

## UTILIZAÇÃO DA METODOLOGIA 6-SIGMA PARA ELIMINAÇÃO DE DEFEITOS EM TUBOS DE VÓRTICE

**Resumo:** *Existem diversas formas para realizar a separação térmica de fluídos, as mais tradicionais utilizam sistemas de refrigeração e ar condicionado operando através do ciclo termodinâmico de compressão a vapor. Porém, esse tipo de utilização pode exigir muitos componentes e causar danos ambientais provocados pelos fluídos refrigerantes e ao consumo de energia elétrica. Uma boa alternativa aos sistemas convencionais de refrigeração, para aplicação de resfriamento localizado, são os tubos de vórtice, largamente utilizados nas indústrias. E tendo em vista que cada vez mais a voz do cliente está presente nos processos de fabricação, há uma grande necessidade de que o controle de qualidade seja rigoroso nas fábricas e que as peças sejam produzidas com mínimo de desperdício, atendendo a todos requisitos dos clientes.*

*O objetivo deste estudo é explicar como a metodologia 6-sigma pode ser utilizada para resolução de problemas, assim como mostrar uma aplicação de melhoria de um tubo de vórtice. O estudo foca na abordagem estatística da metodologia 6-sigma para encontrar falhas no processo de fabricação e prover melhorias para o controle dimensional.*

**Palavras-chave:** 6-Sigma. Tubos de vórtice. Controle dimensional.

### 1 INTRODUÇÃO

Com cenário competitivo do mercado atual, cada vez mais é necessário atingir excelência na qualidade dos produtos, com menor desperdício possível. Segundo Alves (1995), um processo realizado de maneira incorreta no início da fabricação de um determinado produto, fará com que todo processo produtivo reflita negativamente nos custos. Portanto, para assegurar que não haja nenhum tipo de defeito no produto, ou seja, garantindo a funcionalidade, evitando desgaste com clientes e até reduzindo gastos desnecessários, faz-se necessária a utilização de técnicas de controle e otimização nos processos de fabricação, tais como diagrama de espinha de peixe, CEP, diagrama de Pareto, Taguchi, entre outras que visam minimizar ou eliminar os defeitos e garantir padronização das peças por meio de ferramentas estatísticas. Estas técnicas estão inseridas em metodologias de qualidade, como por exemplo o 6-Sigma, que têm como objetivo aumentar a participação da empresa no mercado, reduzir custos e melhorar seus processos de fabricação.

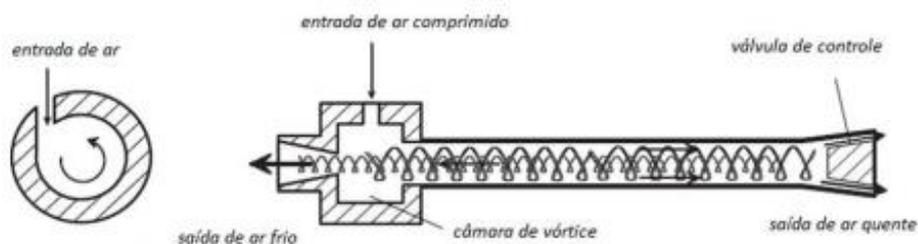
O objetivo deste trabalho é propor através da metodologia 6-Sigma, amplamente utilizada nas indústrias modernas, uma melhoria em um tubo de vórtice para uma aplicação em equipamentos de proteção individual de respiradores de adução de ar tipo linha de ar comprimido.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os tubos de vórtice, ou tubos de Ranque-Hillsch, podem ser uma ótima alternativa quando é necessário realizar um resfriamento localizado, seu princípio de funcionamento se baseia na separação térmica de um fluxo de ar comprimido através de um componente puramente mecânico, obtendo-se uma saída de ar quente e outra fria.

Existem duas saídas de ar, onde, na entrada, há uma injeção ar comprimido (quente) que entra tangencialmente na câmara de vórtice e assim gera-se um fluxo em forma de redemoinho. Após isso, o ar comprimido é expandido e percorre o tubo até encontrar uma válvula reguladora de vazão. Nela, a parcela de ar quente é expelida para ambiente externo, já a parte fria retorna pelo tubo até sair pelo lado oposto do componente, conforme esquematizado na **Figura 1**.

Figura 1 - Tubo de vórtice com corrente contrária.

