



Avaliação do consumo de nitrogênio do sistema de transporte pneumático de uma unidade de polipropileno

Flavio Fortes Pereira

Projeto Final de Curso

Orientadores

Prof. Ana Mehl, D. Sc.

Prof. Fernando Pellegrini Pessoa, D. Sc.

Dezembro de 2020

AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE NITROGÊNIO DO SISTEMA DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO DE UMA UNIDADE DE PRODUÇÃO DE POLIPROPILENO

Flavio Fortes Pereira

Projeto Final de Curso submetida ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenharia Química.

Aprovado por:

Flavio da Silva Francisco, D. Sc.

Tatiana Felix Ferreira, D. Sc.

Orientado por:

Ana Mehl, D. Sc.

Fernando Pellegrini, D. Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Dezembro de 2020

Ficha Catalográfica

Pereira, Flavio Fortes.

Avaliação do consumo de nitrogênio do sistema de transporte pneumático de uma unidade de produção de polipropileno. / Flavio Fortes Pereira. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2020.

VI, 64 p.; il.

(Projeto Final) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2020.

Orientadoras: Ana Mehl, Fernando Pellegrini.

1. Transporte Pneumático. 2. Consumo de Nitrogênio. 3. Avaliação. 4. Projeto Final. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Ana Mehl e Fernando Pellegrini. I. Avaliação do consumo de nitrogênio do sistema de transporte pneumático de uma unidade de produção de polipropileno.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a toda minha família que esteve presente em todos os momentos de grande superação que existiram ao longo da minha trajetória. Em especial à minha mãe Fernanda, meu maior exemplo, à minha irmã Heloisa, que admiro muito e aos meus avós Fernando e Heloisa que proveram todas as condições para que eu pudesse concluir à graduação.

Ao meu primo Matheus, o melhor amigo que alguém poderia ter. À minha tia madrinha Leda, por toda experiência e suporte. À minha tia Patrícia e à minha prima Julia por todos os momentos de apoio na graduação. Ao meu pai Flavio.

Agradeço à UFRJ por me proporcionar todo conhecimento técnico e aprendizado.

Aos meus orientadores, Ana Mehl e Fernando Pellegrini, que acreditaram na minha determinação e empenho para a realização de todo o trabalho.

Agradeço aos meus líderes na Braskem, Robert, Scherer, Dener e Carla, por me apoiarem na realização deste projeto e por me possibilitarem o aprendizado por meio da experiência prática, fundamental na formação de um engenheiro.

Aos amigos que me apoiaram e estiveram comigo em grande parte dos desafios que tive ao longo desses anos, em especial ao meu amigo/irmão Pedro Cerqueira.

Por fim, agradeço a Deus, por me dar força em todos os momentos de dificuldade e possibilitar a realização de um sonho.

“Sempre parece impossível até que seja feito”, Nelson Mandela.

Resumo do Projeto Final de Curso submetida ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenharia Química.

AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE NITROGÊNIO DO SISTEMA DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO DE UMA UNIDADE DE PRODUÇÃO DE POLIPROPILENO.

Flavio Fortes Pereira

Dezembro, 2020

Orientadores: Prof. Ana Mehl, D SC;
Prof. Fernando Pellegrini, D. Sc.

Os problemas envolvendo fenômenos de transporte, especialmente os relacionados ao transporte pneumático, são comuns dentro da indústria petroquímica. Isso ocorre devido à complexidade dos processos, às falhas em sistemas de controle e a crescente demanda por aumento de produção. Os fluidos percorrem obstáculos hidráulicos, como equipamentos e válvulas, onde o fluxo dependerá diretamente do percentual de abertura. Além disso, o transporte pneumático é influenciado pela pressão do sistema e pelo teor de hidrocarbonetos. Por fim, as diferentes estratégias de controle e avaliação de processos são fundamentais para que haja redução do consumo de gás no sistema de transporte. Neste trabalho, identificou-se uma perda contínua de nitrogênio para atmosfera em um sistema de transporte pneumático de uma fábrica de polipropileno e realizou-se um estudo para reduzir esse consumo. Observou-se também a relação entre pressão do sistema e teor de hidrocarbonetos do pó com a vazão de nitrogênio perdida para a atmosfera. Os cálculos e análises foram feitos da equação de Darcy para cálculo de vazão através de válvulas e utilizou-se a metodologia DMAIC – Six Sigma para desenvolvimento do projeto. Os resultados mostram que não há variação acentuada da pressão do sistema de transporte pneumático e do teor de hidrocarbonetos, quando se envia mais nitrogênio para a atmosfera. A quantidade perdida, no entanto, é significativa, impactando no custo de insumos da fábrica. Com a fase 1 do projeto, o consumo de nitrogênio no sistema de transporte pneumático apresentou uma redução de 18,78 % ao se reduzir a abertura da válvula para campanhas de polímeros com adição de eteno. Na fase 2 do projeto, a redução no consumo de nitrogênio no sistema de transporte pneumático foi de 87,60 % ao se alterar a estratégia de controle utilizada. Isso sem que houvesse prejuízos à segurança de processos. Em suma, avalia-se ser possível reduzir o envio de nitrogênio para a atmosfera.

INDÍCE

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	APRESENTAÇÃO E RELEVÂNCIA DO ESTUDO.....	1
1.2.	OBJETIVO DO ESTUDO.....	2
1.3.	ESTRUTURA DO ESTUDO.....	3
2.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	4
2.1.	POLIPROPILENO.....	4
2.1.1.	Mercado de polipropileno.....	5
2.1.2.	Produção de polipropileno.....	6
2.2.	TRANSPORTE PNEUMÁTICO.....	8
2.2.1.	Tipos de Transporte Pneumático.....	9
2.2.2.	Parâmetros Relevantes no Transporte Pneumático.....	11
2.3.	MECÂNICADOS FLUIDOS E SISTEMA HIDRÁULICO..	13
2.3.1.	Equação de Bernoulli.....	13
2.3.2.	Perdas de Carga.....	13
2.3.3.	Válvulas Industriais.....	15
2.3.4.	Cálculo de vazão através de válvulas.....	17
3.	TRANSPORTE PNEUMÁTICO DO POLIPROPILENO.....	19
3.1.	DESCRITIVO DA UNIDADE.....	19
4.	METODOLOGIA.....	23
4.1.	METODOLOGIA DMAIC - SIX SIGMA.....	24
4.1.1.	Definição.....	24
4.1.2.	Medição.....	26
4.1.3.	Análise.....	27
4.1.4.	Implementação.....	29
4.1.5.	Controle.....	29
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
5.1.	DEFINIÇÃO.....	30
5.1.1.	Cálculo do Consumo de Nitrogênio no Sistema de Transporte Pneumático.....	30
5.1.2.	Histórico da Perda de Nitrogênio no Sistema de Transporte Pneumático.....	35
5.1.3.	Escopo do Projeto e Metas.....	36
5.2.	MEDIÇÃO.....	37
5.2.1.	Análise dos Sistemas de Medição dos Parâmetros Chave.....	37
5.2.2.	Levantamento das causas.....	38
5.3.	ANÁLISE.....	39
5.3.1.	Priorização das Causas.....	39
5.3.2.	Avaliação das Causas.....	41
5.4.	IMPLEMENTAÇÃO.....	49
5.4.1.	Plano de ação 5W-2H.....	49
5.4.2.	Avaliação da Alteração de Abertura da Válvula.....	50

5.4.3. Obtenção do Consumo considerando Nova Estratégia de Controle.....	53
5.5. CONTROLE	55
6. CONCLUSÕES	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

LISTA DE ABREVIATURAS/SIGLAS

C ₃	Compostos orgânicos com 3 carbonos (propeno, propano, metil acetileno)
HC	Hidrocarbonetos
N ₂	Nitrogênio
PP	Polipropileno
TP	Transporte Pneumático

1. INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO E RELEVÂNCIA DO ESTUDO

Na indústria petroquímica, os processos relacionados aos fenômenos de transporte estão entre os principais focos de monitoramento e controle. Entre esses fenômenos está o transporte pneumático, que se relaciona à movimentação de partículas por meio de um fluido gasoso.

Neste trabalho, realizou-se uma avaliação do sistema de transporte pneumático de uma unidade industrial de polipropileno (PP), no qual o arraste do pó é feito com nitrogênio gasoso. A motivação foi reduzir o consumo de nitrogênio existente no sistema.

No processo, após a etapa de polimerização, via tecnologia LIPP, a corrente de produto passa por processos de separação e é transportada até a etapa de extrusão. A partir desse ponto, o pó é convertido e adquire características esféricas de produto, o qual será armazenado e posteriormente comercializado.

O transporte entre as etapas de separação e extrusão é o que se caracteriza como sendo o transporte pneumático. Uma representação do mesmo é apresentada na Figura 1.1:

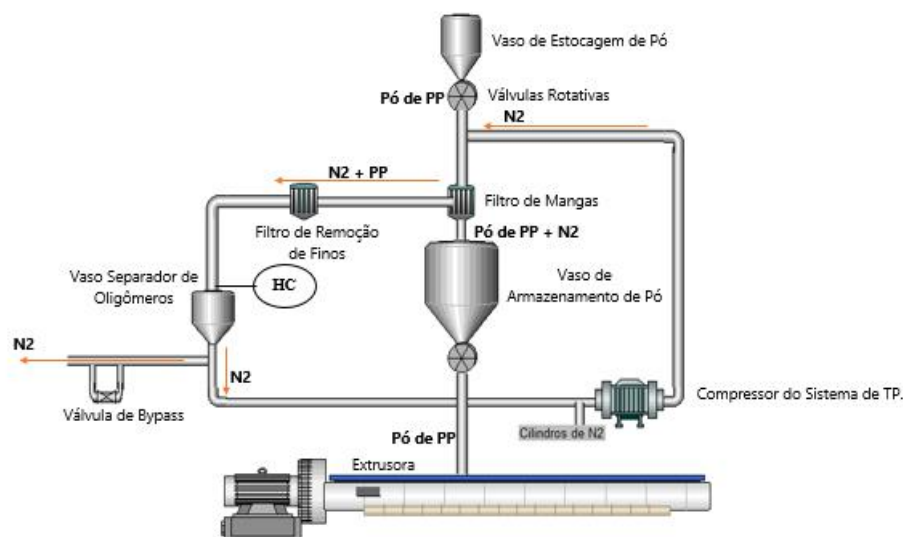


Figura 1.1 Esquema de operação do sistema de transporte pneumático de uma unidade produtora de polipropileno. Fonte: Elaboração do autor, Braskem POLIPROPILENO5

O pó de polipropileno, após as etapas de separação, é transportado pelo nitrogênio de um vaso de estocagem de pó até um vaso de armazenamento de pó, conforme descrito na Figura 1.1. O nitrogênio também sofre uma recirculação nesse sistema, de modo que as partículas de pó presentes sejam removidas e de que exista a força motriz necessária para transportar o pó.

Após determinado tempo de operação e recirculação do nitrogênio, há um aumento do teor de hidrocarbonetos na corrente gasosa. Esse teor é oriundo de gases que não sofreram reação e não foram separados previamente, sendo arrastados para o transporte pneumático.

Como os gases hidrocarbonetos presentes no pó formam uma mistura explosiva, torna-se necessário purgar o nitrogênio no sistema de transporte pneumático. Por consequência, há um envio contínuo de nitrogênio para atmosfera através de uma válvula borboleta de *by-pass*.

Neste trabalho, busca-se compreender se é necessário retirar nitrogênio continuamente do sistema e busca-se propor alternativas para que a purga de nitrogênio seja a menor possível.

1.2. OBJETIVO DO ESTUDO

Com o exposto, este trabalho tem como objetivo reduzir o consumo de nitrogênio do sistema de transporte pneumático de uma unidade produtora de polipropileno. Os objetivos específicos a serem alcançados são:

- Determinar a vazão de nitrogênio enviada à atmosfera no sistema de transporte pneumático e a quantidade consumida anualmente na unidade produtora, utilizando *Microsoft Excel* e conceitos de mecânica dos fluidos.
- Propor uma solução de curto prazo que possa ser facilmente implementada, a partir da redução do percentual de abertura da válvula de retirada de nitrogênio do sistema.
- Realizar adequações de parâmetros de processo, de modo a possibilitar que a solução de curto prazo ocorra.
- Realizar a reestruturação de sistemas de análise e instrumentos, com o objetivo de permitir a implementação da solução de curto prazo
- Propor uma solução de engenharia, a partir da reestruturação da estratégia de controle utilizada no sistema de transporte pneumático, de modo a

permitir que não ocorra a retirada de nitrogênio para a atmosfera, que devido às alterações e investimentos envolvidos seria uma solução de longo prazo.

1.3. ESTRUTURA DO ESTUDO

A fim de atingir os objetivos estabelecidos, este estudo encontra-se organizado em seis capítulos.

No primeiro capítulo são apresentados a importância e motivação do presente estudo, bem como os objetivos do trabalho.

No segundo capítulo são apresentados estudos e materiais existentes na literatura, além dos principais conceitos técnicos necessários a compreensão e desenvolvimento do trabalho. São abordados os temas de produção de polipropileno, transporte pneumático, mecânica dos fluidos e sistemas hidráulicos.

No terceiro capítulo é apresentada uma breve descrição da unidade industrial, com o objetivo de fornecer os dados acerca do processo e do sistema de transporte pneumático necessários ao desenvolvimento do presente projeto.

No quarto capítulo são apresentados os procedimentos metodológicos utilizados para quantificar o consumo de nitrogênio da unidade industrial e obter as duas soluções finais propostas. Para tanto, foi utilizada a metodologia 6-Sigma – DMAIC (*Define, Measure, Analyse, Improve, Control*).

No quinto capítulo os objetivos do trabalho são respondidos e apresentam-se os principais resultados obtidos com a implementação da solução de curto prazo já realizada e os resultados esperados com a implementação da 2ª alternativa ainda em fase de implementação.

No sexto capítulo apresentam-se as conclusões deste trabalho, além de propostas de intervenções futuras.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Nesse capítulo são apresentados os principais fundamentos teóricos para a compreensão deste projeto.

Primeiramente, tendo em vista que o projeto foi realizado em uma unidade produtora de polipropileno, são apresentadas informações a respeito das propriedades, aplicações e mercado desse composto. Em seguida, são apresentadas as tecnologias existentes para se produzir polipropileno e as etapas do processo de produção.

Após o conhecimento do processo, são destacados conceitos e parâmetros chaves no transporte pneumático, que é o sistema de estudo do trabalho atual. A redução no consumo de nitrogênio ocorre justamente nessa etapa.

Por fim, a perda de nitrogênio para a atmosfera ocorre através de uma válvula borboleta de *by-pass* em um sistema onde não existem medições locais de alguns parâmetros chaves. Para tanto, são apresentados conceitos de mecânica dos fluidos, com o intuito de: fornecer informações a respeito do funcionamento de uma válvula borboleta; estimar a pressão na entrada da válvula de *by-pass*, via Equação de Bernoulli e, determinar a vazão através da válvula de *by-pass*, via equação de Darcy.

2.1. POLIPROPILENO

A produção industrial de polipropileno data de 1957. Pelo baixo custo de obtenção, alta temperatura de fusão, baixa densidade e por ser quimicamente inerte, é um dos termoplásticos mais produzidos industrialmente na atualidade.

Como exemplos de aplicações, tem-se: 1) fibras e tecidos, devido à resistência química, à força e à baixa densidade específica, que implica em maior volume por peso. 2) filmes, onde é convertido em sacolas, etiquetas, ou embalagens de produtos alimentícios, devido à resistência ao vapor de umidade, e à clareza. 3) folhas termoplásticas, para aplicações de embalagens rígidas, sendo resistentes a produtos gordurosos. 4) moldagem por injeção, pelas propriedades de rigidez, onde estão inseridos brinquedos, equipamentos esportivos, cafeteiras e seringas. 5) moldagem por sopro, com destaque para garrafas, frascos de shampoo e recipientes de lubrificantes (MADDAH,2016).

Por fim, também pode ser aplicado na área automotiva, devido à sua baixa densidade. Com o intuito de reduzir o peso total dos carros, as empresas tendem a aplicar

polipropileno em estojos de bateria, acabamento interno e em componentes externos (MADDAH, 2016). Uma representação do uso do polipropileno por aplicação é apresentada na Figura 2.1:

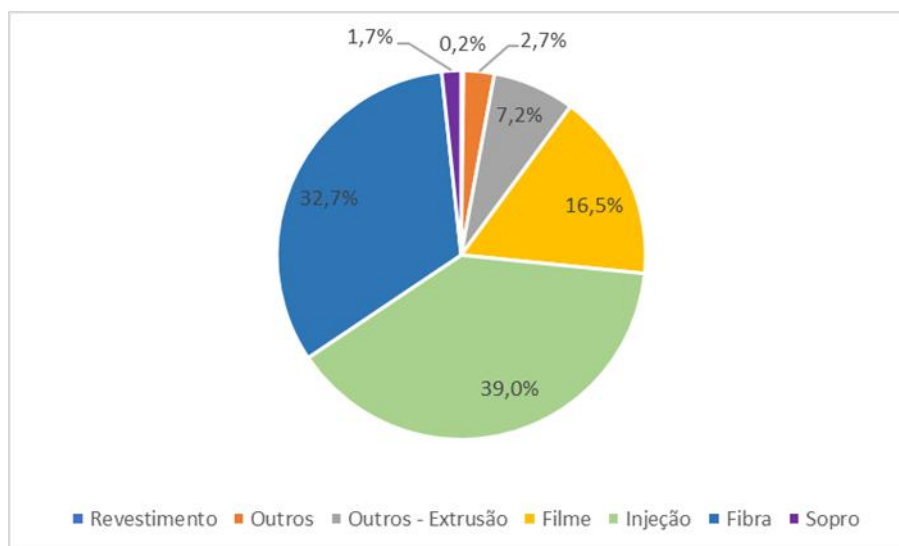


Figura 2.1 Distribuição do consumo global de polipropileno por finalidade e aplicação. Fonte: Adaptado de Maddah, 2016

2.1.1. Mercado de polipropileno

Nos próximos anos, de 2020 a 2024, segundo a Ciston PR Newswire, o mercado de polipropileno possui uma expectativa de crescimento de 5,56% em CAGR (taxa de crescimento anual composta). Alguns fatores explicam essa tendência, como: o aumento do uso de plásticos em indústrias automotivas para redução do peso dos veículos e o consumo de pellets moldados por injeção (uma das principais formas de produção de polipropileno) na Ásia e no Pacífico. Além disso, a demanda de polipropileno nos Estados Unidos também aumentará, com o uso de embalagens flexíveis na indústria alimentícia e eletrônicas, as quais apresentam alto crescimento (WOOD, 2019).

No Brasil, a produção de polipropileno se iniciou em 1978. Entre 2010 e 2016, a produção variou entre 1,5 e 1,6 milhão de toneladas por ano. Em 2018, o valor registrado na produção foi de 1,8 milhão de toneladas, sendo a Braskem a única empresa produtora (EPE, 2018).

Contudo, apesar do crescente aumento, a produção foi superior à demanda interna. Ainda assim, por necessitar de alguns *grades* específicos de polipropileno, o Brasil

importa polipropileno, tendo como principais fornecedores empresas localizadas na Arábia Saudita, Argentina, Colômbia e Coreia do Sul (EPE, 2018).

