



APLICAÇÃO DA METODOLOGIA QFD NO DESENVOLVIMENTO DE SUPORTE UTILIZADO EM DRONES DE CORRIDA FEITO POR MANUFATURA ADITIVA

APPLICATION OF QFD METHODOLOGY IN THE DEVELOPMENT OF SUPPORT USED IN RACING DRONES MADE THROUGH ADDITIVE MANUFACTURING

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA QFD EN EL DESARROLLO DE SOPORTE UTILIZADO EN DRONES DE CARRERAS FABRICADO MEDIANTE FABRICACIÓN ADITIVA

Davi Salvini Chixaro ^{1*}, Fabiano Oscar Drozda ², & Ricardo Júnior de Oliveira Silva ³

^{1 2 3} [Universidade Federal do Paraná, Campus Politécnico – Curitiba/PR](https://www.ufes.br)

^{1*} davisalvini@gmail.com ² fabiano.drozda@gmail.com ³ ricardojrosilva@gmail.com

ARTIGO INFO.

Recebido: 14.11.2023

Aprovado: 08.12.2023

Disponibilizado: 09.02.2024

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem por Deposição Fundida; Desdobramento da Função Qualidade; Impressão 3D; Design de Produto.

KEYWORDS: Fused Deposition Modeling; Quality Function Deployment; 3D printing; Product Design.

PALABRAS CLAVE: Modelado por Deposición Fundida; Despliegue de la Función de Calidad; Impresión 3D; Diseño de Producto.

*Autor Correspondente: Chixaro, D. S.

RESUMO

A indústria de drones tem crescido, especialmente no nicho de drones de corrida, frequentemente construídos usando peças modulares seguindo o conceito "faça você mesmo" (DIY). Este artigo estuda o uso de uma metodologia para definir critérios do cliente, o QFD (Quality Function Deployment), apresentando sua aplicação no desenvolvimento de um produto manufaturado por Modelagem por Deposição Fundida (FDM) de um suporte para câmera GoPro® em drones de corrida. As impressoras 3D são amplamente utilizadas devido à sua rapidez e facilidade de uso, especialmente na prototipagem rápida de peças. Aplicando o QFD para a construção de um protótipo de um suporte de câmera de ação, para drones de corrida, que atendessem as demandas do cliente, posteriormente manufaturados por impressão 3D e avaliados os parâmetros pré-estabelecidos. Os resultados obtidos atenderam os parâmetros pré-estabelecidos do QFD, especialmente o protótipo v03 que obteve os melhores resultados. A ferramenta foi especialmente útil ao definir quais critérios seriam estudados e como seriam aplicados no desenvolvimento do produto.

ABSTRACT

The drone industry has been growing, especially in the racing drone niche, often built using modular parts following the "do it yourself" (DIY) concept. This article explores the use of a methodology for defining customer criteria, Quality Function Deployment (QFD), presenting its application in the development of a product manufactured by Fused Deposition Modeling (FDM) for a GoPro® camera mount on racing drones. 3D printers are widely used due to their speed and ease of use, especially in the rapid prototyping of parts. Applying QFD to build a prototype of an action camera mount for racing drones that meets customer demands, subsequently manufactured by 3D printing, and evaluating pre-established parameters. The results met the pre-established QFD parameters, especially the v03 prototype, which achieved the best results. The tool was particularly useful in defining which criteria would be studied and how they would be applied in the product development process.

RESUMEN

La industria de drones ha experimentado un crecimiento significativo, especialmente en el nicho de los drones de carrera, a menudo construidos con piezas modulares siguiendo el concepto de "hazlo tú mismo" (DIY). Este artículo estudia el uso de una metodología para definir criterios del cliente, el Despliegue de Funciones de Calidad (QFD por sus siglas en inglés), presentando su aplicación en el desarrollo de un producto fabricado mediante Modelado por Deposición Fundida (FDM) para un soporte de cámara GoPro® en drones de carrera. Las impresoras 3D son ampliamente utilizadas debido a su rapidez y facilidad de uso, especialmente en la prototipación rápida de piezas. Aplicando el QFD para construir un prototipo de un soporte de cámara de acción para drones de carrera que cumpla con las demandas del cliente, posteriormente fabricado mediante impresión 3D y evaluados los parámetros preestablecidos. Los resultados obtenidos cumplieron con los parámetros preestablecidos del QFD, especialmente el prototipo v03 que obtuvo los mejores resultados. La herramienta fue especialmente útil al definir qué criterios se estudiarían y cómo se aplicarían en el desarrollo del producto.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de produtos exige muitos recursos e tempo, e, em muitos casos, são desperdiçados em falhas nesta etapa do processo, portanto, o *quality function deployment* (QFD) e a prototipagem rápida podem ajudar a reduzir essas falhas. Bottani e Rizzi (2006) descrevem o QFD como um sistema flexível que traduz os requisitos do consumidor em parâmetros de *design* e processo desde a concepção do produto até sua manufatura e distribuição.

Chao e Ishii (2004) explicam que o projeto do produto precisa considerar a redução do tempo utilizado no desenvolvimento. Cooper (2000) estimou que 46% dos recursos de *design*, desenvolvimento e lançamento de produtos da empresa são desperdiçados em projetos que falham em alguma parte do processo, desde *design* que não agrada o público-alvo, problemas no processo de fabricação ou até mesmo a entrada do produto no mercado. Pinto e Kharbanda, 1996 identificaram as principais causas de falhas em projetos, incluindo ignorar o ambiente e as partes interessadas do projeto, não entender as compensações do projeto e culpar os aspectos mais visíveis quando ocorrem problemas.