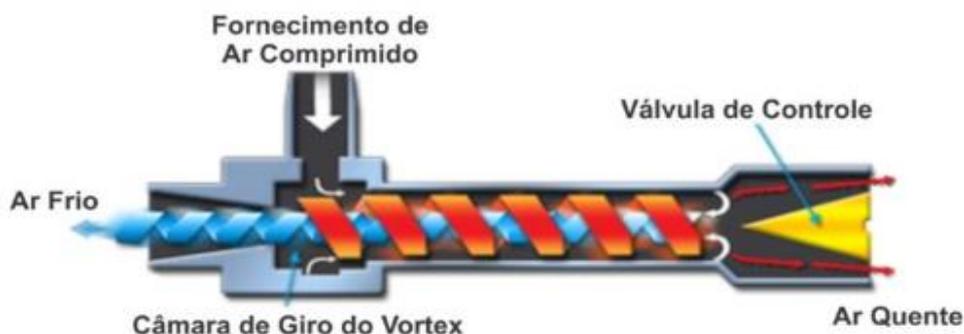


Fonte: Adaptado de Gao (2005).

Mesmo não sendo tão clara a comprovação do fenômeno, Hilsch (1947) sugeriu que a expansão do ar de uma alta pressão na parede do tubo, para uma baixa pressão no centro do tubo, gera um gradiente de velocidade na direção radial, que resulta na transferência da energia cinética, pelas forças viscosas das camadas mais internas para as mais externas do tubo (COCKERILL, 1998).

Segundo Gao (2005), o vórtice interno deveria ter uma velocidade angular maior do que a do vórtice externo, visto que seu raio é de menor dimensão. Porém, a velocidade de rotação dos vórtices se mantém constante, e para isso ser possível, há uma perda de energia cinética, e eventualmente do momento angular, do vórtice interno para o externo. A perda libera calor, que aumenta a temperatura do vórtice externo e retira o calor do interno, havendo dessa forma a saída de ar frio em direção oposta à saída de ar quente, como demonstrado na **Figura 2**.

Figura 2 - Esquema de separação de temperatura no tubo de vórtice.



Fonte: Adaptado < <https://www.widecoat.com.br/> >.

Silva (2014) mostra que o desempenho do tubo de vórtice está diretamente relacionado aos parâmetros geométricos da construção do dispositivo, como por exemplo, formas do bocal de entrada, diâmetro do tubo de vórtice, diâmetro de vórtice, diâmetro do orifício de saída etc. Existem diversos estudos que apresentam a relação entre as dimensões de determinado parâmetro e a eficiência térmica obtida no final do processo.

Portanto, qualquer erro no processo de fabricação nesse tipo de dispositivo pode impactar diretamente na eficiência e integridade de trabalho. Por isso, faz-se necessário o uso de técnicas de controle de qualidade como 6-Sigma.

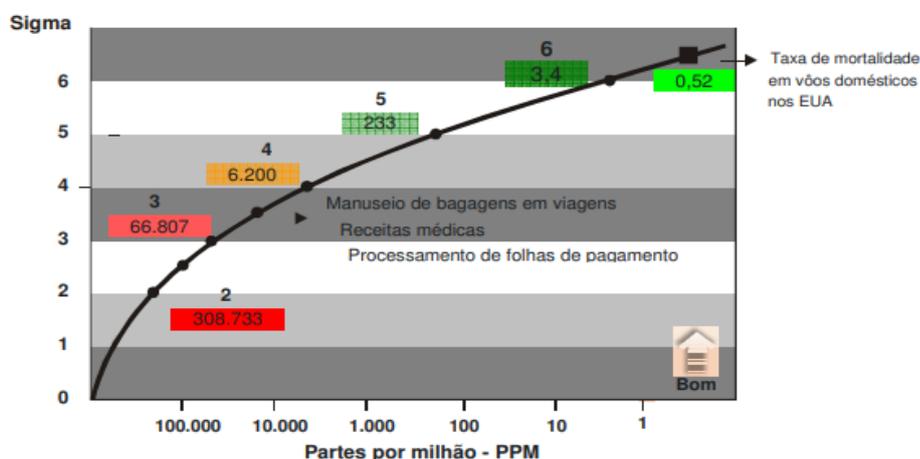
Do ponto de vista de gestão, a metodologia pode dividir seu processo de melhoria em cinco passos, utilizando técnicas auxiliares como DMAIC, DFSS, DMADV e DMEDI, a depender se a melhoria for parte de um projeto de produto, um processo de manufatura etc. (CORONADO, 2008).