2.1.2. Produção de polipropileno

Industrialmente, o processo de produção de polipropileno consiste na polimerização de olefinas. Para tanto, a síntese ocorre pela agregação de unidades de propeno (C₃), com posterior interrupção da cadeia polimérica pela inserção de hidrogênio.

Além disso, é possível produzir também copolímeros de polipropileno, os quais são formados pela adição de eteno em menor proporção na reação de polimerização. Tal adição, confere melhora de algumas propriedades e pode ocorrer de duas formas. Primeiramente, pela adição de eteno no processo tradicional de produção, onde o produto formado é um copolímero randômico e possui alta resistência. Ou ainda, a formação de homopolímero em uma primeira etapa e envio deste para um segundo reator que receberá adição de eteno. Nesse caso, o produto formado é um copolímero heterofásico e apresenta características de flexibilidade, uma vez que a região onde o copolímero foi incorporado apresenta maior absorção de energia (PETRY, 2011).

Existem atualmente quatro processos de produção: polimerização em massa (*bulk*), polimerização em solução e polimerização em suspensão, que são processos em fase líquida e polimerização em fase gasosa (MADDAH, 2016). Entre as principais tecnologias em fase gasosa se destacam as tecnologias UNIPOL e NOVOLEN. Já em fase líquida, se destacam as tecnologias SPHERIPOL e BORSTAR (SIEMENS, 2007). Além disso, existe mais uma tecnologia em fase líquida, a tecnologia LIPP Shell, que se caracteriza por ser uma polimerização em lama (ou em massa) e é a utilizada na unidade industrial foco desse trabalho.

Nos processos em fase líquida, há suspensão do monômero e do catalisador em um hidrocarboneto e podem ocorrer em reatores em loop, onde há circulação de solvente, em reatores do tipo tanque agitado, ou em tanques líquidos.

A tecnologia LIPP utiliza-se dos catalisadores de alta atividade Ziegler-Natta de quarta geração e do próprio propeno como solvente. Quando os catalisadores entram em contato com os monômeros de propeno em meio líquido (fase lama), há agregação e ordenação dos monômeros em cadeia. Nesse processo, o crescimento molecular é interrompido pela incorporação de hidrogênio, que atua como agente de terminação de cadeia e, por isso, é responsável por controlar o índice de fluidez e o peso molecular do

polímero (LYONDELL BASELL, 2012). No meio reacional, há a existência de três fases, pó de polipropileno, propeno líquido e propeno gás, vaporizados no reator.

Também são adicionados co-catalisadores e compostos para aumentar a isotaticidade do polímero (polímero isomérico). Essa propriedade se refere ao fato do polímero ter grupos laterais dispostos do mesmo lado da cadeia principal e confere melhoria das propriedades mecânicas. Por fim, ao final do processo, há um composto responsável por finalizar a reação. O fluxograma simplificado do processo é apresentado na Figura 2.2:

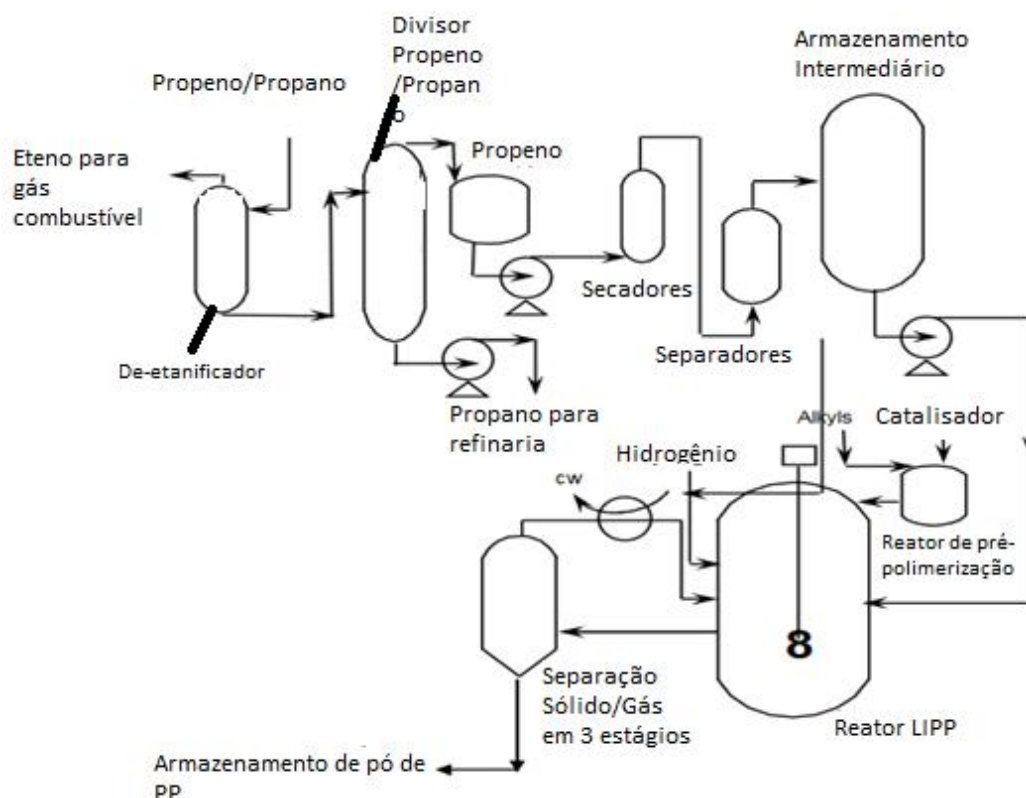


Figura 2.2 Fluxograma Simplificado - Produção de POLIPROPILENO pela tecnologia LIPOLIPROPILENO. Fonte: Adaptado Lyondell Basell

Após a etapa de reação, o polipropileno será separado do propeno (fase gás e fase líquida), por processos de vaporização e filtração. Primeiramente, as etapas de separação correm em alta pressão e, posteriormente, tem-se as etapas de separação em baixa pressão. Dessa forma, ao final dessas etapas, o produto final é polipropileno sólido, que deve necessariamente passar por um processo de extrusão para ser comercializado.

Essa etapa de transporte de pó de polipropileno dos sistemas de separação e recuperação de C3 até a etapa de extrusão é chamada de transporte pneumático e é realizada na ausência de oxigênio.

Com relação aos processos em fase gasosa, a reação ocorre em um leito fluidizado de partículas de polímero seco. Nesse caso, o propeno é agitado e percorre o leito há uma determinada velocidade. Nessa etapa, há reciclo de monômero para o reator. O processo ocorre a baixas pressões e também há presença de catalisadores de alta atividade (LYONDELL BASELL, 2012).

Após as etapas de polimerização e separação, o polímero de polipropileno, que também apresenta característica de pó, é misturado à aditivos e enviado à extrusão. Uma representação do processo em fase gás pode ser observada na Figura 2.3:

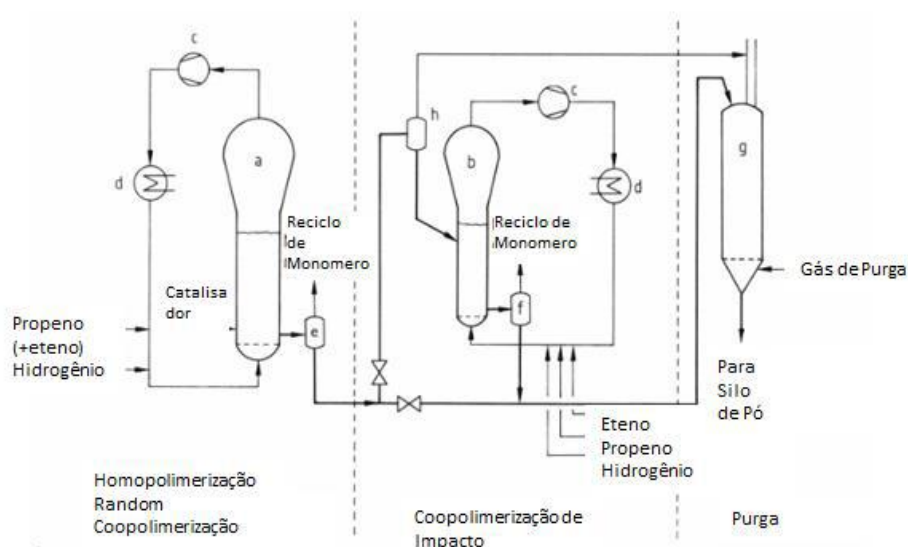


Figura 2.3 Fluxograma Simplificado - Processo de produção de polipropileno em fase gasosa. Fonte: IPOLIPROPILENOC, 2006

2.2. TRANSPORTE PNEUMÁTICO

O transporte pneumático é um tema bastante difundido na indústria petroquímica. Isso ocorre porque possibilita alta produtividade, baixas emissões e hermeticidade. A alta produtividade ocorre devido à possibilidade de operação do processo de forma contínua nas unidades, o que reduz os custos com paradas e reposições. As baixas emissões ocorrem devido à eficiência do deslocamento em um circuito fechado. E a hermeticidade ocorre porque é importante que o processo esteja protegido e isolado do meio ambiente (DYNAMIC AIR, 2020).

Em termos práticos, esse tipo de transporte consiste no arraste de pó ou granulados através de tubulações por um gás. Para tanto, a força motriz do processo é o diferencial de pressão existente associado ao fluxo de gás. Esse fluido pode ser nitrogênio, caso o

composto sólido seja um material explosivo; ou ar seco, caso o composto sólido seja higroscópico, por exemplo.

A pressão de operação do sistema de transporte pneumático é determinada pela localização do equipamento responsável por gerar o diferencial de pressão (compressor ou soprador, por exemplo). Se o equipamento é localizado no início do sistema, o sistema empurrará o gás de processo e o sistema trabalhará sob pressão. Caso esteja localizado no final do sistema, o sistema trabalhará sob vácuo (WEYANDT, 2008).

Segundo Mill (2004), para que o transporte pneumático possa ocorrer, a corrente de transporte deve estar totalmente isolada (o que também previne de possíveis contaminação). Além disso, são necessários quatro elementos principais: fonte de gás comprimido, tubulações de transporte, dispositivos de alimentação e dispositivos de recebimento da corrente pó-gás.

Uma das vantagens do sistema de transporte pneumático que é possível citar é a flexibilidade. É possível que o fluxo existente em uma linha de tubulação seja dividido entre outras linhas, ou que os fluxos de várias linhas apresentem o mesmo destino. Além disso, é possível um transporte de qualidade, tanto horizontalmente quanto verticalmente e com baixa ocupação de espaço. Por fim, o monitoramento contínuo nesse tipo de sistema também é facilitado, devido à facilidade de controle das vazões (MILL, 2004).

Outro ponto se refere à segurança de processos. Tendo em vista que o fluido está completamente isolado, é possível transportar produtos potencialmente perigosos e há baixo risco de gerar poeiras explosivas.

Contudo, em algumas situações o transporte pneumático pode não ser recomendado. Para partículas de grande tamanho ou que se aderem facilmente às superfícies, por exemplo, pode ocorrer acúmulo de sólidos e conseqüente entupimento da tubulação. Outro fator, é a maior necessidade de energia nesse sistema, se comparado ao transporte mecânico, por exemplo, já que é necessário a geração de um diferencial de pressão no sistema. Um terceiro fator se refere ao coletor de sólidos, o qual deve apresentar maior área, de modo a possibilitar a separação pó/gás (WEYANDT, 2008).

Ainda assim, devido às vantagens mencionadas, tal transporte, ao longo dos anos, tem sido utilizado com frequência em diversas indústrias, incluindo a indústria petroquímica.

2.2.1. Tipos de Transporte Pneumático

Fundamentalmente, existem dois tipos de transporte de sólidos em tubulações industriais, de acordo com a forma como as partículas são transportadas e com a velocidade aplicada. O transporte em fase densa possui baixa velocidade e não há suspensão das partículas. Já o transporte em fase diluída apresenta suspensão das partículas e alta velocidade de transporte. A velocidade de transporte será função do tamanho e da densidade das partículas (WEYANDT, 2008).

Para o transporte em fase diluída, há um baixo diferencial de pressão e altas velocidades são requeridas, de modo que mais energia é demandada no sistema. Nesse sentido, a etapa crítica é a de captura do pó, tendo em vista que o sólido entra no sistema em uma condição estática e a velocidade nesse ponto é menor do que no restante do sistema.

Além disso, no transporte em fase diluída, há possibilidade de maior contato entre pó e tubulação, de modo a existir maior atrito e conseqüente possibilidade de abrasão e corrosão dependendo do material.

Uma representação do transporte diluído pode ser observada na Figura 2.4. Esse é o tipo de transporte pneumático empregado na unidade produtora de polipropileno estudada.

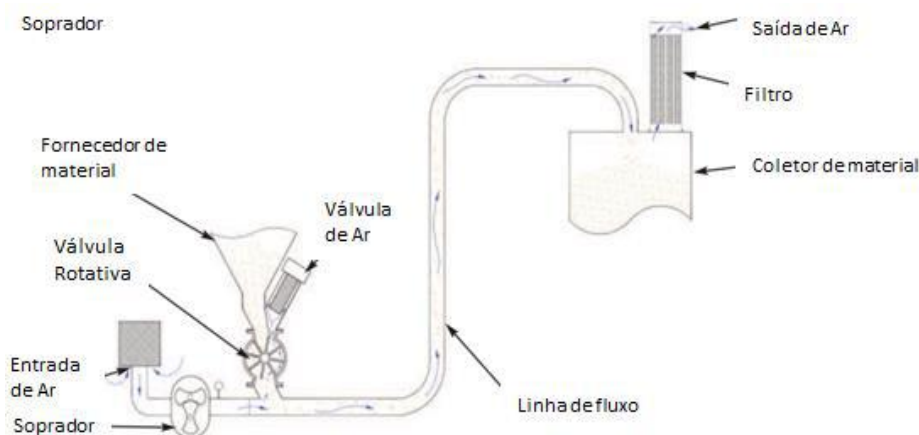


Figura 2.4 Transporte pneumático em fase diluída. Fonte: WEYANDT, 2008

Já o transporte em fase densa, que se caracteriza por apresentar altos diferenciais de pressão, baixas velocidades e por não apresentar suspensão.

Por vezes, no transporte em fase densa, existem injetores de gás suplementares, de modo a garantir um fluxo contínuo e a impedir que haja obstrução dos trechos de tubulação. Apesar disso, o uso dos injetores acarreta também maior gasto energético (WEYANDT, 2008).

2.2.2. Parâmetros Relevantes no Transporte Pneumático

Um dos principais parâmetros avaliados no sistema de transporte pneumático é a velocidade do gás de transporte. O transporte em fase diluída ocorre com velocidades entre 12 e 15 m/s, já o transporte em fase densa, ocorre com velocidades próximas a 3 m/s.

É válido ressaltar que devido aos princípios termodinâmicos, o ponto de menor velocidade no transporte pneumático será o ponto de maior pressão, ou seja, o local de alimentação de sólidos (MILLS, 2004). Considerando a mesma área de seção transversal, ou seja, uma tubulação de mesmo diâmetro, a velocidade (v) será diretamente proporcional à vazão volumétrica (Q). Assim, para uma temperatura (T) constante:

$$P_1V_1 = P_2V_2 \text{ eq. (1).}$$

Onde: p_1 e p_2 são pressões e V_1 e V_2 são volumes em diferentes pontos da tubulação.

Tendo em vista que o objetivo deste trabalho é avaliar o consumo de nitrogênio no sistema de transporte pneumático e não a eficiência no transporte de sólidos, a velocidade do gás não será o principal parâmetro avaliado.

Outro parâmetro relevante é a velocidade das partículas. Como o mecanismo de transporte é a força de arraste, esse valor corresponde em média a 80 % da velocidade do gás e na prática, é difícil de ser medido (MILLS, 2004).

Por sua vez, a razão entre a vazão mássica de pó e a vazão mássica de gás é uma variável fundamental de análise em um sistema de transporte pneumático, em geral denominada razão pó-gás, e identificada pelo símbolo ϕ . Considerando o transporte de polipropileno, a razão pó-gás é expressa pela Equação 2:

$$\phi = \frac{\text{vazão mássica de pó de PP}}{\text{vazão mássica de gás de transporte}} \text{ Eq. (2).}$$

Alguns parâmetros podem influenciar na razão pó-/gás, como a distância percorrida pelo fluido, o diferencial de pressão e a velocidade do gás de transporte.

No projeto em questão, existe uma outra razão pó/gás, fora do sistema de transporte pneumático, que influencia diretamente no consumo de nitrogênio desse sistema. Isso ocorre devido à sua relação com o teor de hidrocarbonetos presentes: vazão mássica de pó de polipropileno/vazão mássica de C₃ de arraste. O propeno de arraste é o presente no pó de polipropileno e que é enviado em conjunto com o propeno para o sistema de transporte pneumático. Essa corrente será arrastada pelo gás nitrogênio neste sistema. Quanto maior a razão, menor teor de C₃ presente e, conseqüentemente, menor teor de hidrocarbonetos. Tendo em vista que há envio de nitrogênio para atmosfera quando o teor de hidrocarbonetos aumenta (conforme visto no Capítulo 1 deste trabalho), uma maior razão acarretaria também em menor consumo de nitrogênio.

Além disso, a pressão de todo o sistema também deve ser monitorada e controlada, de modo a garantir que não existam oscilações durante o transporte. Entre as causas de oscilação da pressão estão: entupimentos de trechos de tubulações, saturações de equipamentos de separação, funcionamento inadequado de válvulas e até sistemas de controle ineficientes.

Por fim, as características das partículas também são parâmetros relevantes para o transporte pneumático. Entre elas destaca-se: densidade, distribuição granulométrica, coeficiente de atrito, rugosidade e forma das partículas, teor de umidade, abrasividade e inflamabilidade (WALLAS, 1990).

Todos esses parâmetros foram monitorados durante a realização desse trabalho. Segue uma representação do sistema de transporte pneumático em fase diluída na Figura 2.5:

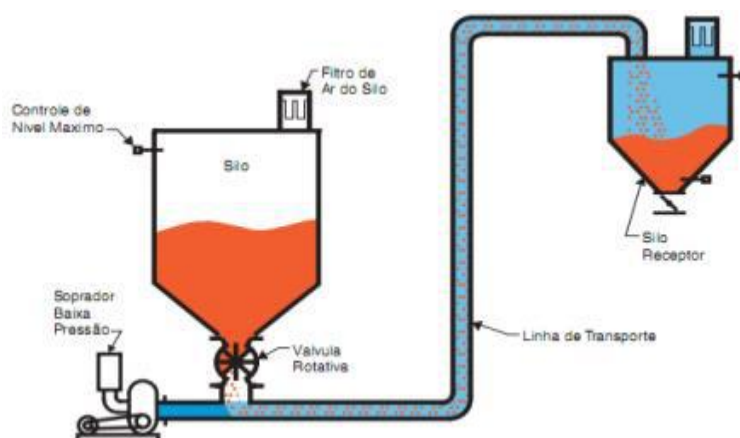


Figura 2.5 Sistema de transporte pneumático típico em fase diluída. Fonte: Coelho, 2015

2.3. MECÂNICA DOS FLUIDOS E SISTEMA HIDRÁULICO

2.3.1. Equação de Bernoulli

A mecânica dos fluidos é um dos fenômenos de transporte mais estudados no curso de Engenharia Química. Seus fundamentos são empregados no dimensionamento de equipamentos, como bombas, compressores ou sopradores; no projeto de tubulações; no desenvolvimento de medidores de vazão e pressão; e na quantificação da perda de produtos ou utilidades utilizadas nas estimativas de um prejuízo financeiro em um processo. Essa última aplicação é o objeto de estudo deste trabalho.