Na década de 1990, a indústria de impressão 3D se dividiu em duas áreas de foco: alta qualidade para peças complexas altamente projetadas (por exemplo, médicas); e impressoras para desenvolvimento e prototipagem de produtos, amigáveis ao usuário e economicamente viáveis (Su & Al'Aref, 2018). A prototipagem rápida começou a se tornar imensamente popular entre empresas e consumidores, *designs* começaram a ser criados e compartilhados por qualquer pessoa que possuísse uma impressora 3D. Isso alavancou o rápido desenvolvimento na prototipagem rápida; no entanto, pode levar a informações ou concepções errôneas do desenvolvimento total do produto, e é aqui que o QFD pode ajudar a fornecer parâmetros de engenharia com base na percepção do cliente sobre o produto.

Com a prototipagem rápida e metodologia QFD, o objetivo geral do estudo foi desenvolver um produto que utiliza o QFD como guia para os parâmetros de engenharia, fornecendo características do produto que o cliente deseja. Concentrando em avaliar os parâmetros de engenharia dentro da manufatura aditiva, em especial na tecnologia FDM utilizando uma impressora 3D como ferramenta para uma prototipagem rápida, eficiente e confiável do produto. E desenvolver um protótipo de um suporte para GoPro® impresso em 3D, que grande parte dos drones de corrida são utilizados para filmagem das corridas.

REFERENCIAL TEÓRICO

TECNOLOGIA FDM (*FUSED DEPOSITION MODELING*)

Na década de 90, Scott e Lisa Crump fundaram a Stratasys e patentearam a modelagem por deposição fundida (FDM), na qual fios de plástico são derretidos e extrudados por meio de um bico, formando cada camada guiada por *software* baseado em computador. A impressora 3D utilizada neste estudo é uma impressora do tipo *Fused Filament Fabrication* (FFF), categoria utilizada onde a tecnologia é baseada em FDM, porém, apenas a Stratasys tem o direito de patente para utilização do nome FDM. Os autores Haryńska et al. (2018) descrevem essa tecnologia como uma das mais fáceis de se usar e mais econômicas em termos de compra e manutenção.

A tecnologia FFF é uma das muitas maneiras de uma impressora 3D funcionar, onde o filamento é derretido em um bloco de aquecimento e depois extrudado por um bico, criando uma camada de polímero derretido que rapidamente se solidifica, criando uma ligação entre a camada anterior e a nova. Assim, esse método é análogo à extrusão ou moldagem por injeção convencional, exceto que os moldes não são necessários (Stansbury & Idacavage, 2016).

As impressoras FFF podem ter múltiplos extrusores e blocos de aquecimento para filamentos de cores diferentes ou diferentes tipos de materiais usados como suporte para uma estrutura complexa projetadas. Banjanin et al. (2018) descreveram o acrilonitrila butadieno estireno (ABS) e o ácido polilático (PLA) como dois dos termoplásticos mais usados para impressoras 3D FFF. O ABS é resistente ao calor, produtos químicos e umidade, permitindo assim que peças sejam utilizadas em diversas aplicações. Simões et al. (2009) citam o PLA como um polímero ecológico, biodegradável, feito de recursos renováveis como amido de milho, sendo útil em uma ampla gama de aplicações de impressão e bastante fácil de usar, pois não necessita de uma mesa aquecida na impressora 3D.

Mesmo que esses dois materiais serem os mais comuns, nesta pesquisa foi utilizado o poliuretano termoplástico (TPU), pelo fato de que praticamente todos os suportes de câmera de drones usam esse polímero em sua fabricação. Os autores El-Shekeil et al. (2012) descrevem o TPU como um dos materiais com melhor resistência à abrasão no setor elastomérico, suas propriedades mais importantes incluem excelente resistência à abrasão, boas propriedades mecânicas com elasticidade semelhante à borracha e resistência ao rasgo. Um de seus usos mais comuns é em capas de celular, que podem ser multicoloridas ou translúcidas.

METODOLOGIA QFD

O QFD foi criado como um método para o desenvolvimento de novos produtos sustentado pelo controle total de qualidade (TQM). Durante esse período, Yoji Akao apresentou o conceito quando a indústria automobilística japonesa estava em um ambiente de crescimento rápido, com inúmeros novos produtos e mudanças de modelos. Wilson (2010) cita que as deficiências na compreensão das propostas de valor para as partes interessadas, ou seja, as necessidades do cliente, são o modo de falha mais prevalente no desenvolvimento de produtos.