Craig (1993) mostra esses passos, utilizando o princípio DMAIC, da seguinte forma:

- Definir (*Define*) - Definição do problema que afeta a satisfação do cliente;
- Mensurar (*Measure*) – Utilização da análise do modo de falha a fim de identificar e controlar os parâmetros de modo a cumprir os requisitos do cliente;
- Análise (*Analyze*) – Empregar o estudo de repetibilidade e reprodutibilidade para medir os parâmetros de controle;
- Melhorar (*Improve*) – Prover melhorias para mitigar ou eliminar os problemas definidos;
- Controlar (*Control*) – Desenvolver um plano de controle de qualidade para manter o processo sem desvios.

Já do ponto de vista estatístico, probabilístico e quantitativo, o 6-Sigma representa os níveis em que um processo está suscetível a erros por cada milhão de oportunidades. Em outras palavras, o nível máximo 6 representa um processo tendo menos de 3,4 defeitos por cada milhão de oportunidades (PPM – Part Per Milion), ou então, o sucesso de 99,99966% e o termo sigma representa o desvio padrão (GUEDES, 2007). A evolução do nível sigma está exemplificada na **Figura 3**.

Figura 3 - Número de defeitos conforme nível sigma.

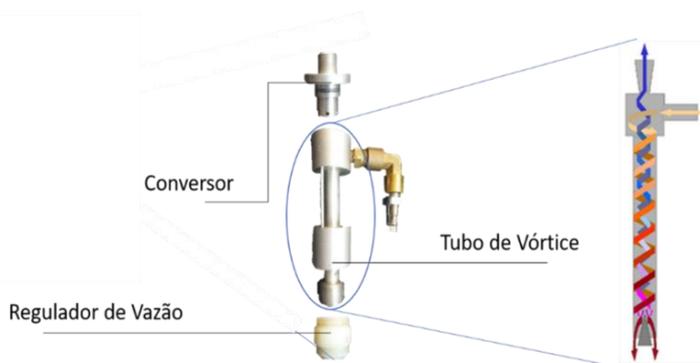


Fonte: Aplicação da metodologia 6-Sigma na melhoria da qualidade do processo de soldadura reflow (Guedes, 2007).

Para melhor entendimento do método, uma fábrica que produz cerca de 100 unidades de tubo de vórtice por mês, foi estudada a fim de definir os problemas típicos encontrados no equipamento, medir os parâmetros que afetam o processo, analisar os dados, prover melhorias para atender a necessidade do cliente e ter o controle do processo de fabricação.

A fábrica em questão é do ramo de máquinas de jateamento abrasivo, e esse tipo de serviço exige o uso de equipamentos de proteção individual para proteção do corpo e respiração do operador, tendo em vista a atmosfera insalubre gerada pela névoa de poeira proveniente do material particulado abrasivo, quando entra em choque com a superfície da peça jateada. Para melhorar a qualidade do ar respirado pelo operador jatista, a válvula de fluxo contínuo recebe o ar quente do compressor e o resfria antes de entrar no capacete do jatista, para isso, a válvula funciona como um tubo de vórtice de corrente contrária que possui uma saída de ar quente e uma saída fria na direção oposta. Conforme ilustrado na **Figura 4**.

Figura 4 - Aplicação de um tubo de vórtice.



Fonte: Autor.

### 3 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Definir

O primeiro passo é definir qual é o problema em questão, e para isso, a voz do cliente é essencial para traduzir o que o cliente está dizendo para qual requisito deve ser atendido. Conforme mostra a **Figura 5**.

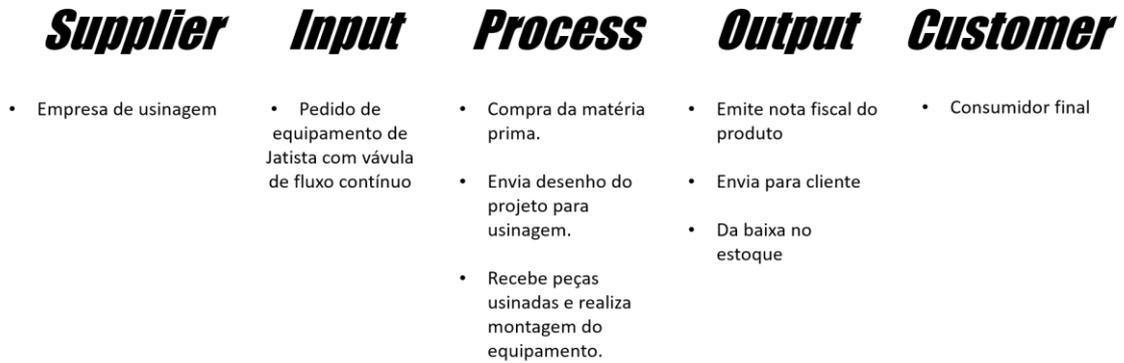
Figura 5 - Voz do cliente para requerimentos.