Sendo governada por duas principais leis: “Lei da Conservação de Quantidade de Movimento” e “Primeira Lei da Termodinâmica”, é possível explicitar o balanço de energia mecânica de um fluido, pela equação de Bernoulli. Contudo, para isso, o fluido deve ser incompressível e o escoamento deve ser permanente, sem atrito e ao longo de uma linha de corrente (FOX et al., 2010). A equação, a qual representa a energia cinética, energia potencial e energia de pressão pode ser representada na Equação 3:

$$\frac{v_1^2}{2g} + z_1 + \frac{P_1}{\rho g} = \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \frac{P_2}{\rho g} \text{ Eq. (3).}$$

onde,

- v = velocidade do fluido;
- z = altura estática;
- P = pressão;
- g = aceleração da gravidade;
- ρ = massa específica.

2.3.2. Perdas de Carga

Na prática industrial, a Equação de Bernoulli é amplamente utilizada para estimar a pressão existente em um determinado trecho de tubulação (por exemplo, P_2), tendo-se como variável conhecida a pressão em outro ponto (por exemplo, P_1).

Contudo, os obstáculos e instrumentos presentes, como válvulas, entradas de equipamentos e tubulações, além de reduções ou expansões de diâmetro, ocasionam dissipação da energia mecânica e devem ser considerados na equação de Bernoulli.

Para tanto, estima-se a perda de carga h_L , que pode ser subdividida em perda de carga distribuída (h_{ld}), quando a perda de energia se relaciona ao atrito do próprio escoamento; e em perda de carga localizada (h_{ll}), quando a perda de energia se relaciona aos obstáculos:

$$h_L = h_{ll} + h_{ld} \text{ Eq. (4).}$$

Para o cálculo da perda distribuída, pode-se utilizar a seguinte equação:

$$h_{ld} = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \text{ Eq. (5).}$$

onde,

- D = diâmetro da tubulação;
- L = comprimento do trecho de tubulação;
- f = fator de atrito.

O fator de atrito (f) pode ser calculado de formas diferentes, baseando-se no tipo de escoamento. Para escoamentos em regimes laminares, o cálculo do fator de atrito é dado por:

$$f = \frac{64}{Re} \text{ Eq. (6).}$$

onde,

- Re = número de Reynolds = $\frac{Dv\rho}{\mu}$;
- μ = viscosidade dinâmica.

Já para escoamentos em regimes turbulentos, f é obtido pela Equação de CooleBrook-White (Equação 7), o que envolve um processo de iteração. Ou ainda experimentalmente a partir do Diagrama de Moody, o qual é exposto na Figura 2.7.

$$f^{(-0,5)} = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{e/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \cdot f^{(-0,5)}} \right) \text{ eq. (7).}$$

Onde:

- e = rugosidade da tubulação;

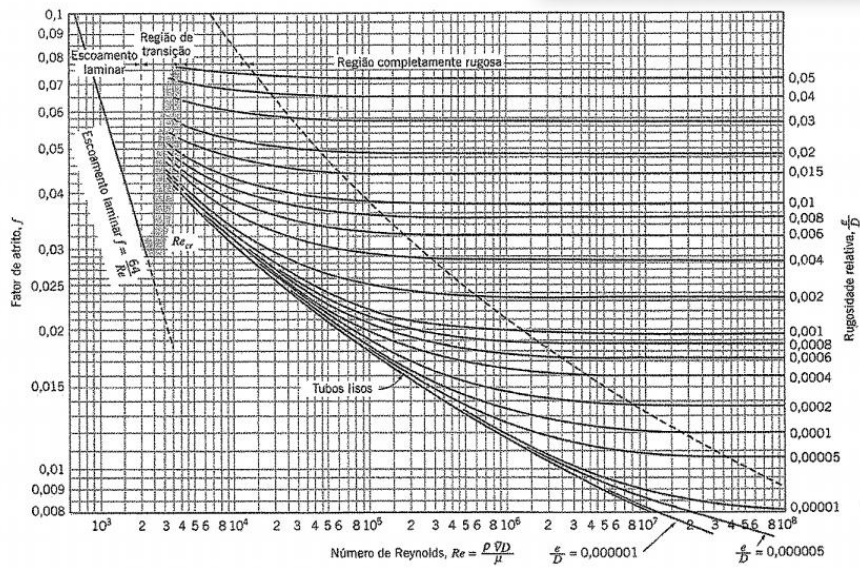


Figura 2.7 Diagrama de Moody. Fonte: Moody, 1944

É possível calcular também a perda de carga localizada, a partir da Equação 8:

$$h_{ll} = \frac{Kv^2}{2g} \text{ Eq. (8)}$$

Onde:

- K = coeficiente de perda de carga, obtido experimentalmente para cada obstáculo;

2.3.3. Válvulas Industriais

Na indústria química, válvulas industriais possuem grande relevância, uma vez que esses instrumentos permitem regular vazões e pressões na unidade. Assim é possível produzir nas condições esperadas, possuir segurança durante o processo e operar dentro dos limites de especificação previstos. Nesse sentido, quanto à finalidade, as válvulas podem ser classificadas em:

. Válvulas de bloqueio: interrompem ou estabelecem a existência de vazão, ou seja, funcionam 100 % abertas ou 100 % fechadas. Destacam-se nesse sentido válvulas gaveta e válvulas esfera.

. Válvulas de regulagem: utilizadas para controlar o fluxo, de modo que muitas vezes possuem abertura parcial. Entre as válvulas de regulagem, se destacam válvulas do tipo globo, válvulas diafragma, válvulas agulha e válvulas borboleta.

. Válvulas que permitem fluxo em apenas um sentido: nesse caso, há restrição do sentido de fluxo. Como exemplo, tem-se as válvulas de retenção.

. Válvulas que controlam a pressão a montante: destacam-se válvulas de segurança e alívio, cuja função fundamental é impedir que haja sobrepressão em equipamentos ou em trechos de tubulação.

. Válvulas que controlam a pressão a jusante: nesse caso, possuem o objetivo de reduzir a pressão em trechos posteriores de tubulação ou de equipamentos. Estão nesse grupo válvulas redutoras e válvulas de quebra vácuo (TELLES, 2012).

Entre as válvulas de regulagem, está a válvula do tipo borboleta, a qual possui baixo custo e é utilizada, principalmente, em processos com líquidos ou gases de baixa pressão. Tais válvulas possuem um disco que gira em torno do eixo de rotação e atua como membro de fechamento (Figura 2.8) (UNIVAL, 2015).

Neste trabalho, a retirada de nitrogênio para atmosfera ocorre através de uma válvula do tipo borboleta.

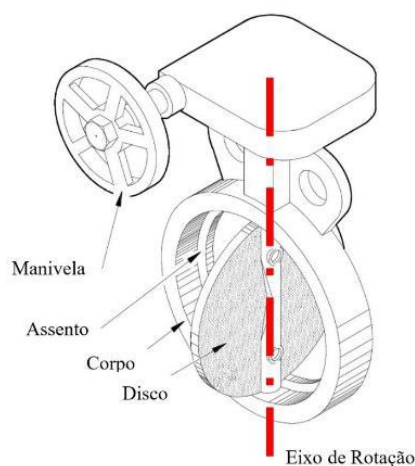


Figura 2.8 Válvula Borboleta. Fonte: Sotomayor, 2016

Existem ainda válvulas de controle, as quais são amplamente utilizadas nas indústrias e normalmente possuem sensores acoplados. Devido a este fato, exercem atividades fundamentais para regulação do processo, uma vez que podem ser utilizadas como elementos finais de controle em malhas fechadas.

2.3.4. Cálculo de vazão através de válvulas

Um fato bastante presente nas indústrias e, em especial, na indústria química, é o número elevado de variáveis analisadas que influenciam nos parâmetros chaves e impactam os resultados dos processos. Ainda que já existam instrumentos de medição para essas variáveis, como: manômetros, rotômetros, indicadores de nível e medidores de corrente; muitas variáveis não apresentam medição virtual e muitas não são sequer medidas.

A partir disso, o cálculo de variáveis a partir de conceitos de engenharia, como os de fenômenos de transporte, se tornam essenciais para determinar o valor de parâmetros que afetam o processo.

No transporte pneumático dessa unidade produtora de POLIPROPILENO, por exemplo, é necessário determinar o fluxo através da válvula de *by-pass*, de modo a quantificar a perda de nitrogênio nesse sistema. Para isso, usa-se a fórmula de Darcy para fluxos através de válvulas e acessórios (Equação 9) (CRANE, 1969).

$$q = 19,31Yd^2 \sqrt{\frac{\Delta PP_1}{KTS_g}} \text{ Eq. (9)}$$

onde,

- q = vazão volumétrica (m^3/h);
- S_g = densidade relativa;
- T = temperatura (K);
- ΔP = diferencial de pressão entre a pressão de entrada e a pressão de saída da válvula (bar);
- P_1 = pressão na entrada da válvula (bar);
- Y = fator de expansão líquida para fluidos compressíveis através de válvulas;
- d = diâmetro da tubulação (mm).

Temperatura da corrente, diâmetro da tubulação, pressão e densidade específica da corrente podem ser obtidos de forma direta e inseridos para cálculo da vazão. A perda de carga, por sua vez, é dividida em perda de carga do trecho de tubulação e perda de carga do orifício de restrição. Assim, o coeficiente de perda de carga total será dado por:

$$K_{total} = K_{tubulação} + K_{orifício\ de\ restrição} \text{ Eq. (10)}$$

onde K do orifício de restrição será função do percentual de abertura da válvula:

$$K_{orifício\ de\ restrição} = \frac{1 - \beta^2}{C^2 \beta^4} \text{ eq. (11)}$$

onde,

- C = Coeficiente de vazão, obtido graficamente, pela Figura 2.9;
- β = razão de diâmetros, que neste trabalho, representam o percentual de abertura da válvula.

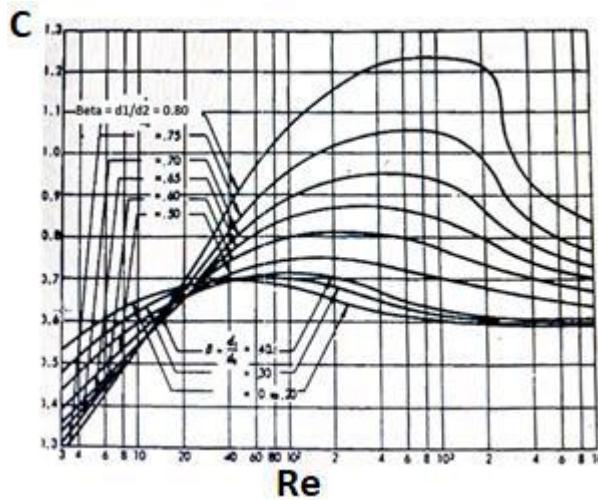


Figura 2.9 Coeficiente de vazão em função do percentual de abertura da válvula β . Fonte: Adaptado Crane.

Por fim, na Figura 2.10, o parâmetro Y pode ser obtido, a partir da razão $\frac{\Delta P}{P_1}$:

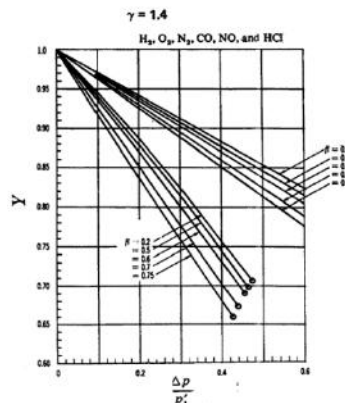


Figura 2.10 Fator Y em função da razão $\frac{\Delta P}{P_1}$ para fluidos compressíveis. Fonte: Crane, 1969

3. TRANSPORTE PNEUMÁTICO DO POLIPROPILENO

3.1. DESCRITIVO DA UNIDADE

O sistema de transporte pneumático de uma planta petroquímica de polipropileno é o sistema a ser estudado. Tal sistema é apresentado na Figura 3.1 e se inicia após a etapa de polimerização, que ocorre através da tecnologia LIPP. Nessa tecnologia, a polimerização ocorre em um reator do modelo tanque de agitação contínua CSTR (*continuous stirred-tank reactor*), onde, na entrada do reator, há a incorporação de propeno, hidrogênio, catalisador e coo-catalisador. Na saída tem-se pó de polipropileno, propeno em fase gás e fase líquida e oligômeros resultantes da não formação correta do polímero.

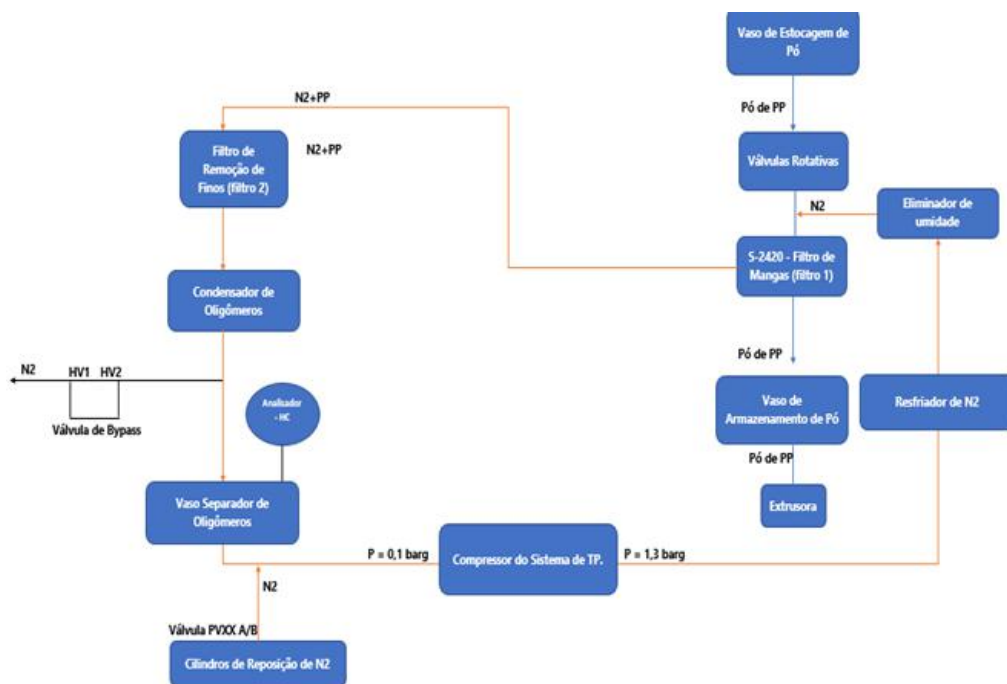


Figura 3.1 Sistema de transporte pneumático. Fonte: Elaboração do autor

O sistema é compreendido por: o transporte de produto (pó de polipropileno) do Vaso de Estocagem 1 até o Vaso de Armazenamento de 2; além do transporte de nitrogênio ao longo de todo o sistema.

Nitrogênio gás é o fluido responsável por conferir a força motriz necessária para que o polímero seja transportado desde o Vaso de Estocagem 1, passando por válvulas rotativas até que seja direcionado ao Vaso de Armazenagem 2. Essa força motriz é oriunda

da pressão fornecida por dois compressores parafusos, a qual é em média 4,3 barg. O Vaso de Armazenamento de Pó 2 tem como objetivo armazenar o pó produzido na polimerização e, assim, evitar a necessidade de parada da reação quando ocorrer parada da extrusora.

O nitrogênio é adicionado ao sistema por meio de cilindros na sucção dos compressores parafuso. Essa corrente, é comprimida, sofre um processo de resfriamento e remoção de umidade, encontra o pó de polipropileno na descarga do Vaso de Estocagem 1 e, então, o transporta para as etapas posteriores já citadas.

Há também a recuperação de nitrogênio no Vaso de Armazenagem 2, através do filtro de mangas instalado no topo do silo de pó (filtro 1). O objetivo do filtro 1 é separar o pó existente na corrente de nitrogênio, de modo que a corrente possa ser reaproveitada no sistema de transporte pneumático. Assim, a corrente de topo desse filtro é direcionada para outro filtro manga. Esse último é um filtro de remoção de finos (filtro 2).

Em seguida, a corrente percorre um resfriador, onde há a condensação de oligômeros presentes no processo. Esses são separados do nitrogênio em um vaso separador de oligômeros. Por fim, o nitrogênio é novamente succionado pelos compressores (pressão de 0,3 barg), finalizando o ciclo (Manual de Operações Braskem – Área 24, 2020).

Conforme observado na Figura 3.1, existe uma tubulação com duas válvulas de controle, HV1 e HV2, para a retirada de nitrogênio do sistema e com um orifício de restrição, o qual permite controlar a retirada de nitrogênio presente. Existe também uma tubulação com válvula borboleta no *by-pass* das duas válvulas de controle. O intuito da válvula no *by-pass* é permitir a operação do sistema quando uma das válvulas de controle estiver em manutenção.

A retirada de nitrogênio ocorre por dois motivos: 1- aumento da pressão, de modo que a retirada possibilite uma despressurização; 2- aumento do teor de hidrocarbonetos, de modo que a retirada ocorra para efetuar a purga.

Originalmente, essa retirada ocorria por meio de uma ação de controle, onde as duas válvulas se abriam caso a pressão do sistema ou o teor de hidrocarbonetos excedessem determinado valor. Contudo, a tubulação de alimentação de nitrogênio possui um diâmetro muito menor que o da tubulação de retirada de nitrogênio, de modo que seja possível ocorrer uma despressurização do sistema caso as válvulas de controle abram simultaneamente.

A alternativa proposta para contornar este problema consistiu na abertura parcial da válvula de *by-pass*. Para tanto, haveria uma menor propensão a atingir determinados teores de hidrocarbonetos (HC) ou pressão do sistema, não ocasionando abertura das válvulas de controle e depressurização do sistema. Contudo, com essa operação, há uma perda contínua de nitrogênio para atmosfera, fato que foi principal ponto de avaliação e estudo neste projeto.

Os parâmetros de teor de HC, abertura da válvula de reposição de nitrogênio e pressão do sistema de transporte pneumático ao longo de 2019, para uma faixa de produção constante, podem ser observados nas Figuras 3.2, 3.3 e 3.4. Deve-se ressaltar que todos os dados foram normalizados, de modo a se preservar a confidencialidade dos dados utilizados.