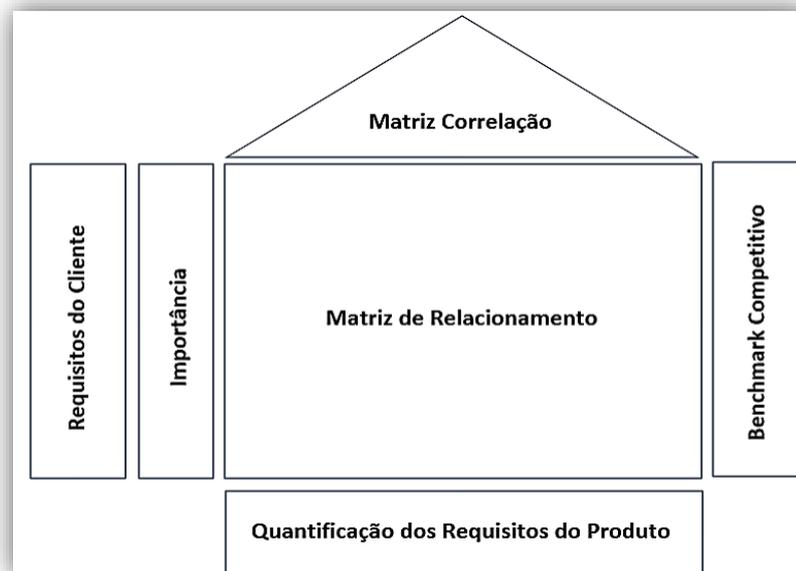
A metodologia QFD traduz os requisitos do cliente em especificações de *design* e a melhor maneira de se determinar o que é importante é observar como eles atendem aos requisitos do cliente para a posterior identificação e alocação de recursos importantes a serem utilizados durante o projeto. Para Cohen (1995) é uma ferramenta poderosa que garante a comunicação adequada entre o cliente e a equipe de *design*. O método destaca os itens importantes, tanto do ponto de vista do cliente quanto da empresa, como um mecanismo para alcançar vantagens competitivas no desenvolvimento de produtos (Miguel et al., 2003).

A pesquisa de mercado é o início da metodologia QFD, empresas precisam conhecer a opinião de seus clientes sobre seus produtos, o que é bom ou ruim para ele, o que pode ser melhorado ou o que poderia ser adicionado ao produto final. Tal processo pode ser definido como a identificação, coleta, análise e disseminação de informações de maneira sistemática e objetiva, para ajudar positivamente na tomada de decisões relacionadas à identificação e resolução de problemas de marketing (Unterleider & Sellitto, 2012).

Na pesquisa de mercado, existem três objetivos específicos: (i) traduzir as informações desejadas em um conjunto de perguntas específicas que os respondentes podem responder; (ii) motivar e incentivar o entrevistado a se envolver no assunto, colaborando espontaneamente; (iii) minimizar erros nas respostas Malhotra (2006). Algumas características do QFD são: (i) é uma técnica de gestão, auxiliando na gestão de projetos; (ii) é um método de planejamento em que os esforços de engenharia são transferidos para a fase de desenvolvimento; (iii) é um método para solução de problemas que aponta o que precisa ser feito e como pode ser feito; (iv) facilita a modelagem do conhecimento; (v) facilita a documentação de informações; (vi) facilita o transporte de informações; e (vii) para projetos de engenharia multissetoriais, permite maior criatividade (Miguel et al., 2003).

Normalmente, o QFD é associado às casas, que relacionam os requisitos do cliente e os técnicos com as características da peça. A Figura 1 representa todos os quadrantes presentes dentro do QFD.

Figura 1. Matriz QFD.



Fonte: Adaptado de (Bottani e Rizzi, 2006).

A primeira parte, matriz de relacionamento, é construída para analisar o quão forte são os requisitos do cliente em relação aos requisitos técnicos para o produto em uso. Isso representará como exatamente a empresa precisa apresentar seu produto para alcançar as características desejadas. A segunda etapa concentra-se na matriz de correlação, que correlaciona cada requisito técnico para determinar o impacto entre eles (Kiill Santos et al., 2019).

Essa parte da matriz mostra como um fator técnico interfere em outro. Os relacionamentos podem ser: fortemente positivos; positivos; fortemente negativos; e negativos. Assim, é possível perceber se uma etapa do processo de produção irá prejudicar ou auxiliar em outra fase no mesmo processo, ou se todos os fatores do projeto ajudam ou simplesmente não têm interferência (Volpato et al., 2010).

Para a construção do quadrante de referência, ou *benchmark* competitivo, Filho et al. (2009) descreve a necessidade de identificar quais são os requisitos do produto apreciados pelo mercado. Também mostra como os produtos de outras empresas se comportam com seus clientes, oferecendo a viabilidade de alcançar um resultado melhor com base em outros *designs*. A parte inferior, a quantificação dos requisitos do produto, apresenta uma comparação do protótipo desenvolvido com os concorrentes, e uma nota é calculada com base nessa comparação (Bastidas et al., 2001). Este quadrante representa o resultado físico do modelo em questão e pode representar uma conclusão técnica do QFD.

Em geral, a matriz fornecerá informações valiosas para a empresa, apontando os requisitos que precisarão da mais alta prioridade para o consumidor (Oakland & Pereira, 2007). O ciclo de desenvolvimento do produto tem uma menor incidência de erros e uma melhoria na transmissão de informações, tornando a matriz QFD uma ferramenta relevante para o mercado (Ficalora & Cohen, 2009).