Voz do Cliente (o que ele diz?)	Problema	CTQ (Requerimento)
<ul style="list-style-type: none"> <li>Componente esquenta muito, causando desconforto e queimando o Jatista</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Corpo do componente aquece demasiadamente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Seguir os parâmetros da norma, ou seja, para um fluxo mín. de 170 l/min e máx. de 300 l/min . O diferencial de temperatura esperado para que o produto atenda sua proposta de conforto térmico ao operador é de até 20°C.</li> </ul>

Fonte: Autor.

Após o recolhimento dos principais apontamentos feitos pelos clientes, referente ao desempenho do componente em questão, é necessário realizar o mapeamento do processo a fim de identificar aonde se encontra a origem do problema. Portanto, o macro mapeamento feito através da técnica SIPOC está ilustrado na **Figura 6**.

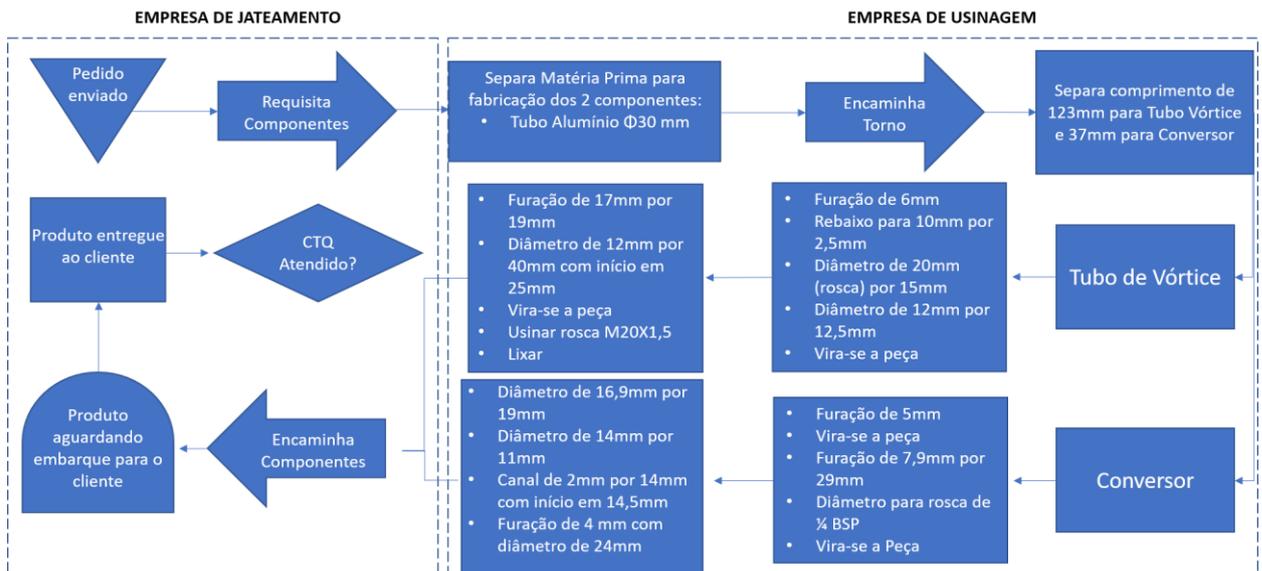
Figura 6 - Mapeamento SIPOC do processo.



Fonte: Autor.

Para entender mais detalhadamente como o processo de fabricação da válvula é feito, é necessário a elaboração do mapeamento micro do processo, conforme mostra a **Figura 7**.

Figura 7 - Mapeamento micro do processo.