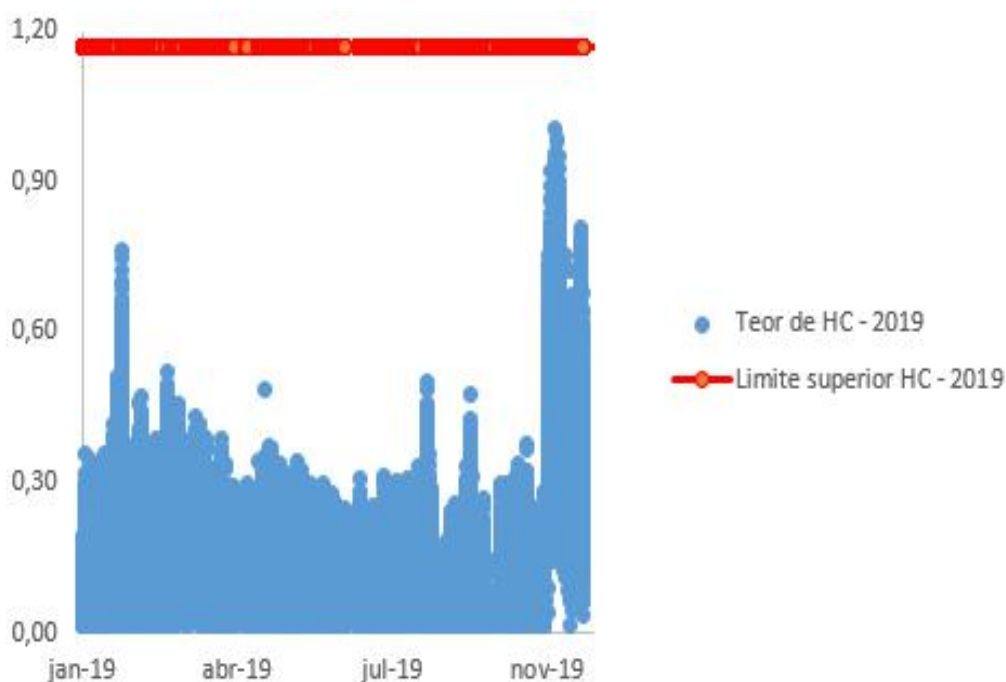


Figura 3.2 Teor de Hidrocarbonetos no Sistema de Transporte Pneumático (TP) em 2019

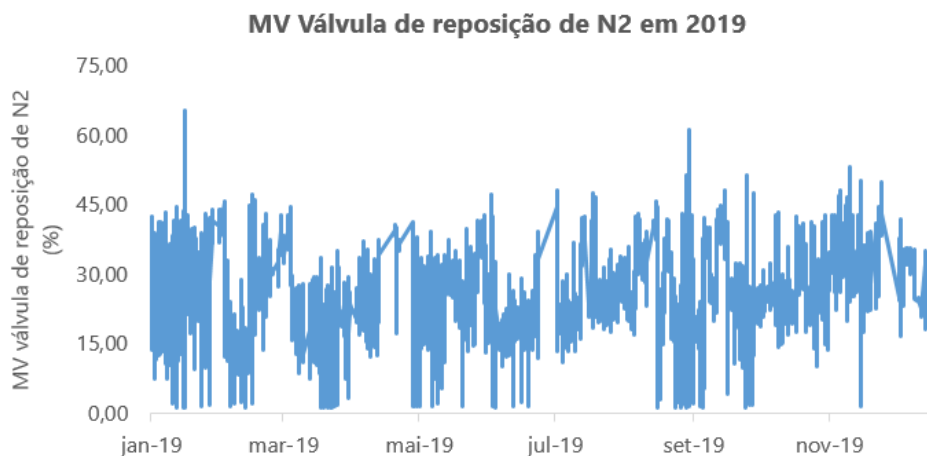


Figura 3.3 Abertura da válvula de reposição de NITROGÊNIO em 2019

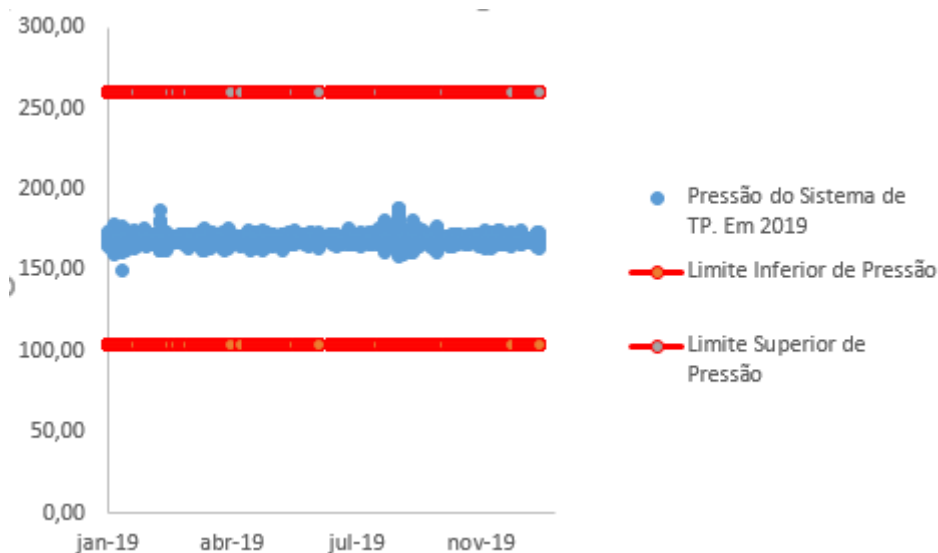


Figura 3.4 Pressão do Sistema de TRANSPORTE PNEUMÁTICO em 2019

Observa-se que ao longo de todo ano de 2019, as variáveis de pressão do sistema e teor de HC operaram longe das faixas limites, indicando uma possibilidade de explorar o sistema de transporte pneumático e reduzir a abertura da válvula de *by-pass*. Já a porcentagem de abertura da válvula de reposição de nitrogênio alterou-se significativamente ao longo do ano, indicando uma renovação frequente e variável de nitrogênio no sistema

É válido ressaltar que a abertura da válvula de *by-pass* possui relação direta com os parâmetros elencados. Quanto tem-se um menor percentual de abertura dessa válvula, é necessário repor menos nitrogênio para o sistema (o que acarreta menor abertura da válvula de reposição e menor consumo de nitrogênio). Além disso, o teor de hidrocarbonetos tenderia a aumentar, uma vez que a purga para atmosfera diminui; e a

pressão do sistema tenderia a aumentar, já que há uma menor perda de carga no sistema. Tais fatores foram verificados experimentalmente e serão abordados no Capítulo 5.

4 METODOLOGIA

4.1. METODOLOGIA DMAIC – SIX SIGMA:

No contexto industrial, para projetos em que os custos sejam decorrentes de despesas operacionais padrões (OPEX), existem dois grandes grupos para resolução de problemas e implementação de melhorias. O primeiro grupo são as Iniciativas *Go-Do*, as quais se referem a medidas onde se conhece de forma clara a causa do problema, e, por isso, são focadas em implementação. Já o segundo grupo são as Iniciativas com Metodologia, nas quais é preciso definir o escopo/problema, identificar e analisar causas, além de estabelecer um padrão de controle (Treinamento *White Belt* Braskem, 2019).

Para o segundo grupo, existem algumas metodologias dependendo da complexidade e aplicabilidade, como Metodologias *Lean*, *Design Thinking* e *Six Sigma*. Para projetos de baixa complexidade, utiliza-se a metodologia *Six Sigma*, a qual foi a escolhida para a realização deste estudo (Grupo Voitto, 2020).

O *Six Sigma* é uma metodologia utilizada na indústria, que surgiu na década de 1990, devido ao aumento de dados estatísticos e à necessidade das empresas em se tornarem mais competitivas. Atualmente, é aplicado para apoiar na condução de projetos de melhoria contínua em processos já existentes na organização e com perspectiva de ganhos financeiros. Por meio da sua utilização, é possível reduzir os custos, aumentar a produtividade, ou até melhorar um processo já existente através da redução da variação do processo (Grupo Voitto, 2020). Isso pode ser observado na Figura 4.1.

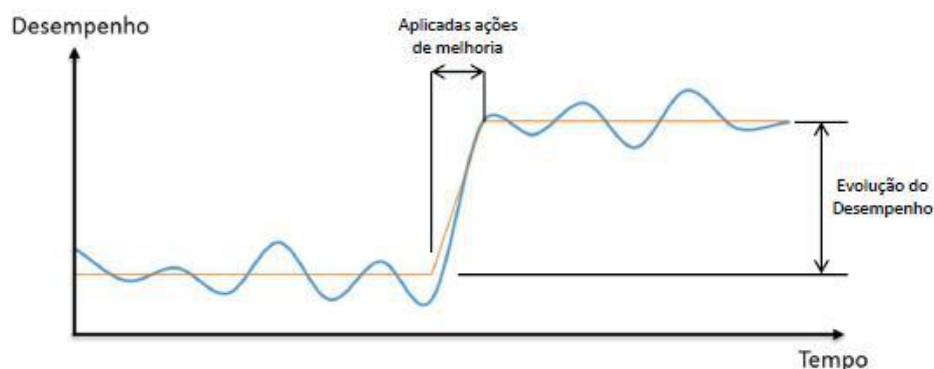


Figura 4.1 Evolução de um processo com aplicação da metodologia *Six Sigma*. Fonte: Braskem, 2019

Segundo Pande, Neuman e Cavanagh, no livro “*The Six Sigma Way*”, o que norteia a metodologia *Six Sigma* são as necessidades do cliente. O cliente pode ser externo à

organização, ou até um determinado setor dentro da fábrica que receberá o resultado da melhoria. No caso deste trabalho, o cliente é a própria unidade produtora de polipropileno, a qual terá um menor consumo de nitrogênio anualmente.

Para a realização dos projetos *Six Sigma*, é utilizada a metodologia DMAIC, onde cada uma das siglas se refere a uma etapa dentro da realização do projeto. Cada etapa deve ser completada, para que se possa evoluir para a etapa seguinte.

As siglas representam as seguintes etapas: D – Definição; M – Medição; A – Análise; I – Implementação; C – Controle, as quais serão detalhadas a seguir.

4.1.1. Definição

Na etapa de Definição (D), busca-se identificar qual processo será melhorado e qual é o problema principal. Nessa etapa, é preciso avaliar as razões pelas quais o projeto é importante para a empresa. Para tanto, dois pontos de análise são muito importantes: avaliação do histórico do desvio ou falha; e a voz do cliente, ou do patrocinador do projeto.

A partir disso, é possível definir o objetivo e o escopo do projeto, delimitando o que está incluído e o que não será abordado. Também são definidas as variáveis de saída, que serão base para a geração de indicadores.

Na etapa de definição, também são incluídas as restrições impostas para o funcionamento do sistema. Além disso, verifica-se nessa etapa se existem projetos similares em outros setores ou fábricas da organização.

Por fim, o Contrato do Projeto é estabelecido para formalizar o desenvolvimento do projeto. Nele, são incluídos: membros da equipe, cronogramas, ganhos (inclusive financeiros), *KPI's*, histórico do problema, escopo e qual a meta a ser atingida.

Impacto financeiro

Quanto ao impacto financeiro, os projetos podem ser divididos entre dois grupos: “*Hard Saving*” e “*Soft Saving*”.

Os projetos *Hard Saving* se referem àqueles que geram ganhos financeiros diretos para a empresa, seja pela redução de custo em algum ponto do processo, ou por aumento da produtividade. Para tanto, este projeto está contemplado na categoria *hard saving*.

Já os projetos *Soft Saving* se referem à benefícios indiretos ou a custos evitados. Tais benefícios também estão presentes neste projeto, como: reduções de impactos ambientais,

já que a redução do envio de nitrogênio para atmosfera impacta também no menor envio de eteno e propeno para esse destino. Outro exemplo de “soft saving” é a operação em uma condição ótima dentro de um processo.

Descrição e Histórico do problema

A definição do problema deve ser feita de modo a ilustrar de forma clara as perdas existentes ou as possibilidades de geração de resultados que não são exploradas. É importante que essa etapa seja mensurável. Nesse ponto, as causas ainda não são informadas.

Com relação ao histórico do problema, é importante que estejam presentes dados e indicadores externos/internos que se refiram à condição de operação anterior ao desenvolvimento do projeto. Nesse sentido, podem-se gerar gráficos e tabelas para se observar tendências de comportamento.

Meta do Projeto e KPI

A meta é o objetivo que se deseja alcançar com a realização do projeto. É muito importante que esteja relacionada a um parâmetro específico, mensurável, relevante e, além disso, que seja atingível e dentro de um período determinado (Modelo SMART).

Já a Sigla KPI se refere a “*Key Performance Indicator*”, ou seja, representa um indicador de performance. Normalmente, se trata de um parâmetro do processo e é sobre ele que a meta será definida.

Escopo do projeto, restrições e suposições

No escopo, são indicados os pontos que serão incluídos e analisados no projeto, como áreas e etapas. Normalmente, é suportado por algumas ferramentas como Matriz Dentro Fora e Diagrama SIPOC, que é um mapa do processo, onde são definidas entradas, saídas, fornecedores, clientes e o processo em si. Em resumo, no SIPOC estão as fronteiras do projeto.

Com relação às restrições e suposições, a partir delas são definidos os limites de operação do projeto e quais as premissas serão adotadas.

4.1.2. Medição

Nessa etapa, os sistemas de medição (instrumentos, equipamentos) são analisados.

Também são definidas todas as causas potenciais (X's) e são avaliados os esforços de uma ação em cada causa, bem como os impactos que essas ações trarão para a saída do projeto (Y). Assim, é possível efetuar a priorização de causas.

Para que exista uma visão completa do processo e que seja possível identificar todas as causas potenciais, existem duas ferramentas que apoiam nessa análise: Mapa do Processo e Diagrama de Ishikawa.

Mapa do processo

É uma visão geral que inclui todas as etapas do processo a ser estudado, incluindo variáveis e parâmetros envolvidos. Nele são levantadas todas as possíveis causas para o problema em questão, já separadas dentro de cada etapa do processo. Por isso, é essencial que uma equipe multidisciplinar esteja envolvida.

Na Figura 4.2, tem-se um exemplo de um mapa de processo. A simbologia nesse caso é padronizada, de modo que os círculos representam o início ou fim do processo, os retângulos representam as etapas, as setas representam conexão. Além disso, o mapa também pode conter losangos, os quais representam decisões.

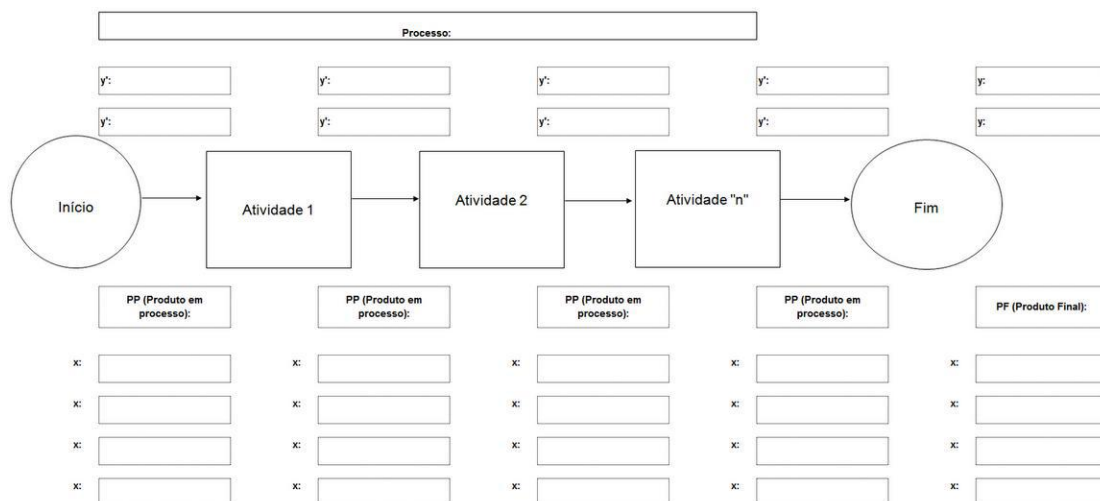


Figura 4.2 Exemplo de um Mapa de Processo. Fonte: Pessoa, 2010

. Diagrama de Ishikawa:

O Diagrama de Ishikawa também é uma metodologia de identificação de causas. Contudo, essas são divididas em seis categorias: meio ambiente, mão de obra, máquinas, materiais, métodos e medição. Nessa etapa do projeto, não se deve identificar efeitos ou ações. Segue um exemplo do Diagrama de Ishikawa na Figura 4.3:

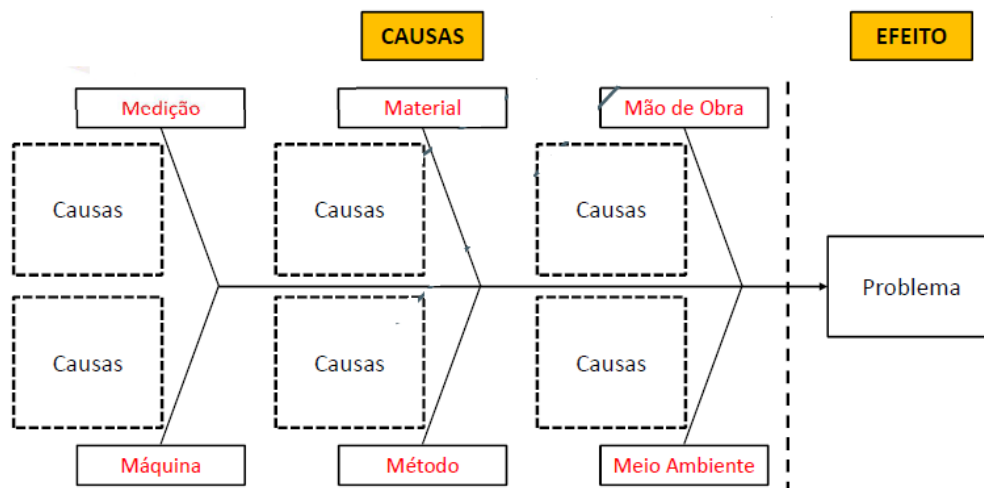


Figura 4.3 Diagrama de Ishikawa. Fonte: Braskem adaptado, 2019

4.1.3. Análise

Na fase de análise, primeiramente, acontece a priorização das causas. Essa etapa ocorre a partir de dois fatores: o potencial impacto de cada X na variável de saída Y; e o esforço existente para se corrigir cada desvio.

Em seguida, cada causa priorizada é investigada e analisada, para verificar se estas influenciam de fato a variável de saída Y.

Por fim, como resultado dessa etapa, tem-se as causas vitais, as quais a equipe irá atuar, para que a probabilidade de desvio no processo seja reduzida.

Matriz de causa e efeito

Como forma de identificar quais causas devem ser priorizadas, pode-se utilizar a Matriz de Causa e Efeito. Essa ferramenta é usada para avaliar cada causa encontrada sob dois aspectos: o impacto sobre o processo e a dificuldade para eliminar cada causa. Nos projetos *Six Sigma*, o objetivo é direcionar os esforços para causas que apresentem um menor esforço e um alto impacto em relação à variável de saída Y.

Matriz de Priorização Causa Efeito			
Índice de Importância do KPI (Consumo de N2 PP5)		10	
Problema associado ao KPI (Consumo de N2 PP5)			
Xs Potenciais		Impacto	Esforço
		Baixo 0-50	Alto 50-100
		Baixo 1-4	Alto 5-8
X01		0	
X02		0	
X03		0	
X04		0	
X05		0	
X06		0	
X07		0	

Figura 4.4 Matriz de Causa e Efeito

Assim, deve-se preencher a Matriz com todas as causas levantadas. Em seguida, cada causa é classificada de 1 a 8, baseando-se no esforço existente para que uma ação seja realizada sobre a causa. De 1 a 4, considera-se um baixo esforço e de 5 a 8, um alto esforço. Por fim, o impacto que a causa tem sobre a variável de saída também é avaliado, em uma escala de 1 a 10: nenhuma relação: 0; baixa relação: 1 a 3; média relação: 4 a 7; alta relação: 8 a 10.

