permitindo comparar diretamente a influência desse parâmetro geométrico no desempenho de vedação da válvula.

Figura 3. Vazamento em função da pressão para diferentes folgas.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Observa-se na Figura 1 que o vazamento aumenta com o aumento da pressão diferencial em todas as condições analisadas. Entretanto, as curvas apresentam níveis distintos de vazamento conforme a

folga radial aumenta. A condição de 0,20 mm apresentou os maiores valores de vazamento, enquanto a condição de 0,10 mm apresentou o melhor comportamento quanto à vedação.

Esse comportamento está de acordo com os resultados encontrados por Wang et al. (2021), que, por meio de simulações numéricas de uma válvula rotativa para transporte pneumático, verificaram que o vazamento médio aumenta com a pressão diferencial e apresenta forte crescimento em função da folga na extremidade das pás do rotor. Os autores observaram ainda que o vazamento médio apresentou tendência aproximadamente exponencial em relação ao aumento da folga.

A tendência observada no presente estudo também é consistente com o modelo analítico desenvolvido por Rogers et al. (2000), segundo o qual o vazamento através de uma válvula rotativa pode ser estimado considerando as regiões de restrição existentes entre as pás do rotor e a carcaça. O estudo demonstra que a diferença de pressão e as características geométricas das restrições são parâmetros fundamentais para a determinação do vazamento.

Dessa forma, os resultados demonstram que a folga radial constitui um dos principais parâmetros de projeto da válvula rotativa. O aumento da folga, mesmo quando dimensionalmente pequeno, amplia a passagem disponível para o escoamento reverso e, conseqüentemente, reduz a capacidade de vedação do equipamento. Esse efeito torna o controle dimensional durante a fabricação e a manutenção particularmente importante.

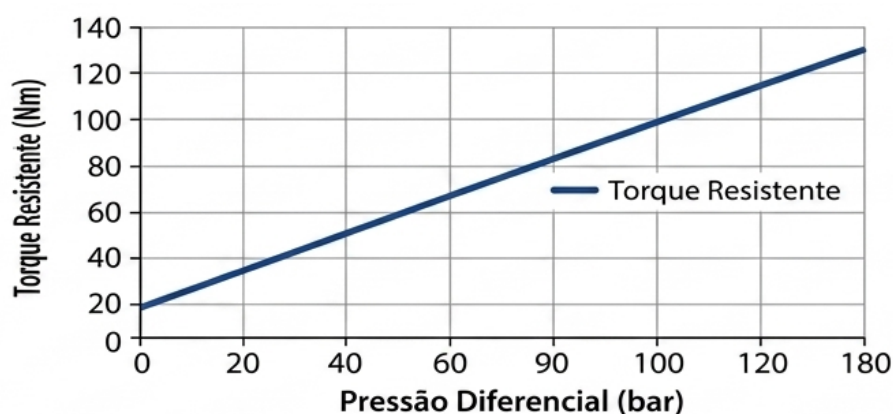
Além disso, o aumento do vazamento em pressões diferenciais mais elevadas evidencia que a operação da válvula em condições de

maior pressão exige maior rigor no controle das tolerâncias geométricas. Estudos experimentais sobre válvulas rotativas também demonstram que a redução da folga e o aumento da precisão dimensional podem reduzir a quantidade de vazamento durante a operação (MINOWA; NISHIMURA; OHYAMA, 1990).

4.1.2. Torque Resistente em Função da Pressão Diferencial

Após a avaliação do vazamento, foi analisado o torque resistente necessário para movimentar o rotor sob diferentes condições de pressão. A Figura 2 apresenta a relação entre o torque resistente e a pressão diferencial aplicada à válvula, permitindo avaliar a capacidade de acionamento necessária em função da condição operacional.

Figura 4. Torque resistente em função da pressão diferencial.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Conforme apresentado na Figura 2, o torque resistente aumenta aproximadamente de forma linear com a pressão diferencial. Esse comportamento é coerente com o modelo matemático adotado, no qual o torque devido à pressão é proporcional à diferença de pressão, à área efetiva submetida ao carregamento e ao braço de alavanca.