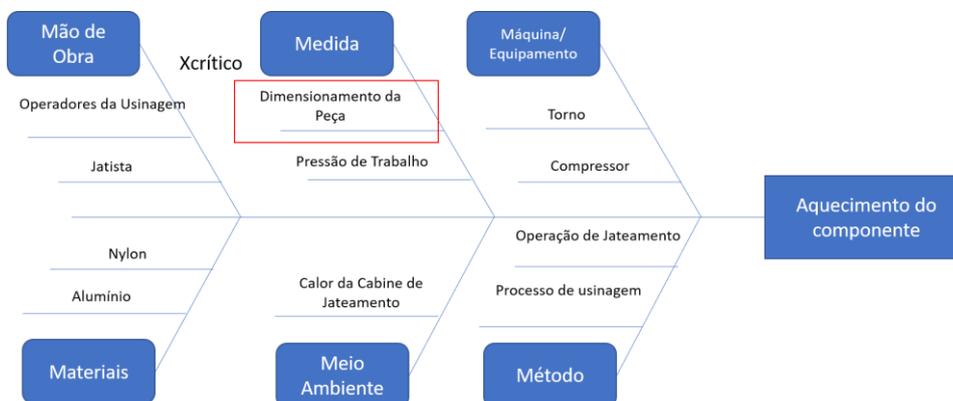


Fonte: Autor.

O próximo passo após o mapeamento, é elaborar um diagrama de Ishikawa para que a equipe discuta qual das entradas do processo (Xcrítico) tem maior chance de ser a origem do problema.

Com isso, é possível observar que de todos fatores estudados, o que mais pode influenciar diretamente nos problemas abordados no início do processo refere-se ao dimensionamento da peça, pois ele tem influência direta tanto na regulagem do ar passante no interior da válvula, como no rendimento térmico dela, que pode ocasionar o aquecimento demasiado da peça. Como demonstrado na **Figura 8**.

Figura 8 - Diagrama de Ishikawa para válvula de fluxo contínuo.

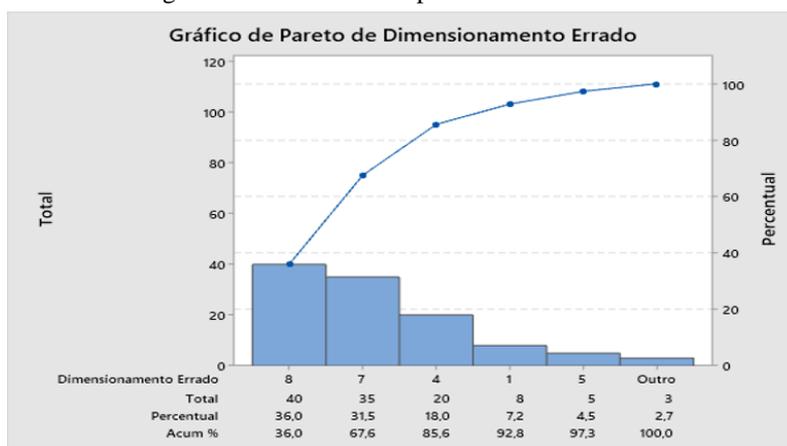


Fonte: Autor.

Para definição de quais dimensões são consideradas principais, leva-se em conta aquelas que podem ter influência direta nos problemas mencionados anteriormente, por exemplo, os furos de estricção presentes na tampa que geram o efeito de vórtice no tubo, podem gerar grandes variações de temperatura dependendo da sua dimensão, logo, essa dimensão pode ser considerada principal.

A partir de medições feitas em uma amostra aleatória de 13 peças, é possível verificar quantas vezes as dimensões principais ficaram fora das estabelecidas em projeto, e, portanto, é possível construir um gráfico de Pareto de acordo com total de erros para cada uma das dimensões multiplicado pelos seus respectivos pesos sobre o efeito, como pode ser visto na **Figura 9**.

Figura 9 - Gráfico Pareto para dimensionamento errado.



Fonte: Autor.

Deste modo, observa-se que as dimensões que mais vezes se encontraram fora do dimensional do projeto e que possuem muita relevância sobre o efeito (cerca de 80% do total), são as dimensões que correspondem a altura da câmara de vórtice e a altura do encaixe do conversor. As dimensões que mais afetam o desempenho da peça estão ilustradas na **Figura 10**.

Figura 10 - Dimensões que mais vezes estavam fora do projetado.



Fonte: Autor.

Por fim, para verificar a influência dos parâmetros evidenciados no gráfico de Pareto sobre os efeitos relatados, é possível realizar um comparativo entre as peças defeituosas e as boas. Para isso, cada uma das amostras apresentam um encaixe entre um conversor e um tubo de vórtice com medidas diferentes. Como ilustrado na **Tabela 1**.

Tabela 1 - Validação de peças defeituosas através da medição das dimensões principais.