A partir disso, de acordo com os dois critérios avaliados, plota-se o Diagrama de Esforço x Impacto, onde as causas priorizadas serão as existentes no quadrante “Baixo Esforço” x “Alto Impacto”:

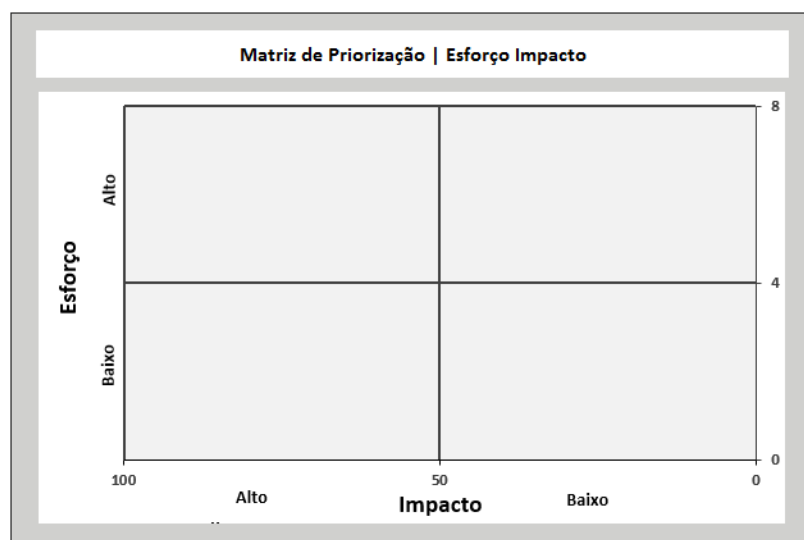


Figura 4.5 Diagrama Esforço x Impacto

Uma vez que os X's foram priorizados, é necessário provar que eles são de fato X's vitais e impactam no KPI e na variável de saída Y. Para tanto, existem algumas metodologias, como:

Gráfico de Pareto, *Timeline*, Gráfico de Regressão, entre outros (Treinamento White Belt Braskem 2019).

4.1.4. Implementação

Na fase de implementação, busca-se apresentar tratativas para as causas identificadas, de modo a reduzir ou eliminar o problema definido na Fase 1 do projeto (Fase de Definição) e atingir a meta definida para o *KPI* do projeto. Nesse sentido, novamente em uma equipe multidisciplinar, são definidas ações para solucionar ou controlar as causas levantadas e elabora-se um plano de ação.

Plano de Ação 5W2H

O Plano de ação 5W2H está descrito na Tabela 4.1 e é uma ferramenta utilizada para formalizar as ações de implementação de melhorias. Nele são abordados pontos como: o que fazer para eliminar a causa; quem será o responsável pela ação; onde essa ação será feita; por qual motivo é preciso eliminar a causa e em que momento (“*What, Who, Where, Why, When*”). Além de outros pontos como quanto custa para realizar a ação e como essa ação será implementada (“*How, How much*”) (Treinamento White Belt Braskem 2019).

Tabela 4.1 Plano de Ação 5W2H

Plano de Ação - 5W2H											
Causa (X's vitais)	O QUE FAZER	QUEM (responsável)	QUANDO (prazo)	PORQUE (JUSTIFICATIVA)	COMO (AÇÃO)	ONDE	QUANTO (custo)	Status			
								25%	50%	75%	100%
x03											
x05											
x07											
x09											

4.1.5. Controle

A etapa de controle é a última etapa do projeto. Nela, há uma avaliação das modificações realizadas e um acompanhamento das variáveis críticas que influenciam na saída Y (X's vitais), além de um monitoramento da própria variável de saída Y. O objetivo é sustentar os resultados alcançados na fase anterior (Implementação) e verificar se as melhorias foram incorporadas na rotina de processo (Braskem, 2019).

Entre os recursos e ferramentas que auxiliam para alcançar um bom controle de processos estão: alarmes, cartas de controle, instruções operacionais e treinamentos. Além dessas alternativas, é elaborado também um Plano de Controle.

Plano de controle

Um plano de controle é uma ferramenta utilizada para formalizar a Fase 5. Consiste em uma tabela contendo as principais informações acerca de como será o monitoramento e as medições.

Os principais pontos definidos nessa etapa são: quais parâmetros serão monitorados; motivos para realizar a medição; especificações de processo; técnicas de medição; responsável pelo monitoramento e o plano de reação caso ocorra um desvio na variável monitorada.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos serão apresentados também a partir da Metodologia DMAIC e serão divididos entre os cinco tópicos previamente citados na sessão de Metodologia. Assim, esses serão: Definição, Medição, Análise, Implementação e Controle.

5.1. DEFINIÇÃO

5.1.1. Cálculo do Consumo de Nitrogênio no Sistema de Transporte Pneumático

Para a realização do trabalho e redução do consumo de nitrogênio do sistema de transporte pneumático, é preciso, primeiramente, estimar a quantidade de nitrogênio perdida antes da implementação das mudanças. Como não existe medição local de vazão (Q) onde há retirada de nitrogênio para atmosfera, realizou-se o cálculo a partir do diferencial de pressão existente na válvula de *by-pass* (Equação 12):

$$Q = f(\Delta P) \text{ (Eq. 12)}$$

Como a válvula envia nitrogênio continuamente para a atmosfera, a pressão de saída da válvula (P_3) é de 1 bar. Entretanto, para se determinar o ΔP na válvula, a pressão

de entrada (P2) também deve ser obtida. Dessa forma, seguiu-se o fluxo descrito na Figura 5.1:

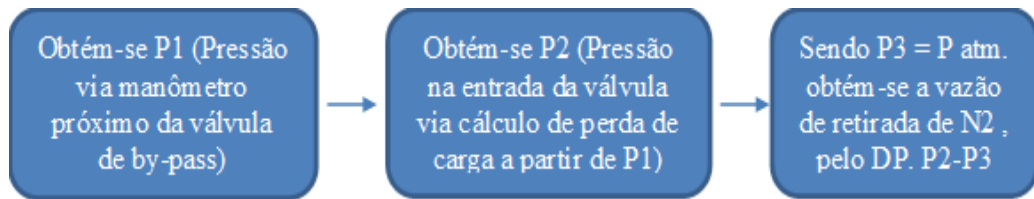


Figura 5.1 Estrutura de cálculo da vazão perdida de nitrogênio no sistema de transporte pneumático

Uma representação das pressões P1, P2 e P3 também pode ser observada na Figura 5.2:

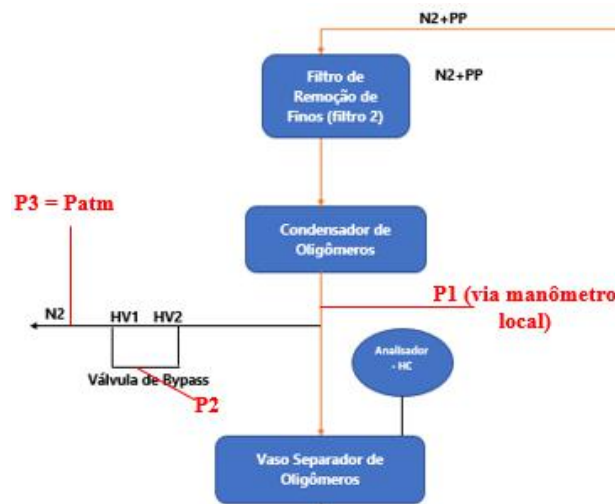


Figura 5.2 Representação dos pontos de obtenção das pressões no Sistema de Transporte Pneumático. Fonte: Elaboração do próprio autor.

O cálculo de P2 foi realizado por meio da aplicação da equação de Bernoulli:

$$\frac{v_1^2}{2g} + z_1 + \frac{P_1}{\rho g} = \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + h_{ll} + h_{ld} + \frac{\Delta P_{equipamentos}}{\rho g} \quad (\text{eq. 13})$$

onde,

- $v_1 = v_2 =$ velocidade do fluido;
- $z_1 =$ altura no ponto 1 = altura do manômetro local;
- $z_2 =$ altura da entrada da válvula de *by-pass*;
- $P_1 =$ pressão via manômetro local;
- $h_{ll} =$ perda de carga localizada devido aos obstáculos presentes;

- h_{ld} = perda de carga distribuída, devido ao atrito do próprio escoamento (considerou-se quatro trechos de tubulação para realização do cálculo);
- g = aceleração da gravidade;
- ρ = massa específica;
- $\Delta P_{equipamentos}$ = diferencial de pressão imposto pelos equipamentos existentes entre os pontos 1 e 2.

A perda de carga dos equipamentos ($\Delta P_{equipamentos}$) é proveniente das folhas de dados de engenharia. Já o cálculo da perda de carga distribuída h_{ld} foi realizado considerando-se os obstáculos existentes nos quatro trechos de tubulação abaixo:

Tabela 5.1 Obstáculos existentes entre os pontos 1 e 2

Trechos	Acidentes
1	Válvula borboleta (1); Joelhos 90° (2); Tê 90° (1); Entrada de equipamento (1).
2	Válvula borboleta (1) Joelhos 90° (2) Tê 90° (1) Entrada/saída de equipamento (2) Entrada de tubulação (1) Redução de diâmetro - 14"-12" (1)
3	Saída de Equipamento (1) Expansão de diâmetro - 12"-14" (1)
4	Joelho 90° (1) Tê 90° (1) Redução de diâmetro - 14"-10" (1)

A partir disso, obtém-se $P_2 = 0,0608$ bar. Por P_2 , sabe-se a diferença de pressão existente na válvula de *by-pass* (P_2-P_3). Por consequência, é possível determinar a vazão de saída de nitrogênio pela válvula.

Primeiramente, realizou-se o cálculo de vazão através de válvulas, considerando o coeficiente de abertura da válvula. Esta equação foi apresentada no Capítulo 2:

$$q'_h = 19,31Yd^2 \sqrt{\left(\frac{\Delta PP_2}{KTSg}\right)} \text{ Eq. (9)}$$

Contudo, os resultados obtidos são muito discrepantes, quando comparados ao consumo de nitrogênio reportado pela fábrica no final de cada ano. Assim, os cálculos foram refeitos utilizando-se outra premissa.

Como a válvula de *by-pass* opera parcialmente aberta e impõe uma restrição ao fluxo, considerou-se o escoamento de fluidos compressíveis através de bicos/orifícios e bocais (eq. 3-22; CRANE. Seção 3-5). O percentual de abertura da válvula, por sua vez, foi considerado no valor do diâmetro (d_1). Assim, se o percentual de abertura da válvula é de 20%, por exemplo, $d_1 = 0,2D$. Segue a equação:

$$q'_h = 19,31Yd_1^2C\sqrt{\left(\frac{\Delta pP_2}{(TSG)}\right)} \text{ Eq. (14)}$$

Nesse sentido, C é função do regime de escoamento existente no sistema, do diâmetro da tubulação e da abertura da válvula e é obtido pela Figura 2.9:

Assim, pelo percentual médio de abertura da válvula de *by-pass* e por Reynolds, encontra-se o coeficiente de vazão C (tabela 5.2).

Tabela 5.2 Parâmetros para cálculo do coeficiente de vazão C

Abertura válvula de <i>by-pass</i> (%)	Re	C
20	$6,3 \times 10^4$	0,528

Já Y também foi obtido graficamente pela Figura 2.10 e é função do fluido, do ΔP na válvula e do percentual de abertura da válvula (β , no gráfico):

Assim, foi possível determinar a vazão perdida de nitrogênio no transporte pneumático a partir da válvula de *by-pass* do sistema. Observa-se que a vazão de saída é diretamente proporcional ao percentual de abertura da válvula.

Ainda existem dois aspectos a serem considerados para determinar o consumo de nitrogênio (m^3) em 2019. Primeiramente, o tempo em que a válvula esteve aberta com envio de nitrogênio para atmosfera; e em segundo lugar, o percentual de abertura da válvula de *by-pass*.

Tempo de operação do sistema de transporte pneumático

Como o sistema de transporte pneumático não deixa de operar nem em condições de interrupção da reação, o tempo de operação será a soma do tempo de polimerização em curso adicionado ao tempo de polimerização parada.

Percentual de abertura da válvula para *grades* homopolímero e copolímero

O percentual de abertura da válvula de *by-pass* é fixo para um mesmo tipo de produto (*grade*), mas se diferencia quando o produto sintetizado no reator é um homopolímero e quando este produto é um copolímero randômico. Para *grades* que não possuem adição de eteno (homopolímeros), a válvula possui abertura de 20%. Já para *grades* randômicos (com adição de eteno), a válvula possui abertura de 26,7%.

Essa diferença no percentual de abertura se deve ao maior teor de hidrocarbonetos presentes no transporte pneumático quando se produz *grades* randômicos. Como eteno é um composto de menor tamanho de cadeia, a quantidade desse gás presente no processo não é separada de forma tão eficiente quanto o propeno, estando presente em maior quantidade no transporte pneumático.

Tendo em vista que uma das funções da retirada de nitrogênio do sistema é não permitir que os hidrocarbonetos se acumulem, opta-se por abrir mais a válvula de *by-pass* para produtos copolímeros.

Estimativa final de consumo de nitrogênio no Sistema de Transporte Pneumático

A partir das considerações descritas acima e das variáveis apresentadas na Tabela 5.3, é possível obter o consumo de nitrogênio (m^3) através da equação 16.

Tabela 5.3 Parâmetros para cálculo do consumo de nitrogênio

q'_{hHomo} (m³/h)	Vazão de nitrogênio perdida no Sistema de TP. em campanhas de homopolímero
$q'_{hRandom}$ (m³/h)	Vazão de nitrogênio perdida no Sistema de TP. em campanhas de copolímero
$t_{prod.Homo}$ (h)	Tempo de produção de homopolímero
$t_{prod.Random}$ (h)	Tempo de produção de copolímeros
$t_{par.Homo}$ (h)	Tempo de fábrica parada em campanhas de homopolímero
$t_{par.Random}$ (h)	Tempo de fábrica parada em campanhas de copolímeros

$$Consumo = q'_{hHomo}(t_{prod_{Homo}} + t_{par_{Homo}}) + q'_{hRandom}(t_{prod_{Random}} + t_{par_{Random}}) \text{ Eq. (15)}$$

5.1.2. Histórico da Perda de Nitrogênio no Sistema de Transporte Pneumático

Tendo em vista a expressão descrita na Equação 15, foi possível estimar a quantidade de Nitrogênio enviada à atmosfera em 2019 nessa unidade produtora de polipropileno. Os dados foram normalizados, mas a partir da Figura 5.3 e da Tabela 5.3 é possível observar o consumo de nitrogênio:

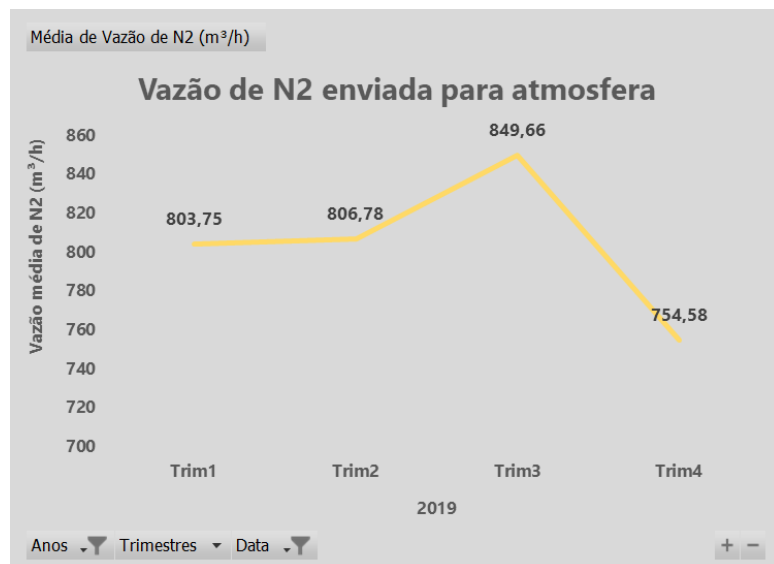


Figura 5.3 – Envio médio de nitrogênio para atmosfera no Sistema de transporte pneumático em 2019.

A Tabela 5.4 apresenta o consumo de nitrogênio para o ano de 2019 tendo como base a Equação 15.e Seção 5.1.1.

Tabela 5.4 Quantidade de nitrogênio enviada à atmosfera no sistema de transporte pneumático em 2019

	Q'_{hHomo} (m ³ /h)	$Q'_{hRandom}$ (m ³ /h)	$t_{prod.Hom}$ o (h)	$t_{prod.Rando}$ m (h)	$t_{par.Homo}$ (h)	$t_{par.Rando}$ m (h)
Valores médios (2019):	183	326	5478	2333	687,5	259
Consumo Previsto (m ³):	1.973.278,5					

5.1.3. Escopo do Projeto e Metas

A partir da quantidade de nitrogênio liberada na atmosfera em 2019 e das condições de operação atual, o objetivo específico do projeto foi alcançado. Além disso, foram definidas restrições e metas de captura.

Primeiramente, a partir da Matriz Dentro-Fora, o projeto foi restrito à apenas uma utilidade (nitrogênio) e a um único sistema (sistema de transporte pneumático). Em seguida, foram feitas restrições e premissas.

Como premissa, tem-se o cálculo de captura financeira tendo como base uma referência de nitrogênio gás, já que o nitrogênio é admitido na forma gasosa no sistema.

Como restrições, tem-se o monitoramento da pressão do Sistema de transporte pneumático e o teor de hidrocarbonetos. A redução do consumo de nitrogênio deve ocorrer sem que exista alteração significativa dessas duas variáveis. Para tanto, os compressores não devem parar por baixa pressão na sucção (pressões inferiores a 104 mbar), nem por sobrepressão do sistema (pressões superiores a 260 mbar). Já os teores de hidrocarboneto não devem exceder o limite superior de 1,17%, que poderia propiciar uma condição de explosividade.

Baseando-se no Diagrama SIPOC, foram definidos fornecedores, entradas, saídas, processos e consumidores do projeto em questão. Tais parâmetros já foram explicitados no Capítulo 3 – Transporte Pneumático de Polipropileno- , mas seguem representados na Figura 5.4:

S Fornecedores	I Entradas	P Processo	O Saídas	C Clientes
<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de Baixa Pressão 	<ul style="list-style-type: none"> • Vaso de Estocagem de pó 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de Transporte Pneumático com Nitrogênio 	<ul style="list-style-type: none"> • Vaso de armazenamento de pó de PP 	<ul style="list-style-type: none"> • Extrusão

Figura 5.4 Diagrama SIPOC – Melhoria do consumo de nitrogênio no sistema de transporte pneumático

Por fim, foi definido como KPI do projeto o consumo de nitrogênio do sistema de transporte pneumático liberado à atmosfera, sendo atribuído uma meta de reduzi-lo em 18,78 %. Esse valor foi calculado a partir do consumo que se obteria caso a abertura da válvula de *by-pass* de envio de nitrogênio para atmosfera fosse reduzida em 7 % para campanhas de *grades* randômicos.