O resultado possui implicação direta no dimensionamento do sistema de acionamento. À medida que a pressão diferencial aumenta, maior torque deve ser fornecido pelo motoredutor para garantir a rotação do rotor. Assim, o dimensionamento do acionamento deve considerar não somente a condição nominal de funcionamento, mas também a condição de maior pressão prevista no projeto.

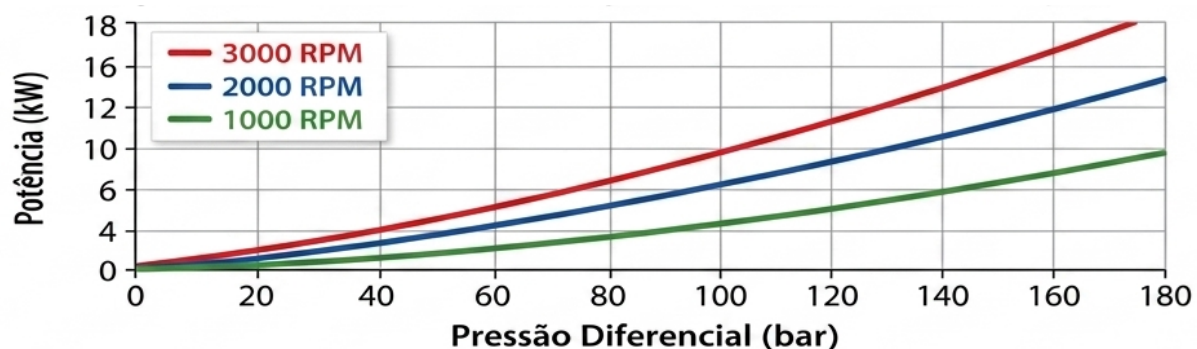
Esse aspecto é particularmente importante em válvulas rotativas utilizadas como elementos de alimentação e controle de fluxo, nas quais o diferencial de pressão influencia simultaneamente o vazamento e os esforços mecânicos. Estudos experimentais de válvulas rotativas também demonstram que o torque de operação e o vazamento são parâmetros relacionados às condições de funcionamento e à precisão dimensional do conjunto rotor-carcaca (MINOWA; NISHIMURA; OHYAMA, 1990).

Portanto, o comportamento obtido na simulação indica que a condição de pressão máxima deve ser utilizada como referência para a seleção do sistema de acionamento, garantindo margem suficiente para suportar as solicitações mecânicas durante a operação.

4.1.3. Potência em Função da Pressão Diferencial e da Rotação

Além do vazamento e do torque, foi analisada a potência mecânica necessária para o acionamento do rotor. A Figura 3 apresenta a variação da potência requerida em função da pressão diferencial e da rotação do rotor, permitindo avaliar simultaneamente os efeitos das duas variáveis sobre a demanda energética do equipamento.

Figura 5. Torque resistente em função da pressão diferencial.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Os resultados apresentados na Figura 3 demonstram que a potência requerida aumenta com a elevação da pressão diferencial e da rotação do rotor. Esse comportamento decorre da relação entre torque e velocidade de rotação, uma vez que a potência mecânica é diretamente influenciada pelo torque resistente e pela velocidade angular do eixo.

Do ponto de vista operacional, o resultado demonstra a existência de um compromisso entre capacidade de alimentação, velocidade de rotação e consumo energético. O aumento da rotação pode elevar a capacidade de processamento da válvula, mas também aumenta a demanda de potência do sistema de acionamento.

Além disso, a rotação deve ser analisada conjuntamente com o comportamento do vazamento. Em válvulas rotativas, o aumento da velocidade pode modificar as condições de preenchimento dos compartimentos do rotor e influenciar o desempenho global do equipamento. Estudos técnicos sobre válvulas rotativas indicam que o aumento da rotação pode aumentar a movimentação do ar e, dependendo das condições do processo, prejudicar o preenchimento dos compartimentos e limitar o desempenho volumétrico.