Para o estudo, o foco será na primeira correlação, requisitos do cliente com requisitos técnicos. A matriz “casa da qualidade” converte o anseio do cliente para a perspectiva tecnológica, a construção inclui: (i) pesquisa de mercado; (ii) priorização de qualidade exigida; e (iii) implementação de características de qualidade (Akao & Mazur, 2003). Chao e Ishii (2004) afirmam que os requisitos do projeto são a motivação e os objetivos do projeto são buscados pela gestão ou pela organização. Eles também podem incluir requisitos específicos para o produto, como "melhorar a facilidade de uso" ou "melhorar a facilidade de montagem", e os valores-alvo para os requisitos técnicos são parâmetros mensuráveis para um projeto. Métricas de projeto simples incluem o orçamento do projeto, medido em valores monetários, ou o tempo de lançamento no mercado, medido em semanas, meses, etc. Eles devem ser quantidades objetivas, absolutas, em vez de relativas ou subjetivas, sempre que possível.

MERCADO DE DRONES E INOVAÇÃO

A indústria de drones está crescendo rapidamente, muitos são utilizados para diversas tarefas, dentre elas, agronomia, filmagem, inspeção externa de edifícios, vigilância militar aérea, pesquisa meteorológica, etc. Especialmente no Brasil, a agronomia utiliza drones para inspeção, análise de plantações, aplicação de fertilizantes e controle de pragas (Cavalcante et al., 2022).

Drones de consumo, como a série DJI PHANTOM e 3DR, equipados com câmeras GoPro®, estão previstos para revolucionar a tecnologia de jogos e o mercado de eletrônicos ao longo do período de previsão. A ideia de visualizar zonas inexploradas e experiências

contemporâneas de captura de vídeo por drone em dimensões espaciais 3D aumentou as vendas de produtos tecnológicos associados a drones (Consumer Drone Market, 2023).

Atualmente, na indústria de *hobbies*, os drones são usados em grandes corridas, como a Drone Racing League (DRL), que se concentra em pilotos de todo o mundo competindo entre si pela volta mais rápida em uma pista de alta velocidade.

O mercado bruto de drones de consumo (concentrados em drones de corrida, foto e vídeo) foi avaliado em USD 4.120,8 milhões em 2022 (Consumer Drone Market, 2023). Representando, assim, um mercado promissor para investimentos e crescimento de tecnologia.

MÉTODO DE PESQUISA

CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

O presente estudo utilizou o modelo proposto por Silva e Menezes (2005) para classificação da pesquisa dentro das quatro abordagens: natureza; objetivos; forma de abordar o problema; e procedimentos técnicos.

Quanto à natureza, o trabalho se enquadra como pesquisa aplicada, onde tem como objetivo gerar conhecimento para aplicação prática da ferramenta QFD e prototipagem rápida (impressão 3D). A respeito dos objetivos, pode ser considerada como explicativa, onde fatores que influenciam certos fenômenos são identificados e em seguida buscam-se a razão do seu acontecimento. A forma de abordagem define-se como qualitativa onde existe uma relação entre objetividade e subjetividade que não pode ser traduzido diretamente em números, onde é correlacionada a opinião do cliente em características subjetivas com parâmetros, numéricos e objetivos, de engenharia. Por fim, os procedimentos técnicos envolvidos são a pesquisa experimental, onde prototipagem e simulação de variáveis são utilizados, como também a pesquisa bibliográfica, por utilizar de conhecimento previamente publicado acerca de todo o contexto estudado.

CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO

O modelo de impressora 3D utilizado neste estudo, a Two Trees Sapphire S, trata de uma impressora FFF com uma caixa acrílica para retenção térmica, capaz de imprimir uma variedade de filamentos e voltada mais para *hobby*. É uma opção mais acessível que o consumidor pode ter em casa para alguns projetos pequenos e artesanais.

O objeto escolhido para este estudo é um suporte para GoPro®, que é fixado na estrutura do drone, geralmente posicionado na parte frontal superior, com um ângulo que representa o quanto o drone inclinará quando estiver em alta velocidade em condições de corrida. Esse suporte é feito de material flexível, normalmente filamento TPU, e impresso em 3D em muitas formas e *designs* que atendem à vontade do cliente.

Uma das vantagens da impressão 3D é que o cliente pode escolher a cor, algumas variações na forma, ângulo e como será fixado no quadro. A fixação geralmente é feita através de parafusos que já são utilizados no quadro Figura 2, assim não há peso extra, mas também é possível usar tiras de Velcro® ou abraçadeiras para prender o suporte ao quadro.

Figura 2. Drone de corrida com suporte impresso em cor amarela equipado juntamente com câmera GoPro®.