5.2. MEDIÇÃO

5.2.1. Análise dos Sistemas de Medição dos Parâmetros Chave

Conforme descrito no Capítulo 3 “Transporte Pneumático de Polipropileno”, além da abertura da válvula de *by-pass* de envio de nitrogênio para atmosfera, a qual é controlada manualmente por operadores, existem 2 parâmetros que influenciam no consumo de nitrogênio no sistema de transporte pneumático: pressão do sistema e teor de hidrocarbonetos.

Nesse sentido, é fundamental que os valores desses parâmetros sejam registrados de forma precisa e apresentem confiabilidade. O teor de hidrocarbonetos é obtido por analisadores *online*, os quais fornecem medições a partir de cromatógrafos. Já a pressão do sistema, é regulada pela reposição de nitrogênio para o sistema, que é feita por duas válvulas (A e B), representadas na Figura 3.1.

Ambos os equipamentos (analisadores e sensor de pressão) foram analisados em conjunto com equipes de Laboratório e de Instrumentação.

Para as válvulas de reposição de nitrogênio, foram identificados dois planos de calibração: plano de teste funcional e plano por assinatura. O plano de teste funcional avalia a resposta da válvula quando demandada. O plano por assinatura fornece uma curva de

pressão por deslocamento da válvula, tanto na abertura, quanto no fechamento, de modo a informar se o atrito da válvula continua próximo ao atrito da condição de projeto.

Já para os analisadores de hidrocarbonetos, observa-se a existência de um plano de calibração. Dessa forma, esperava-se existir confiabilidade no registro de medição dessa variável. Contudo, a partir de relatos da equipe do Laboratório, identificou-se a necessidade de ajustes no sistema de amostragem dos analisadores.

5.2.2. Levantamento das causas

A partir da identificação do problema de alto consumo de nitrogênio no sistema de transporte pneumático, foram identificadas 14 causas (X's) potenciais, as quais foram verificadas na etapa de Análise. O Mapa do Processo está disposto na Figura 5.7 e os resultados das análises encontram-se na Seção 5.3 – Análise.

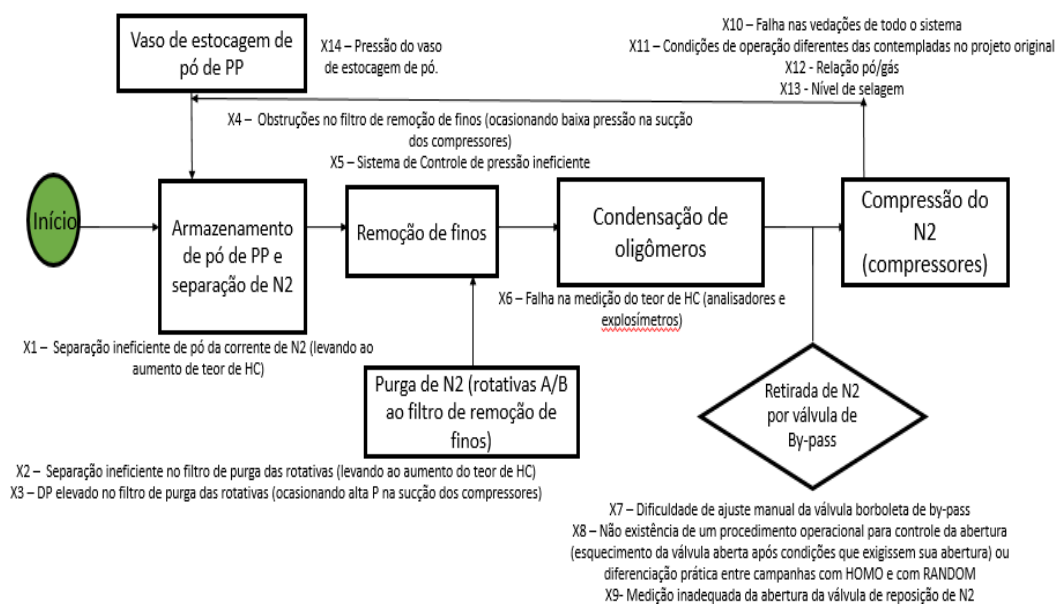


Figura 5.5 Mapa do Processo de Transporte Pneumático de nitrogênio

O Diagrama de Ishikawa também foi utilizado, com o objetivo de classificar as causas identificadas. Tal representação é apresentada na Figura 5.8:

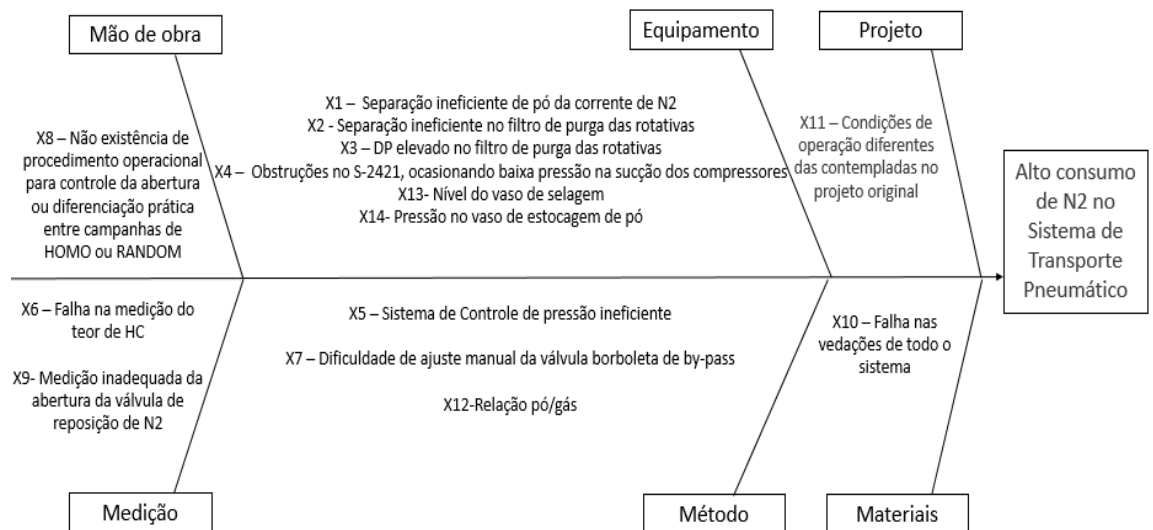


Figura 5.6 Diagrama de Ishikawa do transporte pneumático de nitrogênio

5.3. ANÁLISE

5.3.1. Priorização das Causas

Para decidir sobre quais causas é necessário atuar, utilizou-se a Matriz Esforço-Impacto, a qual está representada na Figura 5.7. Assim, as causas priorizadas (X's) foram aquelas que possuíam alto impacto sobre a variável de saída Y (consumo de nitrogênio no Sistema de transporte pneumático) e baixo esforço de atuação.

Índice de Importância do KPI (Consumo de Problema)		10			Impacto	Esforço
					Alto	Baixo
X01	Separação ineficiente de pó da corrente de N2	2			20	8
X02	Separação ineficiente no filtro de purga das rotativas	2			20	5
X03	DP elevado no filtro de purga das rotativas	3			30	5
X04	Obstruções no filtro de remoção de finos	5			50	5
X05	Sistema de Controle de pressão ineficiente	7			70	4
X06	Falha na medição do teor de HC	7			70	2
X07	Dificuldade de ajuste manual da válvula borboleta de by-pass	9			90	3
X08	Não existência de um procedimento operacional para controle da abertura ou diferenciação prática entre campanhas de HOMO e RANDOM	9			90	1
X09	Medição inadequada da abertura da válvula de reposição de N2	8			80	3
X10	Falha nas vedações de todo o sistema	3			30	3
X11	Condições de operação diferentes das contempladas no projeto original	9			90	6
X12	Relação pó/gás	8			80	3
X13	Nível do vaso de selagem	8			80	3
X14	Pressão do vaso de estocagem de pó	8			80	3

Figura 5.7 Resultado das análises dos X's potenciais

A Matriz de Esforço-Impacto está representada na Figura 5.8. A partir dela são identificados os efeitos que serão priorizados para melhorar o consumo de nitrogênio no sistema de transporte pneumático.

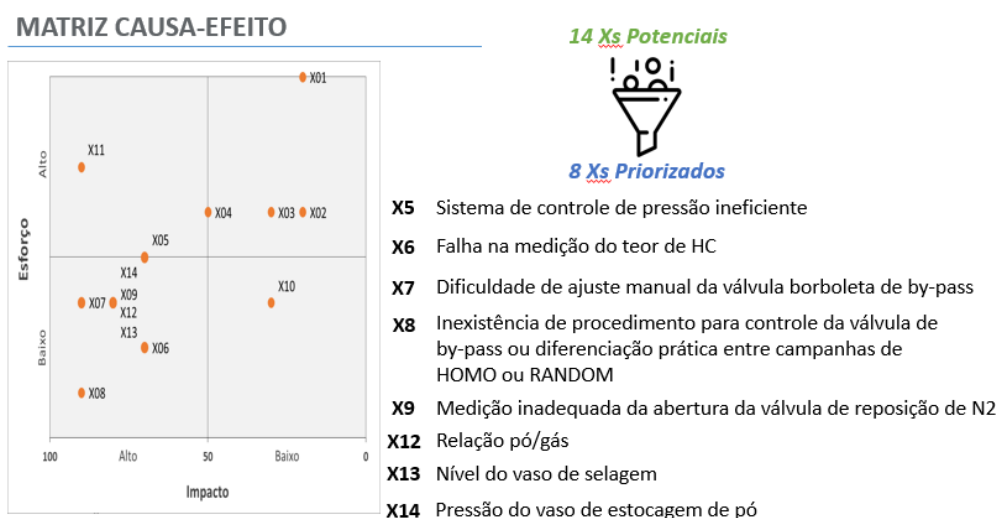


Figura 5.8 Matriz de Esforço-Impacto – Melhora do consumo de nitrogênio do sistema de transporte pneumático

5.3.2. Avaliação das Causas

A partir das 8 causas priorizadas, cada uma delas foi investigada individualmente, de modo a verificar-se há relação entre o que foi apresentado e a variável de saída Y.

Razão pó/gás

A Razão pó/gás representa uma razão entre a vazão de polímero produzido no reator e a vazão de propeno utilizada para “arrastar” esse pó até a entrada do vaso de estocagem de pó, que está localizado próximo a entrada do sistema de transporte pneumático. Dessa forma, quanto maior a razão pó/gás, menos propeno de arraste tem-se em relação à quantidade total de polímero. Consequentemente, o teor de hidrocarbonetos também diminui.

Entretanto, a quantidade de hidrocarbonetos presentes também é função do tipo de produto sintetizado no reator. *Grades* com adição de eteno, possuem maior teor de hidrocarbonetos, uma vez que essas moléculas são menores e tendem a ser mais arrastadas. Dessa forma, a razão pó/gás também é função do tipo de *grade* produzido.

É válido ressaltar também que a razão pó/gás apresenta um limite superior, denominado “razão de carregamento máxima”. Quando esse limite é alcançado, tem-se a mudança do tipo de transporte: o pó deixa de ser transportado em fase pneumática e começa a ser transportado no regime de fase densa.

Assim, avaliou-se o teor de hidrocarbonetos no sistema de transporte pneumático em função da razão pó/gás aplicada, em 2019. Os resultados são representados de forma global, na Figura 5.9 e nas Figuras 5.10, 5.11 para *grades* homopolímero e randômicos separadamente. Em ambas as figuras, o termo “razão de carregamento” se refere ao parâmetro “razão pó/gás”.

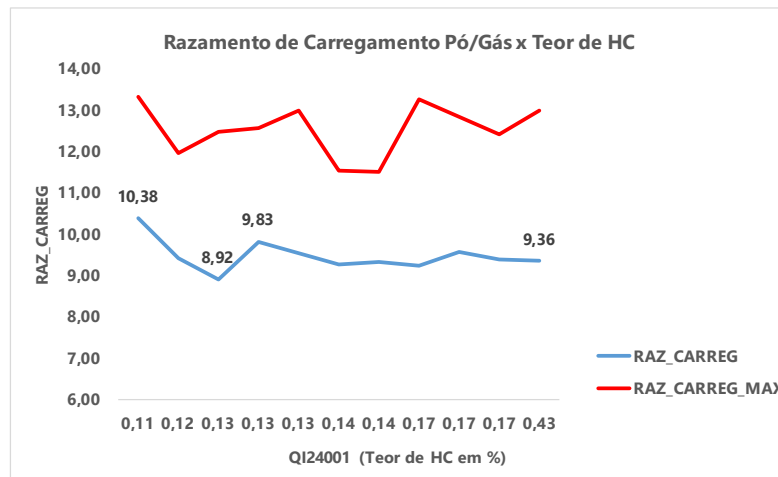


Figura 5.9 Razão Média de Carregamento Pó/Gás em função do Teor de HC em 2019

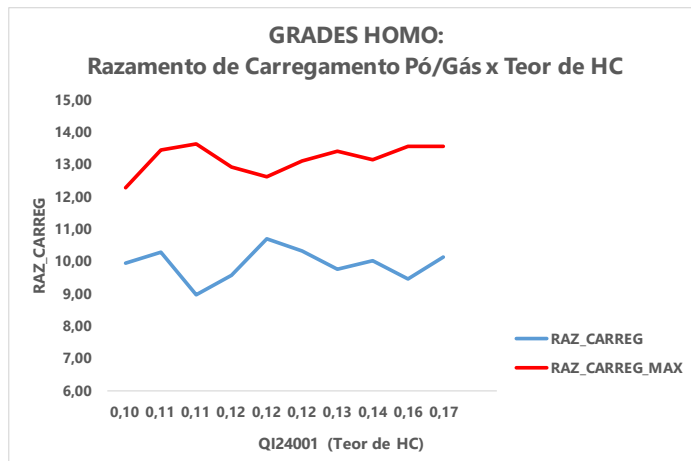


Figura 5.10 Razão Média de Carregamento Pó/Gás em função do Teor de HC em 2019, para *grades* Homopolímeros

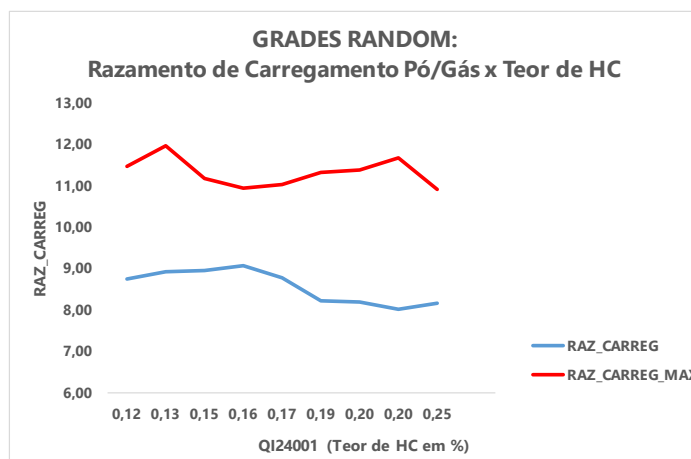


Figura 5.11 Razão Média de Carregamento Pó/Gás em função do Teor de HC em 2019, para *grades* Random

A partir dos resultados obtidos, observa-se que as condições de operação acontecem em uma faixa distante da razão de carregamento máxima. Embora deva-se ter o cuidado de não atingir o transporte em fase densa, o qual é obtido quando atinge-se a razão de carregamento máxima, é possível se aproximar ainda mais das condições de operação limite, de modo a se reduzir o teor de hidrocarbonetos no sistema de transporte pneumático.

Assim, a razão pó/gás foi considerada como sendo uma causa vital dentro do processo de redução do consumo de nitrogênio no sistema de transporte pneumático.

Como tratativa, deve-se almejar a relação pó/gás em 80 % do valor da razão de carregamento máxima. Com isso, a variável estará em uma condição de operação superior à que existe hoje e o teor de HC no sistema de transporte pneumático será menor.

Peso/nível do vaso de selagem de pó

O vaso de selagem de pó tem como objetivo acumular determinada quantidade de polímero para reduzir a passagem de gases para o transporte pneumático. Para tanto, quanto maior o peso do vaso, menor o teor de hidrocarbonetos presente no sistema de transporte pneumático. Assim, há um limite inferior para o processo.

Contudo, também existe um limite superior que é definido a partir de condições de segurança de processo. Se esse limite superior é atingido, um alarme de nível alto é acionado.

Assim, avaliou-se o teor de hidrocarbonetos em função do peso do vaso, ao longo do ano de 2019. O resultado global é apresentado na Figura 5.12 e os resultados para *grades* homopolímero e randômicos são apresentados separadamente nas Figuras 5.13 e 5.14.

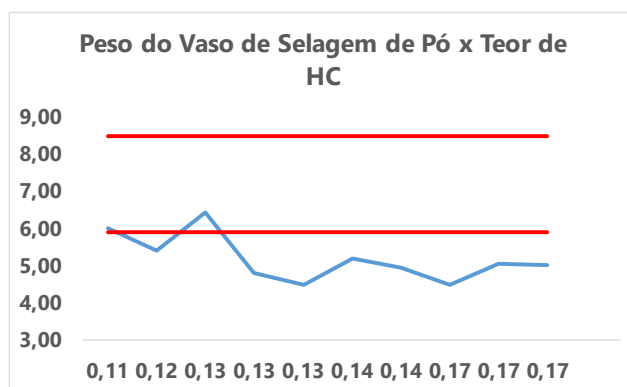


Figura 5.12 – Peso do Vaso de Selagem de Pó em função do Teor de HC em 2019

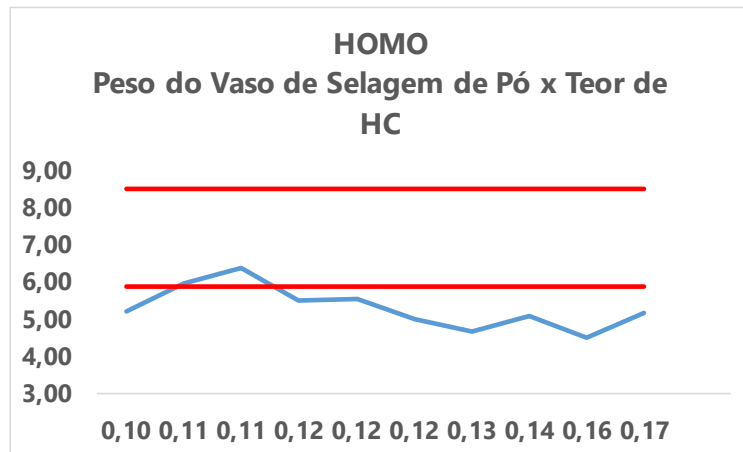


Figura 5.13 Peso do Vaso de Selagem de Pó em função do Teor de HC em 2019, para *grades* Homopolímeros

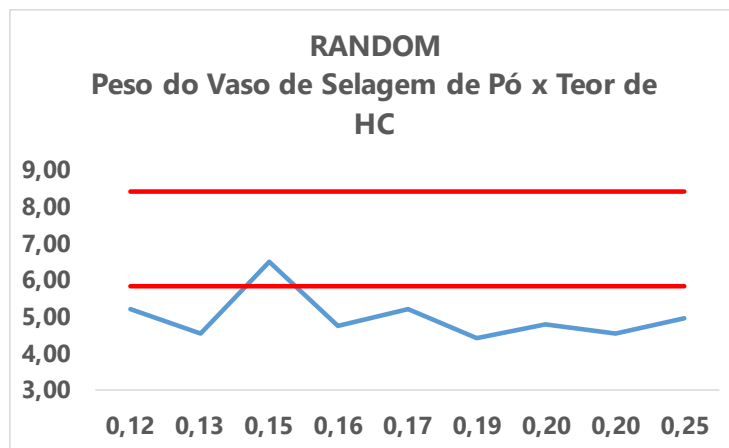


Figura 5.14 Peso do Vaso de Selagem de Pó em função do Teor de HC em 2019, para *grades Random*

A partir dos resultados obtidos, observa-se que as condições de operação ocorreram abaixo do limite inferior em 2019, o que pode contribuir para maior presença de gases no transporte pneumático e, conseqüentemente, para um maior teor de hidrocarbonetos nesse sistema.