Assim, os resultados da simulação indicam que a definição da rotação de operação deve considerar simultaneamente a capacidade requerida, a potência disponível, o torque resistente, o vazamento e a eficiência volumétrica. O ponto de operação mais adequado não corresponde necessariamente à maior rotação possível, mas à condição que proporcione equilíbrio entre desempenho e consumo energético.

4.2. Análise de Sensibilidade – Impacto da Folga no Desempenho

Foi realizada uma análise de sensibilidade considerando a variação da folga radial entre 0,10 mm e 0,20 mm. Para a geometria simplificada adotada no modelo, a área associada à passagem pela folga foi representada por:

$$A_{folga} = 2\pi r g$$

Onde:

- r = raio do rotor
- g = folga radial

A relação demonstra que, sob a hipótese geométrica adotada, a área de passagem aumenta linearmente com a folga. Entretanto, o efeito da folga sobre o vazamento não precisa ser necessariamente linear, pois o escoamento através da restrição depende também da pressão diferencial, da geometria local e das condições do escoamento.

Esse comportamento é particularmente importante quando comparado aos resultados de Wang et al. (2021), que observaram

crescimento mais acentuado do vazamento médio com o aumento da folga em simulações de válvulas rotativas.

No presente estudo, o aumento da folga de 0,10 mm para 0,20 mm resultou em aumento superior a 90% na vazão de vazamento. Esse resultado evidencia a elevada sensibilidade do equipamento às tolerâncias dimensionais e reforça a necessidade de controle rigoroso durante a fabricação.

A literatura também demonstra que o desgaste progressivo do rotor pode aumentar a folga durante a vida útil da válvula e, conseqüentemente, prejudicar o desempenho do sistema. McGlinchey e Marjanovic (2001) destacam que o desgaste do rotor pode aumentar o vazamento de ar e afetar diretamente o desempenho do sistema de transporte pneumático. Portanto, a folga deve ser considerada não apenas como parâmetro de fabricação, mas também como variável associada à manutenção e à vida útil do equipamento.

4.3. Cálculo da Eficiência Volumétrica

Os resultados da simulação indicaram eficiência volumétrica próxima de 95% para a folga de 0,10 mm, valores intermediários, aproximadamente entre 88% e 92%, para a folga de 0,15 mm, e redução para aproximadamente 80–85% quando a folga atingiu 0,20 mm.

A redução da eficiência com o aumento da folga pode ser explicada pelo aumento da parcela de vazamento em relação à vazão teórica. Dessa maneira, parte do escoamento que deveria contribuir para o desempenho útil do equipamento é perdida através das regiões de maior folga.

Esse resultado é coerente com estudos de desempenho de máquinas rotativas nos quais as folgas internas constituem importantes caminhos de vazamento. Em investigação experimental de um expansor rotativo, por exemplo, Murthy, Norris e Subiantoro (2022) identificaram as folgas radiais e as folgas nas pontas das palhetas como importantes caminhos de vazamento interno, demonstrando a influência desses parâmetros sobre a eficiência volumétrica.

Assim, os resultados obtidos indicam que a eficiência volumétrica da válvula está diretamente relacionada ao controle dimensional das regiões de vedação. A manutenção de folgas reduzidas, dentro dos limites seguros para evitar contato mecânico entre rotor e carcaça, constitui uma condição importante para minimizar perdas por vazamento.

A comparação entre os diferentes cenários simulados, considerando os efeitos da folga sobre o vazamento, torque, potência e eficiência volumétrica, é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Comparação dos Cenários Simulados.

Folga (mm)	Vazamento	Torque	Potência	Eficiência Volumétrica
0,1	Baixo	Igual	Base	Alta (~95%)
0,15	Médio	Igual	↑	Média (~90%)
0,2	Alto	Igual	↑↑	Reduzida (~80–85%)

Fonte: Autoria própria, 2026.

A Tabela 1 evidencia que a alteração da folga exerce efeito mais pronunciado sobre o vazamento e a eficiência volumétrica do que sobre o torque, dentro das hipóteses adotadas no modelo. Esse resultado reforça que o controle da folga constitui uma variável crítica principalmente para o desempenho de vedação e para a eficiência do equipamento.