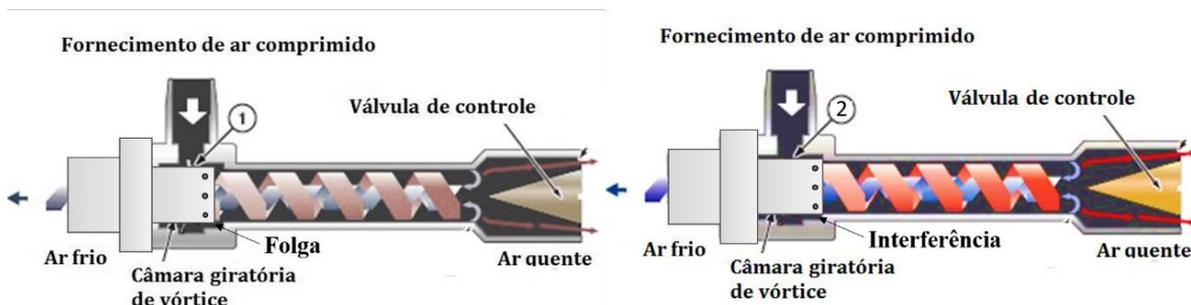
Amostra nº	Medição		Folga	Aquecimento	
	Conversor	Vórtice		sim	não
A1	19	19,1	0,1		x
A2	19	19,4	0,4		x
A3	18,9	19,1	0,2		x
A4	19	19,2	0,2		x
A5	18,8	19,4	0,6		x
A6	18,9	19,2	0,3		x
A7	19	19,2	0,2		x
A8	19	19,2	0,2		x
A9	19,3	19,2	-0,1	x	
A10	18,8	19,1	0,3		x
A11	19,1	19	-0,1	x	
A12	19,4	19,1	-0,3	x	
A13	19,4	19,1	-0,3	x	
A9/A3	19,3	19,1	-0,2	x	
A6/A9	18,9	19,2	0,3		x

Fonte: Autor.

Nota-se que apenas as peças que têm uma folga entre a altura da câmara de vórtice e a altura do conversor são as que não apresentam defeito de aquecimento. A fim de validar essa teoria, é possível observar que para um teste utilizando um conversor e um tubo de vórtice encaixados por interferência propositalmente (A9/A3) a peça apresenta o defeito, ao contrário do teste de encaixe por folga (A6/A9).

Do ponto de vista fenomenológico, esse comportamento dado é totalmente compreensível, pois como explicado anteriormente, a circulação interna do ar gerado dentro do tubo faz com que o vórtice interno transfira calor para a região periférica do tubo, através da perda de energia cinética dissipada em forma de calor. Desta forma, quando as peças (conversor e câmara de vórtice) estão encaixadas por interferência, toda passagem de ar é obrigada a passar pelos furos de estricção, o efeito do vórtice é aumentado e eventualmente a peça começa a aquecer demasiadamente, mesmo que isso dê uma maior eficiência térmica para o equipamento, já que a saída de ar frio é mais refrigerada. O efeito do vórtice nos dois tipos de encaixe está ilustrado na **Figura 11**.

Figura 11 - Efeito do aquecimento nos diferentes tipos de encaixe.



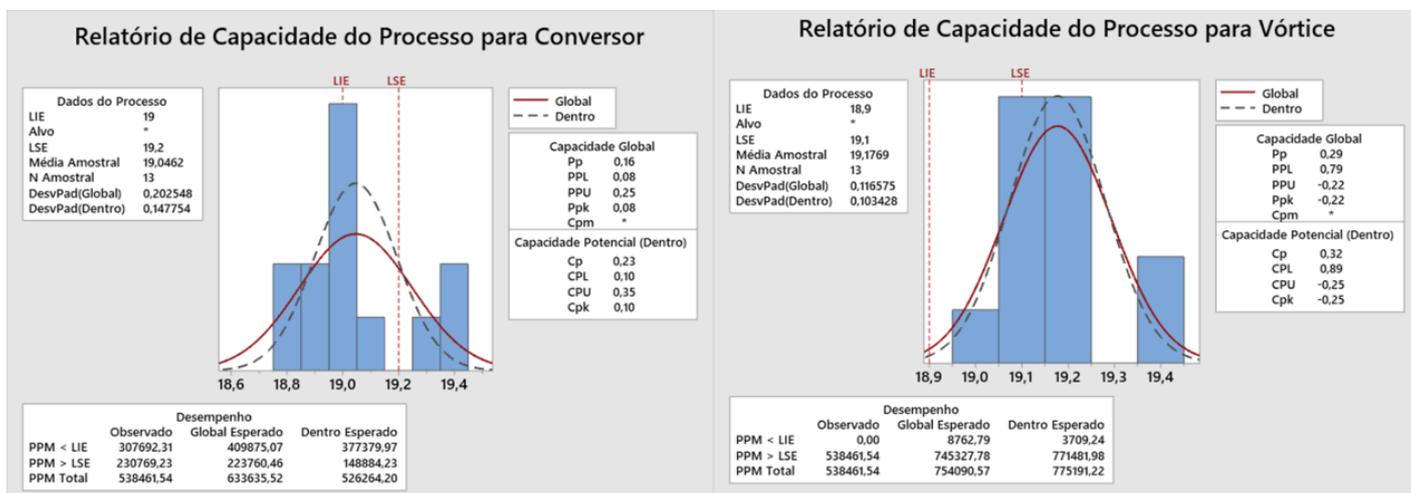
Fonte: Autor.