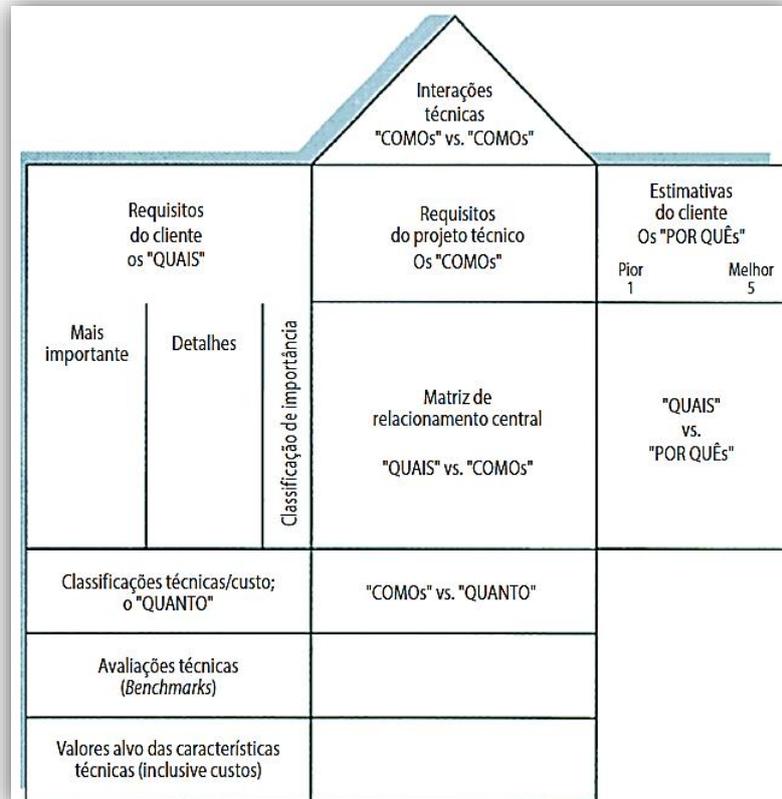


Fonte: Autores (2023).

O suporte impresso em 3D para câmeras é uma peça genuinamente interessante para se trabalhar, pois, devido a sua simplicidade no *design* e aplicação, traz a oportunidade de se desenvolver um novo suporte com base em uma metodologia rápida e simples, como o QFD e a confecção de um protótipo funcional através da impressão 3D.

A seguir é descrito os passos utilizados para confecção do QFD seguindo como base a casa da qualidade da Figura 3 proposta por Oakland e Pereira (2007).

Figura 3. QFD proposto.



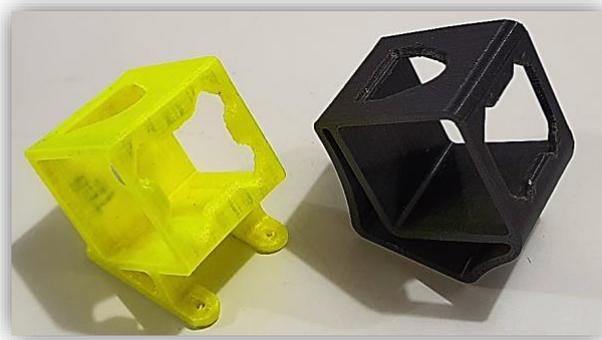
Fonte: Oakland e Pereira (2007)

A primeira etapa do QFD foi a elaboração e aplicação de um questionário *online*, no qual as pessoas podiam inserir até quatro características que representam o que procuram ao comprar um novo suporte e/ou o que gostariam de ver em um suporte recém-projetado, além de atribuir uma nota de importância entre 1 e 5, sendo 1 menos importante e 5 altamente importante. A população foi escolhida em um grupo de aplicativo de mensagens instantâneas de pessoas que participam do campeonato de corrida de drones em Curitiba, devido à baixa popularidade das corridas no Brasil, ficou difícil uma coleta de dados mais completa e robusta, por isso a escolha de um grupo de Curitiba onde já era conhecido dos autores. A segunda etapa do QFD foi a análise das respostas, como eram abertas e tinham um pouco de diferença na grafia, como palavras sinônimas “leve” e “baixo peso”, os dados precisaram ser refinados em uma planilha separada e, em seguida, selecionadas as cinco características mais mencionadas. Optou-se por selecionar apenas cinco características para obter uma amostra com pelo menos três ou mais menções.

Em seguida a etapa três foi a confecção da matriz QFD (quadrante de requisitos técnicos) com base no processo de impressão 3D, e as métricas de engenharia foram determinadas com base nos estudos publicados de Dwyer et al., (2023); Lubombo e Huneault (2018); Tymrak et al., (2014). Foram escolhidas, considerando o impacto direto no produto final, como o tipo de filamento escolhido com base na resistência mecânica de alongamento na ruptura; precisão dimensional; quantidade de rebarbas de filamento; estrutura de preenchimento; espessura da camada; tipo de fixação; peso total. Esses parâmetros podem ser mensuráveis ou escolhidos entre algumas outras opções, como o tipo de fixação, que pode ser feito com parafusos ou abraçadeiras, precisão dimensional que será analisada utilizando um paquímetro, parâmetros de espessura de camada e tipo de preenchimento podem ser selecionados dentre opções disponíveis no *software* CURA, o peso total será aferido após o pós-processamento do protótipo utilizando uma balança de precisão e a quantidade de rebarbas será subjetivo à quantidade presente de rebarbas no pós-impressão. Na etapa quatro, notas foram adicionadas ao quadrante “matriz de relacionamento central” com base em setas, o sinal de seta para baixo representa uma interação fraca, o sinal de menos representa uma interação neutra e o sinal de seta para cima indica uma interação forte. Como também a correlação entre as métricas de engenharia através de figuras que quantificam esse comparativo, a fim de se identificar parâmetros que possam afetar uns aos outros. Essa correlação foi feita baseado nos resultados dos protótipos, como também em configurações padrões fornecidos pelo *software* CURA.

Então na quinta etapa, dois produtos de concorrentes foram analisados, um deles de uma empresa brasileira que imprime sob demanda apenas enviando o arquivo de impressão 3D, e a outra empresa é da China, comprada por meio do site Banggood, mas o produto chinês é especificamente desenvolvido para quadros com fixação genérica em drones de corrida, a Figura 4 mostra os dois suportes.