4.4. Seleção do Motoredutor

Com base no torque máximo obtido na simulação e no fator de serviço estabelecido para o projeto, foi selecionado o motoredutor FAF57 – SEW-EURODRIVE, com potência de 1,5 CV, torque nominal de 405 N·m, rotação de saída de 28 rpm e fator de serviço de 1,5.

A seleção foi fundamentada na comparação entre o torque requerido pelo sistema e o torque nominal disponível no equipamento. O torque nominal do motoredutor apresenta margem em relação ao torque máximo calculado, enquanto a rotação de saída encontra-se compatível com a faixa operacional estabelecida para a válvula.

O fator de serviço adotado também proporciona margem adicional para condições de carga variável e eventuais picos de solicitação. Dessa forma, a seleção do motoredutor não deve ser avaliada apenas pela potência nominal, mas pela combinação entre torque, rotação, fator de serviço e condição máxima de operação.

Os resultados obtidos indicam, portanto, que o motoredutor selecionado atende às condições previstas no modelo. Entretanto, para validação definitiva do dimensionamento, recomenda-se que os resultados numéricos sejam posteriormente confrontados com ensaios experimentais, principalmente nas condições de maior

pressão diferencial e maior folga, nas quais o modelo prevê maior sensibilidade do desempenho.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos por meio da modelagem matemática e da simulação computacional permitiram avaliar o comportamento operacional da válvula rotativa de 10" sob diferentes condições de pressão diferencial, rotação e folga radial. Verificou-se que o aumento da pressão diferencial promove elevação do vazamento e do torque resistente, enquanto o aumento da rotação resulta em maior demanda de potência mecânica.

A análise de sensibilidade demonstrou ainda que a folga radial constitui um dos parâmetros mais críticos do sistema, uma vez que sua elevação de 0,10 mm para 0,20 mm provocou aumento superior a 90% na vazão de vazamento e redução da eficiência volumétrica, que passou de aproximadamente 95% para valores entre 80% e 85%. Esses resultados apresentam concordância qualitativa com estudos anteriores sobre válvulas rotativas, que demonstram a influência significativa da pressão diferencial e das folgas internas sobre o vazamento e o desempenho do equipamento.

A comparação dos cenários simulados evidenciou que o controle dimensional da folga é fundamental para garantir o desempenho e a eficiência da válvula. A condição de 0,10 mm apresentou o melhor comportamento quanto à vedação e à eficiência volumétrica, enquanto a condição de 0,20 mm apresentou as maiores perdas por vazamento. Esses resultados reforçam a importância de estabelecer tolerâncias dimensionais adequadas durante a fabricação e de

realizar inspeções periódicas durante a operação, considerando também os efeitos do desgaste sobre o aumento das folgas.

A análise conjunta do vazamento, torque, potência e eficiência volumétrica possibilitou estabelecer uma visão integrada do comportamento do equipamento e demonstrou que a definição do ponto de operação deve buscar equilíbrio entre capacidade de alimentação, consumo energético, confiabilidade e eficiência.

Com base no torque máximo calculado e nas condições operacionais estabelecidas, foi selecionado o motoredutor FAF57 da SEW-EURODRIVE, com potência de 1,5 CV, torque nominal de 405 N·m, rotação de saída de 28 rpm e fator de serviço de 1,5. Os resultados indicam que o equipamento apresenta capacidade compatível com as exigências previstas para o sistema, proporcionando margem adequada para as condições de operação consideradas.

Dessa forma, conclui-se que a metodologia empregada constitui uma ferramenta adequada para o pré-dimensionamento e a avaliação do desempenho da válvula rotativa, permitindo identificar parâmetros críticos e subsidiar decisões de projeto. Entretanto, recomenda-se a realização de validação experimental em trabalhos futuros, especialmente nas condições de maior pressão e maior folga, a fim de comparar os resultados numéricos com dados reais e avaliar efeitos como desgaste, rugosidade superficial, desalinhamento e variações das condições de escoamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6409: tolerâncias geométricas: tolerâncias de forma, orientação, posição e

batimento: generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 19 p. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/5373/abnt-nbr6409-tolerancias-geometricas-tolerancias-de-forma-orientacao-posicao-e-batimento-generalidades-simbolos-definicoes-e-indicacoes-em-desenho>. Acesso em: 1 ago. 2026.