Na situação 1 é possível notar que o ar comprimido consegue passar diretamente da câmara de vórtice para o corpo do tubo, perdendo eficiência. Já na situação 2, todo ar comprimido passa por esses furos, que são feitos em ângulo justamente para que o efeito vórtice seja criado e a transferência de calor seja feita de forma eficiente.

### 3.2 Medir

Uma vez que o problema está bem definido, é possível elaborar o plano de coleta de dados para obter os qual é o nível sigma dessa produção, assim como seus índices de capacidade. Para os índices de capacidade o software Minitab pode ser utilizado para extração desse tipo dado, conforme mostra a **Figura 12**.

Figura 12 - Relatórios de Cp e Cpk para conversor e câmara de vórtice.



Fonte: Autor.

Já o nível sigma inicial pode ser facilmente obtido quando se conhece a quantidade de amostra e o número de unidades defeituosas. Desta maneira, o nível sigma está ilustrado na **Tabela 2**.

Tabela 2 - Nível sigma calculado para uma amostra de 13 unidades.

Defeitos	Total Unidades	Oportunidades por Peças	DPMO	Nível Sigma Inicial
4	13	1	307692,3	1,98

Fonte: Autor.

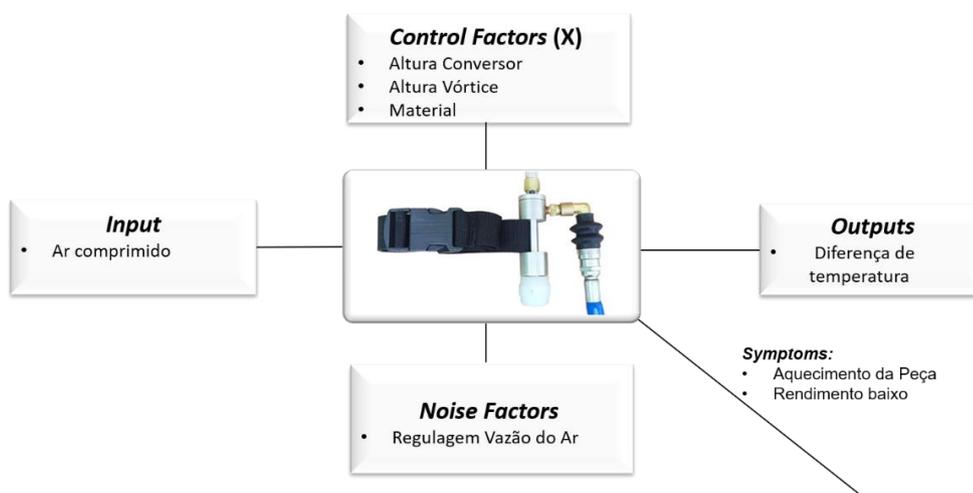
### 3.3 Analisar

A partir do nível sigma inicial calculado (1,98), é possível analisar que o processo apresenta grande desvio, e por isso, pode apresentar grande número de defeitos por milhão de oportunidades. Lembrando que quanto mais próximo de 6, menos suscetível a defeitos é o processo. Além disso, os índices de capacidade também são baixos, tanto para o conversor ( $C_p = 0,23$  e  $C_{pk} = 0,1$ ) quanto para a câmara de vórtice ( $C_p = 0,32$  e  $C_{pk} = -0,25$ ). Isso mostra que o processo tem uma variação grande de medida entre cada uma das peças da mesma amostra, ou seja, não segue uma boa distribuição normal com a faixas de medida mais repetitivas. Além disso, há muitas peças fora do limite de especificação que fazem com que a distribuição não seja centralizada.