Figura 4. Opções de concorrentes (esquerda é do Brasil, direita é da China).



Fonte: Autores (2023).

Após a análise de ambos Figura 5, um *benchmark* competitivo foi desenvolvido utilizando os mesmos parâmetros e setas para comparar as respostas do cliente com os produtos dos concorrentes (colunas “Produto nacional” e “Produto chinês”) entregavam Figura 5. Para fins futuros, esse referencial foi comparado com o protótipo do estudo. Depois de selecionados os parâmetros mais importantes, sendo eles: encaixe justo da câmera; durabilidade a impacto; baixo peso; acabamento superficial; e antivibração. O esboço CAD foi o primeiro passo, utilizando *software* de modelagem 3D que pode exportar arquivos especificamente para as impressoras 3D.

Figura 5. Matriz QFD completa.

Requerimentos do cliente	Importância para o cliente (0 a 10)	Métricas de engenharia							Produto nacional	Produto chinês
		Filamento (Baseado na resistência a ruptura)	Precisão dimensional (x,y,z, +/- 0,2mm)	Rebarbas de filamento	Estrutura de preenchimento	Espessura de camada	Tipo de fixação	Peso total		
Encaixe justo da câmera	9	—	↑	↑	↓	—	↓	↓	↑	↓
Durabilidade a impacto	7	↑	↓	—	↑	—	↑	↑	↑	↑
Baixo peso	6	↑	↓	↑	↑	—	↑	↑	↑	↓
Acabamento superficial	6	↑	↑	↑	—	↑	—	↓	↓	↑
Antivibração	3	↑	↓	↓	↑	↓	↑	—	—	—
Métricas da especificação		↑	+/-0,2mm	Mínimo	60%	0,2mm	Parafusos	20g		
Benchmark do protótipo		↑	-0,2mm	Aceitável	60%	0,2mm	Parafusos	14g		
		Alto	Baixo	Neutro		Muito alto	Alto	Baixo		Muito baixo
Correlação entre requerimentos e métricas		↑	↓	—	Correlação entre métricas de engenharia	○	⬡	⊗	⊘	

Fonte: Autores (2023).

A etapa final, de número seis, foi a criação do protótipo referente ao objetivo do estudo por *software* CAD, exportado como arquivo STL (*Surface Tessellation Language*) e, posteriormente, fatiado (ou seja, dividida em várias camadas), utilizando o *software* Cura 4.5 (Ultimaker). Melnikova et al. (2014) descreveram algumas precauções importantes a serem consideradas, como: a posição do modelo na impressora; o problema de faces inclinadas ($> 45^\circ$) que exigem material de suporte; e o tipo de preenchimento dentro do objeto. Essa última etapa foi repetida até atingir o resultado esperado e feita as análises finais do estudo.

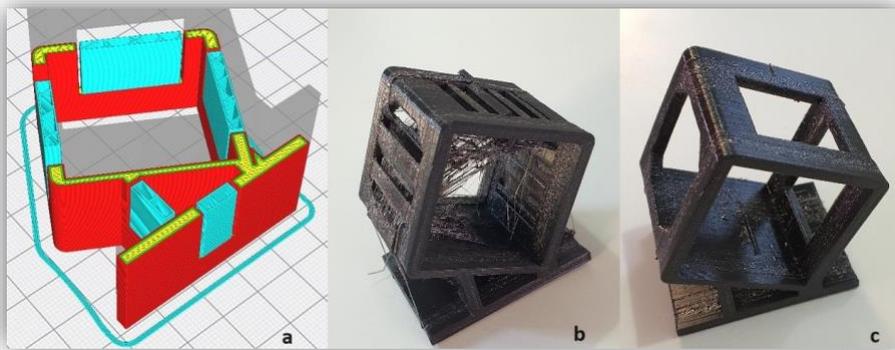
A matriz QFD Figura 5 consiste nos parâmetros do cliente compostos pelos cinco mais votados, obtidos através da pesquisa amostral realizada no início do estudo (etapa um e dois) e que são, em ordem crescente de importância: encaixe justo da câmera; durabilidade a impacto; baixo peso; bom acabamento superficial; antivibração. As sete métricas de engenharia sendo elas: tipo de filamento; precisão dimensional; rebarbas de filamento; estrutura de preenchimento; espessura da camada; tipo de fixação; e peso total, definidas na etapa três. Como o foco do estudo não foi na variação dos parâmetros na impressão 3D, essas métricas foram escolhidas com base na facilidade de configuração dentro do *software* CURA (seguindo alguns padrões de configurações pré-estabelecidos pelo próprio *software*) e familiaridade dos autores com as configurações.

Os requerimentos do cliente seguiram uma ordem decrescente de acordo com o grau de importância, ou seja, os mais votados receberam um valor maior que foi normalizado para uma escala de 0 a 10. Esses requerimentos tiveram uma correlação traçada pelos autores para entender qual impacto cada métrica de engenharia teria em cada um, ou seja, setas para cima teriam um alto impacto, para baixo seria um impacto menor e o traço é um impacto neutro. Utilizando a mesma legenda de correlação – porém, com intuito de dar uma nota –, os produtos nacional e chinês tiveram notas atribuídas, correlacionando com os requerimentos do cliente, por exemplo: o encaixe justo da câmera tem uma seta para cima caso essa característica seja bem avaliada no produto. Já na linha de “métricas da especificação”, seriam os valores mínimos ou características a serem alcançados pelo protótipo. A linha de “*Benchmark* do protótipo” é avaliação final do melhor protótipo criado. Por fim, a legenda para correlação entre as métricas de engenharia seria a influência de umas com as outras dentro das configurações do *software* CURA (para métricas controladas pelo programa) ou em relação à variação de uma com a outra presenciado pelos autores do artigo durante o processo.