_____. NBR 14646: tolerâncias geométricas: requisitos de máximo e requisitos de mínimo material. Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 24 p. Disponível em: <https://www.normas.com.br/>. Acesso em: 1 ago. 2026.

_____. NBR 6409: tolerâncias geométricas: tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento: generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 19 p. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/5373/abnt-nbr6409-tolerancias-geometricas-tolerancias-de-forma-orientacao-posicao-e-batimento-generalidades-simbolos-definicoes-e-indicacoes-em-desenho>. Acesso em: 1 ago. 2026.

HENG, Jin Liang; NEW, T. H.; WILSON, Philip. Application of an Eulerian granular numerical model to an industrial scale pneumatic conveying pipeline. *Advanced Powder Technology*, v. 30, n. 2, p. 240–256, 2019. DOI: 10.1016/j.appt.2018.10.028. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921883118308185>. Acesso em: 1 ago. 2026.

KLINZING, George E.; RIZK, Farid; MARCUS, Roy; LEUNG, L. S. *Pneumatic conveying of solids: a theoretical and practical approach*. 3. ed. Dordrecht: Springer, 2010. 568 p. DOI: 10.1007/978-90-481-3609-4.

MCGLINCHEY, D.; MARJANOVIC, P. Accounting for air leakage through a rotary valve. *Chemical Processing*, v. 64, n. 10, p. 56–58, 2001.

MILLS, David. *Pneumatic conveying design guide*. 3. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016. DOI: 10.1016/C2014-0-02678-0.

MINOWA, Toshimichi; NISHIMURA, Yutaka; OHYAMA, Yoshishige. Experimental study on operating torque and leak quantity of a cylindrical rotary valve. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, v. 56, n. 532, p. 3897–3902, 1990. DOI: 10.1299/kikaib.56.3897.

MURTHY, Anarghya Ananda; NORRIS, Stuart; SUBIANTORO, Alison. Experimental investigation of internal leakages and effects of lubricating oil on the performance of a four-intersecting-vane rotary expander. *Energy*, v. 238, pt. B, art. 121689, 2022. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121689.

RHODES, Martin J. (ed.). *Introduction to particle technology*. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2008. 472 p. DOI: 10.1002/9780470727102.

ROGERS, J.; BRADLEY, M. S. A.; PITTMAN, A. N.; FARNISH, R. J.; REED, A. R. A simple analytical model for estimating air leakage through rotary valves. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, v. 214, n. 3, p. 185–196, 2000. DOI: 10.1243/0954408001530047.

SUNG, Woo Chang; KIM, Jun Young; CHUNG, Seok Woo; LEE, Dong Hyun. Effect of particle size distribution on hydrodynamics of pneumatic conveying system based on CPFD simulation. *Advanced*

Powder Technology, v. 32, n. 7, p. 2336–2344, 2021. DOI: 10.1016/j.appt.2021.05.010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092188312100234X>. Acesso em: 1 ago. 2026.

WANG, Yong-liang; PENG, Si-peng; WANG, Yi; LI, Shi-hao; LIU, Yu-long. Simulation of air leakage characteristics of rotary valve pneumatic conveying. *Journal of Dalian Maritime University*, v. 47, n. 1, p. 111–118, 2021. DOI: 10.1641/j.cnki.issn1006-7736.2021.01.013.

¹ Discente do Curso Superior de Engenharia Mecânica do Instituto de Ensino Superior Fucapi - CESF *Campus* Manaus – Am. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

² Docente do Curso Superior de Engenharia Mecânica do Instituto de Ensino Superior Fucapi - CESF *Campus* Manaus - Am. Doutora em Química (PPGQ/UFAM). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)