A partir do histórico operacional do vaso de selagem de pó, identificou-se que a operação abaixo do limite inferior ocorreu devido à descalibração do instrumento que indica nível alto no vaso. Para evitar falsos alarmes de alto peso, decidiu-se operar com menor nível. Como em 2020, o instrumento foi recalibrado, atualmente, é possível operar dentro dos limites especificados, o que corrige o comportamento dessa variável de peso.

Assim, o peso de pó do vaso de selagem foi considerado como sendo uma causa vital dentro do processo de redução do consumo de nitrogênio no sistema de transporte pneumático. Como tratativa, sugere-se o monitoramento contínuo dessa variável através

do programa de monitoramento da fábrica. Como já existem limites inferior e superior para o peso do vaso e como o instrumento de nível alto foi recalibrado, é possível operar dentro das condições de operação alvo.

Pressão do vaso de estocagem de pó

O vaso de estocagem de pó é pressurizado constantemente com nitrogênio, para possibilitar o arraste de gases presentes (principalmente propeno) e consequente queima desses no “flare”. Tal pressão deve ser a mínima possível, de modo que a retirada de gases do pó tenha eficiência máxima. Quando a pressão aumenta, a eficiência desse processo é menor e mais hidrocarbonetos são arrastados para o transporte pneumático.

Assim, também se avaliou a pressão do vaso de estocagem de pó em 2019. Os resultados são representados na Figura 5.15.

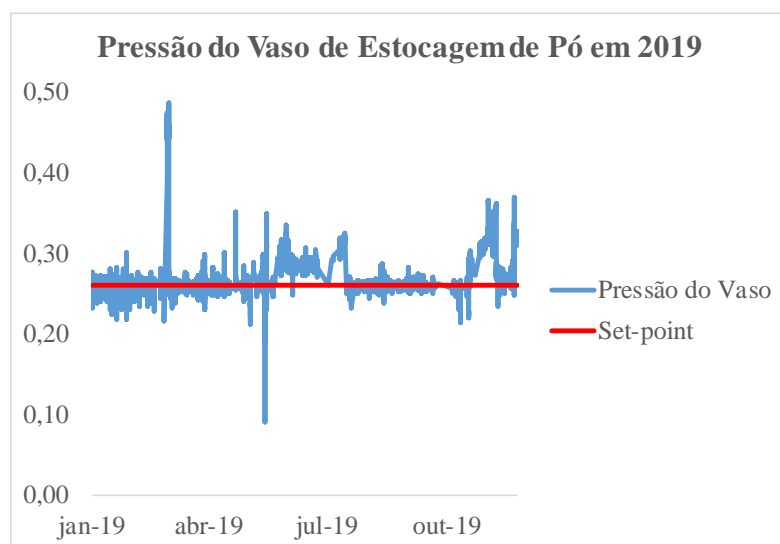


Figura 5.15 Pressão do Vaso de Estocagem em 2019

A partir dos resultados obtidos, observa-se que as condições de operação variaram significativamente em 2019, o que pode contribuir para retirada de gases ineficiente dentro do processo. Assim, o teor de hidrocarbonetos também pode aumentar, uma vez que a pressão ficou distante do valor pré-estabelecido em alguns momentos.

Nesse caso, a pressão do vaso de estocagem de pó foi considerada como sendo uma causa vital dentro do processo de redução do consumo de nitrogênio no sistema de transporte pneumático. Como tratativa, está a inserção dessa variável no programa de

monitoramento da fábrica, além da criação dos limites inferior e superior como sendo $\pm 0,02 \text{ kgf/cm}^2$ em relação ao *set-point*.

Mau funcionamento da válvula de reposição de nitrogênio no sistema de transporte pneumático

A válvula de reposição de nitrogênio possui como finalidade permitir a renovação de gás dentro do sistema. Além disso, é possível que exista o fornecimento de nitrogênio para que os compressores transfiram o pó do vaso de estocagem para o vaso de armazenamento de pó. Para tanto, as ações do controle dos parâmetros de pressão e de teor de hidrocarbonetos acontecem com a utilização da válvula de reposição.

Nesse sentido, é fundamental que essa válvula esteja calibrada, atue de forma precisa e esteja na posição necessária quando demandada.

Como visto na seção de 5.2, as válvulas de reposição de nitrogênio apresentam planos de calibração funcional e por assinatura, os quais estão vigentes. Dessa forma, o mau funcionamento das válvulas de reposição não é considerado uma causa vital, uma vez que não contribui para maior consumo de nitrogênio.

Falhas nos analisadores de hidrocarbonetos do sistema

Outro equipamento avaliado foi o analisador de hidrocarbonetos do sistema. Como um aumento do teor de hidrocarbonetos além do limite superior gera prejuízos na segurança do processo, existe uma malha de controle de processos para que ocorra a abertura da válvula de retirada de nitrogênio do sistema (válvula de *by-pass*) baseando-se no teor de HC indicado pelos analisadores. Se esse teor aumenta, tem-se maior abertura na válvula.

Logo, a medição dessa variável deve ser adequada, de modo a garantir que ocorra uma operação segura e que a maior abertura da válvula ocorra só em condições de necessidade comprovada.

Apesar dos analisadores possuírem planos de calibração, conforme visto na seção 5.2, a equipe do laboratório reportou uma não confiabilidade do instrumento em 2019. Já em 2020, esse sistema sofreu uma reestruturação, conforme Figura 5.16.

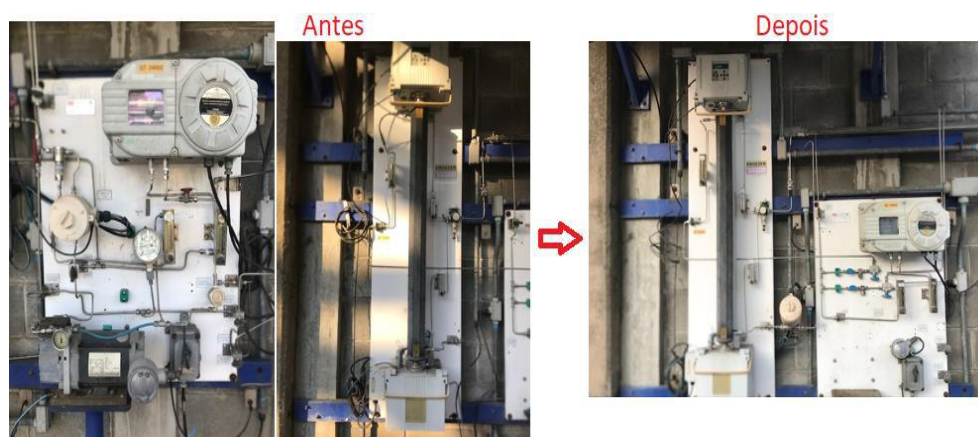


Figura 5.16 Antes e Depois – Reestruturação dos Analisadores de HC

Assim, apesar do desvio ter sido corrigido, a falha nos analisadores de hidrocarboneto foi considerada como sendo uma das causas vitais para o maior consumo de nitrogênio.

Inexistência de procedimento operacional para abertura da válvula de *by-pass* e não diferenciação prática entre campanhas de *grades* com ou sem adição de eteno

A partir de relatos dos operadores da fábrica, verificou-se a não existência de um procedimento operacional para a abertura da válvula de *by-pass*.

Tendo em vista verificações de abertura da válvula em cinco dias distintos de operação, para *grades* homopolímero e randômicos, tem-se a comprovação desse fato. Conforme mostra a Tabela 5.5, a abertura da válvula de *by-pass* não segue o padrão estabelecido de 20 % de abertura para *grades* homopolímeros e 26,7 % de abertura para *grades* randômicos.

Tabela 5.5 Abertura da válvula de *by-pass* de retirada de nitrogênio em 5 dias de operação

	Abertura Válvula de By-pass:	Classificação:
Dia 1	20%	RANDOM
Dia 2	27%	RANDOM
Dia 3	27%	RANDOM
Dia 4	27%	RANDOM
Dia 5	29%	HOMO

Assim, a inexistência de procedimento operacional para abertura da válvula de *by-pass* e não diferenciação prática entre campanhas de *grades* com ou sem adição de eteno foi

considerada como sendo um dos X's vitais para um maior consumo de nitrogênio no sistema de transporte pneumático.

Malha de controle ineficiente

Para entender o funcionamento do sistema de transporte pneumático, tem-se a representação do fluxo na Figura 5.17:

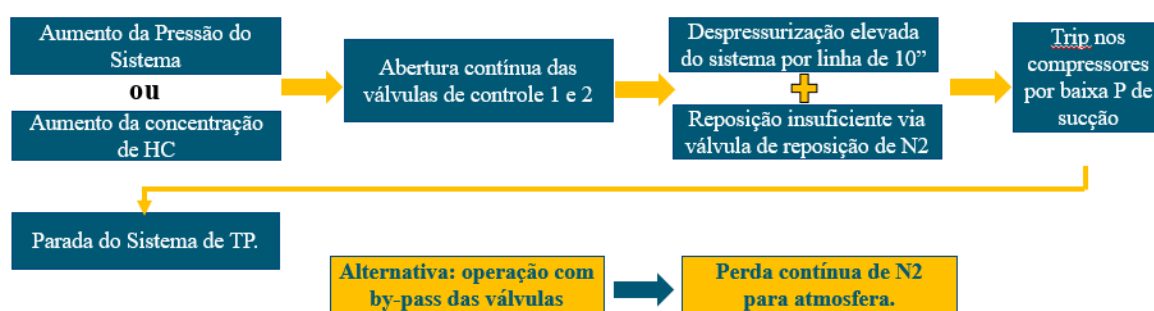


Figura 5.17 Estratégia de Controle do Sistema de Transporte Pneumático x Alternativa Implementada

Com base no fluxo acima, verifica-se um problema claro quando as válvulas de controle 1 e 2 são abertas continuamente. A saída de nitrogênio ocorre por uma tubulação de 10'' de diâmetro e a reposição ocorre por uma tubulação de 2'' de diâmetro.

Como vazão é proporcional ao diâmetro da tubulação, quando há despressurização do sistema, não há reposição de nitrogênio suficiente para compensar o alívio para a atmosfera. Para tanto, há pressão baixa no sistema de transporte pneumático e parada dos compressores, interrompendo o transporte.

Tendo em vista esse problema, a operação atualmente ocorre utilizando-se a abertura da válvula de *by-pass*. Assim, acredita-se não existir aumento da pressão ou do teor de HC suficientes para ocasionar abertura das válvulas de controle.

Como proposta de solução, sugere-se que a abertura das válvulas de controle ocorra em valores de *set-points* distintos e por tempos pré-definidos. Dessa forma, a válvula se fecha após certo tempo de abertura, de modo a não permitir queda de pressão no sistema.

Já a válvula de *by-pass* poderia ser fechada, o que reduziria significativamente o consumo de nitrogênio, uma vez que não existiria uma perda contínua no sistema de transporte pneumático.

Portanto, o sistema de controle ineficiente foi considerado como sendo uma das causas vitais para o maior consumo de nitrogênio no sistema de transporte pneumático.

5.4. IMPLEMENTAÇÃO

5.4.1. Plano de ação 5W-2H:

O plano de ação 5W-2H foi realizado para solucionar os desvios existentes a partir das causas vitais levantadas. Segue a representação na Tabela 5.6, sem a coluna do “Quem”, por questões de discricção, e a coluna do “Por que?”, uma vez que as justificativas já foram apresentadas anteriormente neste relatório.

Tabela 5.6 Plano 5W-2H para a Melhoria no Consumo de NITROGÊNIO no Sistema de Transporte Pneumático

CAUSA	O QUE FAZER	QUANDO	COMO	QUANTO	Status				
					20%	40%	60%	80%	100%
Sistema de controle de pressão ineficiente	Alterar a malha de controle para que a abertura das válvulas de controle ocorra para um dado tempo t pré-definido. Avaliar resultados para nova condição.	mai-21	Alteração da lógica de controle via SDCD e monitoramento por SDCD e PI após implementação.	0					
Falha na medição do Teor de HC	Acionar laboratório para fazer uma reestruturação dos analisadores.	set-20	Recalibração de instrumentos; teste de confiabilidade.	0	X	X	X	X	X
Inexistência de proced. p/ controle da válvula de by-pass ou diferenciação prática...+ Dificuldade de ajuste manual da válvula	Definir abertura da válvula de by-pass fixa em 20% até implementação da nova ação de controle	out-20	Criar procedimento operacional de abertura dessa válvula. Treinar operadores. Ajustar a abertura da válvula de by-pass como sendo fixa (o mais próximo possível de 20%).	0	X	X			
Relação pó/gás	Estabelecer um limite inferior de operação como sendo 80% da razão pó/gás de carregamento máxima.	out-20	Definir o limite inferior de 80% da razão de carregamento pó/gás máxima. Inserir esse limite no Software Online. Fazer acompanhamento contínuo.	0	X	X	X		
Peso do Vaso de Selagem	Trabalhar dentro das condições de operações estabelecidas para esse vaso.	out-20	Monitorar continuamente o peso do vaso por software online, para que não haja operação abaixo do limite inferior.	0	X	X	X	X	
Pressão do Vaso de Estocagem	Estabelecer o valor de 0,27 kgf/cm ² como sendo o de referência de operação para o vaso.	out-20	Inserir variável com limites de operação dentro do Software Online. Monitorar continuamente.	0	X	X			

Face do disposto acima, observa-se que a maior parte das ações será concluída até outubro de 2020, com algumas etapas já concluídas até o momento (coluna *Status*). Essa é chamada de Fase 1 do projeto, ou solução de curto prazo.

Tal etapa contempla a alteração do percentual de abertura da válvula de retirada de nitrogênio do sistema. Essa medida ocorre porque o consumo de nitrogênio é função da quantidade de nitrogênio perdida para a atmosfera, que, por sua vez, é função da abertura da válvula borboleta.

Para essa fase, os resultados da ação 3, onde se define a abertura da válvula de *by-pass* como fixa em 20 %, serão apresentados na Seção 5.4.2.

Já a Fase 2, ou solução de longo prazo, consiste em estabelecer uma estratégia de controle, através da alteração da malha e da operação automática do sistema.

Essa etapa está prevista para 2021. Contudo, uma simulação dos resultados obtidos é apresentada na sessão 5.4.3.

5.4.2. Avaliação da Alteração de Abertura da Válvula:

Até que a estratégia de controle para o sistema de transporte pneumático fosse alterada (Fase 2 do projeto), avaliou-se a possibilidade de reduzir a abertura da válvula de *by-pass*, com objetivo de diminuir a perda de nitrogênio para atmosfera. Essa foi definida como Fase 1 do projeto.

Apesar de não ter sido observada diferenciação prática de abertura entre campanhas de homopolímeros e *grades* randômicos, sabe-se que idealmente a abertura pré-definida para homopolímeros é de 20 %. Já em campanhas de copolímeros, a válvula de *by-pass* foi pré-definida como sendo de 26,67 %.

Essa existência de diferentes condições de operação para *grades* copolímeros ocorre não só para o sistema de transporte pneumático. Muitas etapas anteriores ao transporte pneumático apresentam condições distintas se há a presença de eteno no meio. Entre essas condições está a pressão e temperatura em equipamentos e a composição de correntes.

Para tanto, decidiu-se investigar a possibilidade de redução de abertura de campanhas de *grades* randômicos. O novo set-point também seria de 20 %. Assim, a válvula trabalharia em uma condição de abertura fixa, o que facilitaria o controle e reduziria o consumo de nitrogênio.

Entretanto, para implementar a modificação acima, é necessário avaliar três parâmetros fundamentais: teor de HC; pressão do sistema de transporte pneumático; e abertura da válvula de reposição de nitrogênio.

Os dois primeiros parâmetros são controlados por questões de segurança de processo e para evitar que o sistema de compressão pare o funcionamento. Já o 3º parâmetro, foi avaliado para verificar se uma redução de abertura da válvula de *by-pass* ocasionaria uma variação significativa no consumo de nitrogênio.

Dessa forma, foram realizados testes de alteração de abertura da válvula de *by-pass* de retirada de nitrogênio, para condições normais de operação de homopolímero. A variação

de abertura ocorreu entre 21% a 34%. Os resultados serão descritos na Figura 5.18 e analisados separadamente.

Reposição de nitrogênio

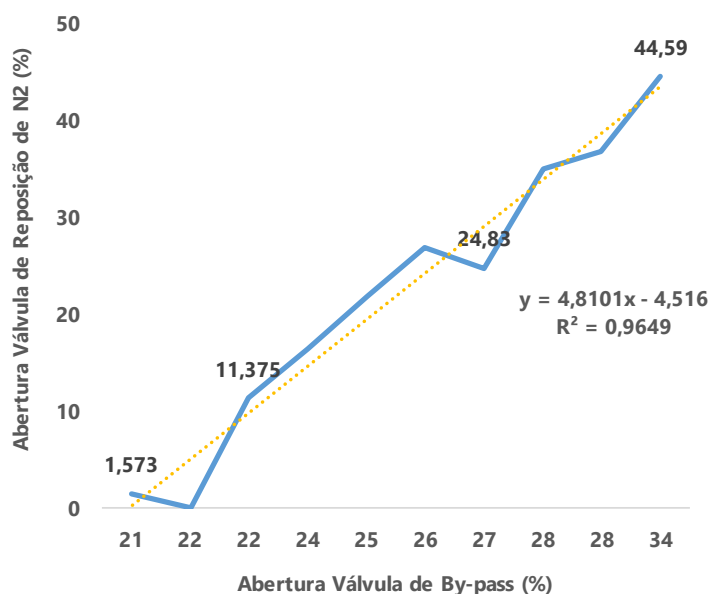


Figura 5.18 Abertura da Válvula de Reposição de Nitrogênio para o Sistema de Transporte Pneumático x Abertura da Válvula de *By-pass* de Retirada de Nitrogênio

A partir dos resultados obtidos, verifica-se uma proporcionalidade linear entre a abertura da válvula de *by-pass* e a abertura da válvula de reposição de nitrogênio. Uma pequena variação na abertura da válvula de *by-pass* contribui para uma grande redução na reposição de nitrogênio para o sistema.

Logo, sob o ponto de vista de consumo de nitrogênio, reduzir a abertura da válvula de *by-pass* para 20% apresenta tendências em ser uma alternativa bastante promissora. Assim, existem impactos significativos no consumo, quando se define esse valor de abertura como sendo fixo, independente do *grade* sintetizado.