Após a análise do QFD, algumas métricas de engenharia foram escolhidas para iniciar a investigação, começando pelo tipo de filamento. A escolha do TPU foi baseada na especificação de alongamento na ruptura, onde o ABS tem 30%, o PLA tem 160% e o TPU tem 670%. Quanto maior for esse valor, o material é mais flexível e apresenta uma alta capacidade de absorção de impacto. Isso se torna interessante devido à finalidade da peça. Drones de corrida sofrem muitas quedas durante a corrida e podem atingir o solo em altas velocidades, razão pela qual é necessário um material altamente flexível.

O protótipo foi criado com base em um *design* simples, com estruturas de suporte simples, paredes com base quadrada e 100% de preenchimento, como mostra a Figura 6(a) com o *design* CAD fatiado no *software* Cura 4.5 (Ultimaker). As especificações padrão do fabricante para o filamento TPU eram de 225° Celsius de temperatura de extrusão e sem aquecimento de mesa. Todas as outras especificações do *software* Cura 4.5 (Ultimaker) foram mantidas como padrão.

Figura 6. Protótipo V01 (a) protótipo fatiado no *software* CURA 4.5, (b) antes e (c) depois do acabamento.

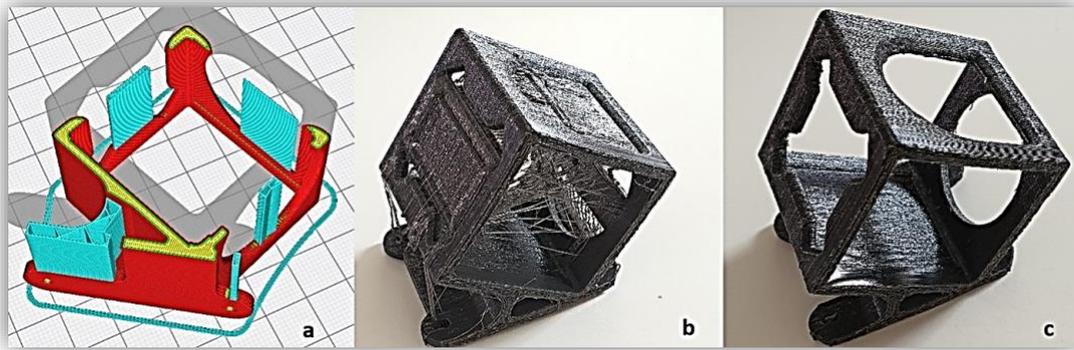


Fonte: Autores (2023).

Ao tentar tornar o *design* o mais simples e leve possível, o resultado apresentou problemas, como rebarbas, e o peso total foi maior do que o esperado, sendo esse apresentando 21 g. Por outro lado, a câmera se encaixou muito bem e a estrutura estava firme. Todas as métricas de especificação foram alcançadas, exceto o peso total, que foi 1 g maior que o padrão e apresentou muitas rebarbas de fios. Logo após o processo de impressão, o protótipo possuía todos os suportes necessários para estruturas com mais de 65° de inclinação. Isso exigiu pós-processamento para remoção dos suportes, e todos os fios precisaram ser removidos utilizando uma fonte de calor externa. A primeira versão foi impressa corretamente, porém apresentou um acabamento de superfície grosseiro, áspero ao toque, como pode ser visto na Figura 6(b) e (c). A causa desse problema não foi investigada a fundo devido à complexidade dos possíveis fatores, podendo ser causado desde variações de temperatura e humidade externa, ou até mesmo características variáveis do polímero TPU presente na amostra do fabricante.

O segundo protótipo (V02) foi projetado, com foco em menor peso, ajuste mais apertado da câmera, menos rebarbas de filamento e um *design* renovado, conforme visto na Figura 7 que representa o protótipo. A ideia de uma forma circular na parte traseira do protótipo surgiu para reduzir o peso e a necessidade de suportes durante a impressão; em sua face foi utilizado como referência o *design* da empresa brasileira que exigia menos suporte e menos material. Para fazer esse formato circular funcionar, a configuração de suporte de inclinação foi definida como 75° ou mais. O resultado foi um peso menor – 18 g – e menos suportes necessários, com todas as métricas de especificação alcançadas, como pode ser visto na Figura 7(c).

Figura 7. Protótipo V02 (a) protótipo fatiado no CURA, (b) antes e (c) depois do acabamento.