### 3.4 Melhorar e controlar

Como pode ser observado nas fases anteriores, existem algumas possibilidades de melhoria e controle no processo de fabricação das válvulas de fluxo contínuo, para que os requisitos sejam obedecidos e as necessidades do cliente sejam atendidas. Para eliminar o aquecimento demorado causado pelas peças cujo encaixe entre conversor e câmara de vórtice são dados por interferência, o ideal é realizar um estudo de delineamento de experimentos variando a geometria, dimensões ou até o material do componente, para que ele obtenha uma boa eficiência térmica sem que haja o aquecimento do componente. O DOE pode ser esquematizado conforme a **Figura 13**.

Figura 13 - Esquema Diagrama-P para melhoria na válvula.



Fonte: Autor.

Já para fase de controle do processo, como a fábrica do estudo de caso não possui um processo de qualidade da produção adequado, ou seja, não há nenhum operador conferindo as medições das peças enviadas pela empresa de usinagem, o primeiro passo é implementar um processo de inspeção da qualidade das peças enviadas, além de outras ferramentas como gabaritos e Poka-Yokes que podem ser utilizadas para garantir que todas as peças cheguem com as mesmas medições e dentro dos limites de especificação do projeto, e desta forma, adequar os índices de capacidade  $C_p$  e  $C_{pk}$ .

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Utilizando a metodologia 6-Sigma para o estudo de caso dado, foi possível encontrar primeiramente a origem do problema de aquecimento da peça estudada. Através do gráfico de Pareto nota-se que cerca de 80% dos defeitos estão realmente presentes em 20% das causas.

Do ponto de vista fenomenológico, foi possível verificar que a teoria de funcionamento de tubos de vórtices se aplica perfeitamente à peça estudada, já que as peças que apresentavam defeito de aquecimento demasiado, eram justamente aquelas que tinham um maior efeito de vórtice no seu interior, logo, a eficiência de refrigeração era maior, mas o corpo da peça acabava sendo aquecido por conta da transferência de calor entre os vórtices internos e externos.

Para mensuração, a utilização de ferramentas estatísticas como Minitab se mostraram muito eficientes no tangente ao controle de qualidade. Através do cálculo do nível sigma e índices de capacidade, por exemplo, notou-se uma grande quantidade peças defeituosas em uma amostragem aleatória, o que representa um baixo nível sigma, além de uma grande variação de dimensão peça a peça, fora da especificação, resultando em baixos índices de capacidade.

Ainda, para as etapas de melhoria e controle, é notável que ferramentas como delineamento de experimentos e gráficos de controle podem ser amplamente utilizadas para minimizar ou eliminar os defeitos encontrados.

Portanto, os resultados positivos do estudo em questão mostram que este tipo de abordagem pode ser cada vez mais utilizada na indústria, por solucionar os problemas de forma assertiva, segura e bem estruturada, garantindo a qualidade final do produto e evitando retrabalhos.

#### REFERÊNCIAS

ALVES, João Murta. **O sistema Just In Time Reduz os Custos do Processo Produtivo**. In: Instituto de Fomento e Coordenação Industrial - IFI. 1995. São José dos Campos - SP. Anais eletrônicos: São José dos Campos – SP, 1995.

Cockerrill T.T. **Thermodynamics and Fluid Mechanics of a Ranque – Hilsch Vortex Tube**. PhD Thesis, University of Cambridge. 1998.

CORONADO, A. **Modelo para estruturas seis sigma nas organizações. Gestão & Produção**. São Carlos, v. 15, n. 1, p. 43-56, jan.-abr, 2008

R. J. Craig (1993), “**Six Sigma Quality, the Key to Customer Satisfaction**”, 47th Annual Quality Congress, Boston, MA, DuPont Connector Systems, Clearfield, PA, p.206-12.

Guedes, Fernando Antonio Fontes. **Aplicação da metodologia 6-Sigma na melhoria da qualidade do processo de soldadura reflow**. 2007. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Industrial, Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2007.

Gao C. **Experimental Study on the Ranque-Hilsch Vortex Tube**. PhD Thesis, TechnischeUniversiteit Eindhoven.2005.

SILVA, Oseas Carlos da Silva. **Sistema de refrigeração por tubos de Raque-Hilsch com abastecimento de instalação de ar comprimido para alimentação com fonte solar fotovoltaica**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.