Pressão do Sistema de Transporte Pneumático

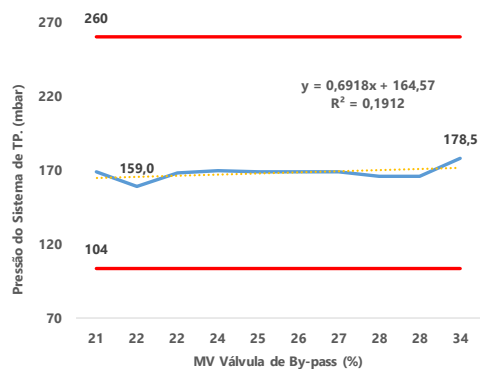


Figura 5.19 Pressão do Sistema de Transporte Pneumático x Abertura da Válvula de *By-pass* de Retirada de Nitrogênio

Outro ponto avaliado foi a pressão do sistema. Se a pressão do sistema excede o limite superior, ocorre abertura das válvulas de controle, de modo a reestabelecer a pressão original do sistema. Por outro lado, se há pressão abaixo do limite inferior, os compressores de transporte de nitrogênio tem o funcionamento interrompido.

Contudo, para os testes realizados, observa-se que a pressão do sistema apresenta baixa variação quando se altera a abertura da válvula de *by-pass*. Os valores obtidos no teste são muito distantes dos limites de operação do processo. Isso indica a possibilidade de se trabalhar com menores aberturas da válvula de *by-pass* sem prejudicar a segurança do processo ou o funcionamento dos compressores.

. Teor de HC:

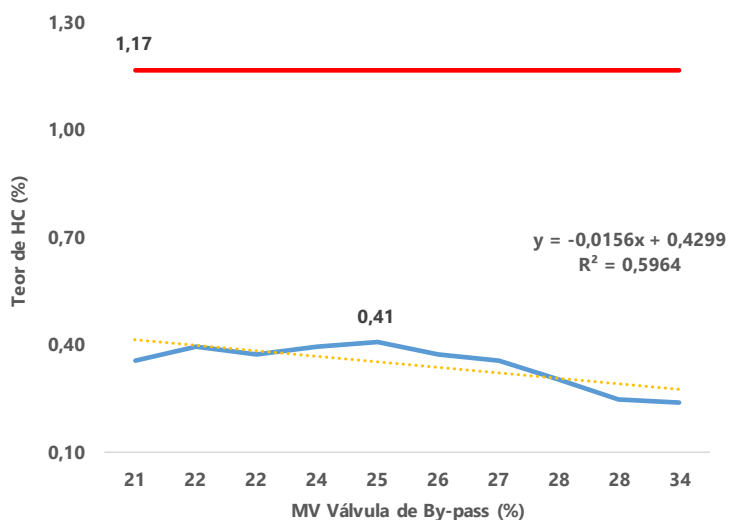


Figura 5.20 Teor de HC do Sistema de Transporte Pneumático x Abertura da Válvula de *By-pass* de Retirada de Nitrogênio

Por fim, quando se analisa a variação do teor de HC, é importante observar se os valores registrados excedem o limite superior. Para os testes realizados, observa-se que ocorreu alteração para o teor de HC, mas os valores estiveram ainda muito distantes do limite de segurança do processo.

Portanto, a partir do disposto acima, decidiu-se prosseguir com a Fase 1 do Projeto, que visa reduzir a abertura da válvula de *by-pass* de retirada de nitrogênio e defini-la como sendo próxima de 20%. Essa redução já possibilitaria atingir a meta de redução de consumo prevista na etapa de definição do projeto. Uma representação pode ser obtida na Tabela 5.6:

Tabela 5.7 Redução do consumo de nitrogênio prevista na Fase 1 do Projeto

	Q'_{hHomo} (m ³ /h)	$Q'_{hRandom}$ (m ³ /h)	$t_{prod.Hom}$ o (h)	$t_{prod.Rando}$ m (h)	$t_{par.Homo}$ (h)	$t_{par.Rando}$ m (h)	Preço do Nitrogênio (R\$/m ³)
Valores médios (2019):	183	326	5478	2333	687,5	259	0,22
Valores médios pós-projeto:	183	183	5478	2333	687,5	259	0,22
Redução de Consumo Prevista (m ³):	370.656,0						
Redução Monetária Prevista:	R\$81.544						

Na próxima seção, serão apresentados os resultados da simulação da Fase 2 do projeto.

5.4.3 Obtenção do Consumo considerando Nova Estratégia de Controle:

A alteração da estratégia de controle do sistema de transporte pneumático se basearia em dois enfoques principais. Primeiramente, deseja-se realizar o fechamento total da válvula de *by-pass*, o que reduziria o consumo de nitrogênio por essa fonte em totalidade. Em segunda instância, ocorrerá atuação das válvulas de controle por um tempo determinado, apenas em condições de aumento do teor de HC ou de aumento da pressão do sistema.

Premissas foram assumidas para estimar o consumo de nitrogênio no sistema de transporte pneumático a partir da alteração da estratégia de controle. Segue uma representação na Figura 5.21:

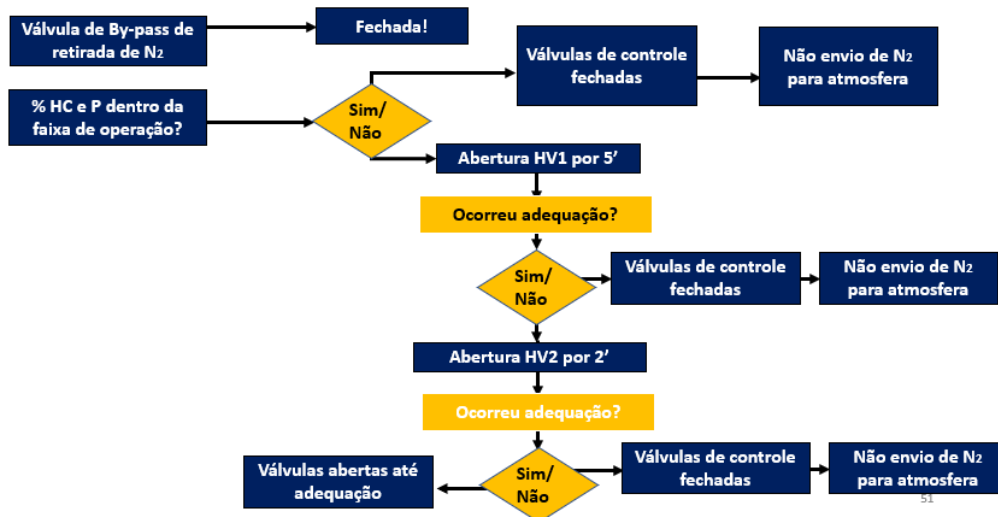


Figura 5.21 Nova estratégia de controle proposta para o Sistema de Transporte Pneumático

A partir disso, o consumo de nitrogênio considerando essa nova estratégia de controle será fornecido por:

$$\text{Consumo de nitrogênio} = Q * \{[t1 * (N1 - N2)] + [(t1 + t2) * N2]\} \text{ eq. (18)}$$

onde,

- Q = vazão de saída de nitrogênio pelas válvulas de controle (função do orifício de restrição instalado após as válvulas);
- t1 = tempo de abertura da válvula 1 = 5 min (premissa);
- t2 = tempo de abertura da válvula 2 = 2 min (premissa);
- N1 = (nº de vezes em que valores de Teor de HC ou de Pressão estiveram fora da faixa de operação);
- N2 = (nº de vezes em que valores de Teor de HC ou de Pressão permaneceram fora da faixa de operação e ocorreu a necessidade da abertura da válvula 2).

Foram assumidas algumas premissas:

- 1- Ao longo de 1 ano, os limites de teores de HC e de pressão seriam excedidos 1000 vezes. Logo, N1 = 1000;
- 2- Em todas as 1000 vezes citadas acima, ocorreu a necessidade de abertura da 2ª válvula. Logo, N1-N2=0;
- 3- Tempo de abertura da válvula 1 = 5 min e tempo de abertura da válvula 2 = 2 min. Logo: t1 = (300/3600) h e t2 = (120/3600) h.

A partir dos cálculos realizados, seguem os resultados do consumo de nitrogênio na fábrica considerando a implementação da Fase 2 do Projeto:

2019	N2 perdido no Sistema de TP. (m ³):	X	2021	Vazão N2 (m ³ /h):	t1 (h)	N1	t2 (h)	N2	N2 perdido no Sistema de TP. (m ³):
	1.973.279			2097	0,08	1000	0,03	1000	244.609
Economia potencial com o Projeto (m ³):				1.728.670					
% em relação ao consumo total da fábrica:				13%					

Figura 5.22 Comparativo do Consumo de NITROGÊNIO no Sistema de Transporte Pneumático com a implementação da Fase 2 do Projeto

Verifica-se que com a alteração da estratégia de controle, existe um potencial de redução de consumo de nitrogênio de 87% no sistema de transporte pneumático. Essa economia corresponde a 13% do nitrogênio consumido por toda unidade industrial.

5.5. CONTROLE

Ainda não existem resultados da etapa de Controle, uma vez que o projeto está na etapa 4, fase de implementação.

6. CONCLUSÕES

Para a resolução do problema em questão – alto consumo de nitrogênio no sistema de transporte pneumático - foi fundamental ter o domínio de conceitos teóricos de fenômenos de transporte, em especial, mecânica dos fluidos. Além disso, como o projeto foi realizado dentro de uma unidade industrial produtora de polipropileno, o entendimento de processos orgânicos e de operações unitárias de separação também foi necessário.

A utilização da metodologia DMAIC se mostrou adequada. Primeiramente, foi possível identificar todas as principais causas para o consumo elevado de nitrogênio e propor ações para tratá-las. É válido ressaltar também que o projeto foi dividido em etapas menores, o que permitiu a resolução de forma estruturada e com entregas bem definidas ao longo do projeto.

Com relação ao processo, identificou-se uma perda contínua de nitrogênio para atmosfera no sistema de transporte pneumático, por meio de uma válvula de *by-pass*, que opera aberta. A partir disso, calculou-se o consumo de nitrogênio no sistema de transporte

pneumático, por meio de uma equação de vazão em função do ΔP para condições de fluxo através de orifícios. Os resultados obtidos foram consistentes com os registrados nos bancos de dados de consumo anual da fábrica.

Com relação à resolução do problema, o projeto foi dividido em 2 fases. A fase 1 contempla a redução de abertura da válvula de *by-pass* para que a operação sempre ocorra em uma condição ótima. Nessa fase, 7 causas já estão sendo tratadas: adequação de três parâmetros que influenciam no percentual de abertura da válvula (relação pó/gás, peso do vaso de selagem e pressão do vaso de estocagem); reestruturação dos analisadores de HC; e criação de um procedimento operacional aliado a treinamentos para padronização da abertura.

A partir de testes realizados para a Fase 1, verificou-se que uma redução de abertura da válvula de *by-pass* não ocasiona variação significativa nos dois principais parâmetros do sistema de transporte pneumático: Teor de HC e pressão. Além disso, quando se observa a quantidade de nitrogênio consumida para alteração do percentual de abertura da válvula de *by-pass*, se observa uma variação significativa: de 45 % a 0 % de abertura da válvula de reposição quando se reduz a abertura da válvula de *by-pass*. Dessa forma, reduziu-se a abertura da válvula de *by-pass* em 6,67 %, para copolímeros, obtendo-se, assim, uma padronização de operação em 20 % para homopolímeros e para copolímeros, o que representa uma redução anual de 370.656 m³ de consumo de nitrogênio.

Na fase 2 do projeto, tem-se o objetivo de fechar a válvula de abertura de *by-pass* e alterar a estratégia de controle do sistema para que não ocorra despressurização do sistema de transporte pneumático quando as válvulas de controle forem abertas. Para tanto, obteve-se uma economia de consumo de nitrogênio de 1.728.670 m³, o que representa 13% do consumo total de nitrogênio nessa unidade industrial.

É válido ressaltar que os resultados da Fase 2 foram obtidos a partir de premissas assumidas, como, número de despressurizações igual a 1000/ano e tempos de abertura de 5 minutos e 2 minutos extras para as válvulas 1 e 2. Tais premissas devem ser verificadas experimentalmente. Além disso, deve-se observar se a despressurização do sistema de transporte pneumático deixa de ocorrer com a implementação dessas novas medidas.

Em suma, os resultados obtidos com a Fase 1 do projeto são bastante promissores, mas é necessário monitorar as variáveis críticas do processo, como teor de hidrocarbonetos e pressão durante a etapa de Controle. Já a Fase 2 do projeto, trará resultados ainda mais promissores, mas esses devem ser validados na fábrica para que a implementação ocorra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-KHATEEB, K.A.S. et al. *A study of pneumatic conveying of gas-solid flow for industrial apolipropilenolication*. In: *5th International Conference on Mechatronics*, 2013. IOPscience, 2013.

Braskem. Manual de Operação Área 24 – Secagem e Purificação de Propeno. Acesso em 24 set. 2020.

CARVALHO, M. Projeto Conceitual de um Transportador Pneumático para Finos de Bauxita. 2018. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2018.

Chemical Engineering, Essentials for the CPI Professional. Polypropylene Production via Gas-Phase Process, 2013. Disponível em: <<https://www.chemengonline.com/polypropylene-production-via-gas-phase-process/>>. Acesso em 23 ago. 2020.

COCA, J.; ORDOÑEZ, S.; DIAZ, E. *Mass Transfer Operations: Absorption and Extraction. Encyclopedia of Life Supolipropilenoort Systems (EOLSS)*, v. 2, p.1-9, 2013.

COELHO, K. da M. Projeto de Transporte Pneumático de Adsorventes à Base de Sódio para Tratamento de Gás Ácido Emitido na Combustão de Biomassa. 2015. 94 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

CRANE, D. *Flow of Fluids Through Valves, Fittings and Pipes*. 1. ed. Nova York: Crane CO, 1979.

CRUZ, M. de A. et al. Predição da perda de carga em transporte pneumático em fase diluída usando um modelo computacional. Anais da 58ª Reunião Anual da SBPC, 2006, Florianópolis. Universidade Federal do Pará: 2006.

Dynamic Air. As vantagens do sistema de transporte pneumático para a indústria química, 2020. Disponível em: <<https://www.solucoesdynamicair.com.br/blog/as-vantagens-do-sistema-de-transporte-pneumatico-para-a-industria-quimica>>. Acesso em 24 set. 2020.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

GENIS, A. V. *Analysis of the Global and Russian Markets of Polypropylene and of Its Main Consumption Areas*. *Rossiiskii Khimicheskii Zhurnal*, 2015, v. 59, n. 4, p. 3–17, 2015.

Gestão Empresarial. Série Ferramentas de Gestão: Mapa de Processo. 2011. Disponível em: <<http://gerisval.blogspot.com/2011/01/serie-ferramentas-de-gestao-mapa-de.html>>. Acesso em 10 mar. 2020.

GOMES, L. M. Análise experimental sobre velocidade de captura em sistemas de transporte pneumático. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Pará, Universidade Federal do Pará, Belém.

JUNIOR, R. D. dos S. et al. Análise do Escoamento e do Coeficiente de Perda de Carga Localizada em uma Válvula Borboleta por meio de Modelagem Numérica. In: *PCH Notícias & Ship News*, 77, 2, 2018. Acta Editora, 2018. p. 9-12.

LYONDELLBASELL. *Polypropylene*. 2012. Disponível em: <<https://www.lyondellbasell.com/globalassets/lyb-around-the-world/plant-sites/australia/lyondellbasell-australia-polypropylene-environmental-statement-january-2012.pdf>>. Acesso em 12 jul. 2020.

MADDAH, H. A. *Polypropylene as a Promising Plastic: A Review*. *American Journal of Polymer Science*, 2016, 1-11, 2016:

Marine Engineering. Maintenance of Butterfly Valve on Ships, 2018. Disponível em <<https://marineengineeringonline.com/tag/problems-with-butterfly-valve/>>. Acesso em 24 set. 2020.

MILLS, D. *Pneumatic Conveying Design Guide*. 2. ed. Oxford: Elsevier Butterworth Heinemann, 2004.

MOODY, L.F. “*Friction Factors for Pipe flow*”, *Transactions of the ASME*, 66,8, 1944. p. 671-684.

PELLETRON. *The New Thinking in Pneumatic Conveying*. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/140593272/The-New-Thinking-in-Pneumatic-Conveying#:~:text=The%20New%20Thinking%20in%20Pneumatic%20Conveying%20Material%20properties,very%20important%20design%20factors%20in%20the%20sizing%20process>>. Acesso em 22 ago. 2020.

PETRY, A. Mercado Brasileiro de Polipropileno com Ênfase no Setor Automobilístico. 2011. 35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

PORRI, L. Os Anos 1954-1963 no Politécnico de Milão, 2009. Scielo, São Carlos, v. 19, n. 3, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282009000300003>. Acesso em 20 mai. 2020.

POLIPROPILENO Technology. Disponível em: <https://mol.hu/images/pdf/A_MOL_rol/tvk-rol/tarsasagunkr%C3%B3l_roviden/egyetem_kapcsolatok/debreceeni_egyetem/oktatasi_anyagok/bemutatok/POLIPROPILENO%20eloallitasa_eng_prezi.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2020.

RAZAVI, A. *Polypropylene: Syndiotactic*. 2. ed. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, p. 7708-7711, 2001.

SIEMENS. *Process Analytics in Polypropylene (POLIPROPILENO) Plants*. 2007. Disponível em: <https://www.siemens-pro.ru/docs/kip/Analytical_equipment/Gas_chromatography/Maxum_2/Apolipropilenolications_EN/Process_Analytics_in_POLIPROPILENO_Plants.pdf>. Acesso em 12 jul. 2020.

SOTOMAYOR, H. B. Estudo Comparativo de Válvulas Hidráulicas. 2016. 110 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

SOUZA, R. P. A. de. Cálculos de Perda de Carga para Seleção de uma Bomba de Alimentação de Água de um Gerador de Vapor em uma Unidade FPSO. 2015. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

Streamline Industries. *Butterfly Valves: Here's What You Should Know*, 2019: Disponível em: <<https://www.streamlineind.com/butterfly-valves-heres-what-you-should-know/>>. Acesso em 24 set. 2020.

TELLES, P. C. S. Tubulações Industriais: Materiais, Projeto, Montagem. 10 ed. São Paulo: LTC, 2012.

UNIVAL Válvulas e Conexões. Conheça as principais válvulas e suas funções. 2015. Disponível em: <<https://www.unival.com.br/2015/03/30/conheca-as-principais-valvulas-e-suas-funcoes/>>. Acesso em 10 mar. 2020.

University of California, Davis. *Transport Phenomena*. Disponível em: <<https://che.engineering.ucdavis.edu/faculty-and-research/transport-phenomena>>. Acesso em: 24 set. 2020.

WALLAS, S. M. *Chemical Process Equipment*. 1. ed. Massachusetts: Butterworth-Heinemann, 1990.

WEYANDT, M. *Answers to eight common questions about pneumatic conveying*. CSC Publishing Powder and Bulk Engineering, 2008.

WOOD, L. *Polypropylene Market Study (2019-2024): World Market Expected to Register a CAGR of 5.56%, 2019*. Ciston PR Newswire, 2019: Disponível em: <<https://www.prnewswire.com/news-releases/polypropylene-market-study-2019-2024->

[world-market-expected-to-register-a-cagr-of-5-56-300966835.html](#)>. Acesso em 15 abr. 2020.