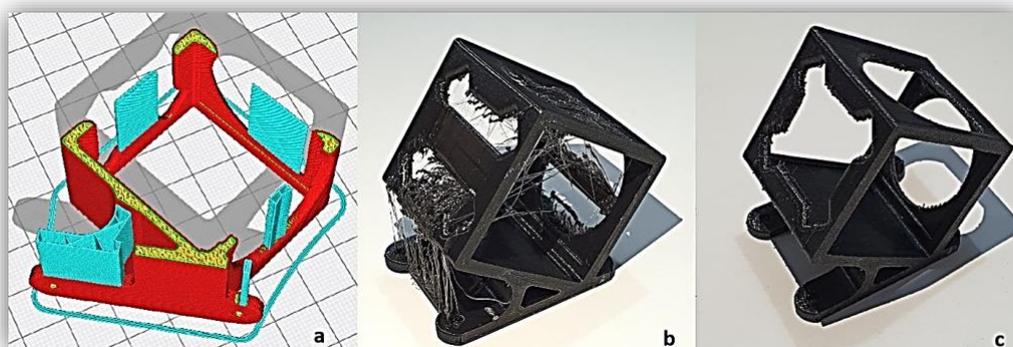
Fonte: Autores (2023).

Com um formato circular no *design*, para gerar menos suportes de sustentação (representado em azul na Figura 7a), a parte inferior de fixação no drone tem um formato menor para um peso total mais leve. Já o acabamento da superfície ficou semelhante ao protótipo V01, bastante áspero.

Para o *design* do terceiro protótipo, foi escolhida uma porcentagem de preenchimento inferior, de 60%, para que o protótipo apresente um peso inferior a 20 g, utilizando um *design* de preenchimento diferente chamado Giroide. Esse preenchimento tem um padrão mais orgânico, tridimensional, e alguns testes anteriores mostraram uma resistência superior em comparação com os preenchimentos tradicionais (Podroužek et al., 2019).

Os parâmetros do CURA também foram alterados, anteriormente utilizando as informações do fabricante do filamento e, na nova versão, foram alterados para utilizar os parâmetros sugeridos pelo *software* CURA para filamento TPU. Uma temperatura mais baixa de 220° Celsius, a mesa de impressão foi pré-aquecida a 50° Celsius, foi ajustado o parâmetro de retração para 5 mm de deslocamento e uma velocidade de 25 mm/s, com essa mudança era esperado uma redução das rebarbas a fim de se obter um acabamento de superfície mais uniforme e lisa. A Figura 8 apresenta a terceira versão (V03) do protótipo demonstrando como todas as paredes são organizadas com o preenchimento Giroide e uma menor utilização de suportes.

Figura 8. Protótipo V03 (a) protótipo fatiado no CURA, (b) antes e (c) depois do acabamento.



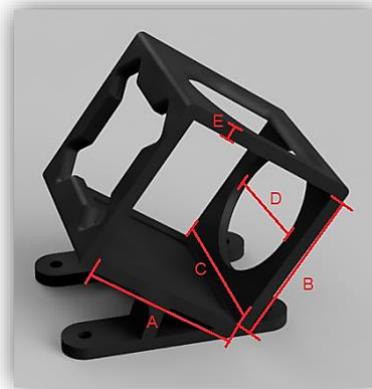
Fonte: Autores (2023).

A imagem Figura 8(a) mostra todos os suportes gerados para camadas com 90° de inclinação, o que resultou em menor quantidade de filamento em comparação com os outros protótipos. No geral, o acabamento apresentou uma menor quantidade de rebarbas, como pode ser visto na Figura 8(c), obtendo um aspecto uniforme e liso.

O último protótipo alcançou todas as especificações do QFD. A variação dimensional estava dentro da pré-definida de +/- 0,2 mm, o peso total foi o melhor parâmetro alcançado, com 14 g em comparação com os 18 g do suporte brasileiro. Além disso, o acabamento de superfície obtido apresentou semelhança à versão chinesa.

Para comparação, uma tabela foi criada com as dimensões internas (Figura 9 demonstra a localização das medidas) de todos os protótipos (v01, v02 e v03) e o *design* CAD (Projeto v01, Projeto v02 e Projeto v03), além da GoPro® para estudo de ajuste e compreensão de como o filamento TPU corresponde à contração ou alongamento, demonstrado na Tabela 1.

Figura 9. Medidas gerais.



Fonte: Autores (2023).

Tabela 1. Comparação das medidas dos protótipos (v01, v02 e v03) e do design CAD (Projeto CAD v01, Projeto CAD v02 e v03).

Medidas em mm	B	A	C	D	E
V01	35,8	35,8	39,9	-	2 - 3
V02	34,8	36,9	39,9	29,9	3,2
V03	34,9	36,8	39,8	29,8	3,2
Projeto CAD V01	36	36	40	-	2 - 3,5
Projeto CAD V02 e V03	35	37	40	30	3
GoPro®	38	36,6	38	-	-

Fonte: Autores (2023).

Cada dimensão apresentou contração em comparação com o Projeto (*design* CAD). No entanto, com esses parâmetros de contração, as dimensões gerais respeitaram a precisão dimensional de 0,2 mm de desvio. Outro ponto a considerar é a forma geral da circunferência, representada por D, impressa com poucos defeitos devido ao suporte no centro, mas a medida foi alcançada com um máximo de 0,2 mm de desvio.

O TPU mostrou ser um pouco difícil de se trabalhar, as medidas foram respeitadas, porém, devido à elasticidade do material ele pode ser facilmente deformado. Para um projeto que requer alta precisão, o TPU não é recomendado, mas para um projeto que exige menos precisão, e alta elasticidade para fins de compressão, esse material pode alcançar resultados satisfatórios.

O protótipo v03 atingiu todas as especificações mínimas pré-definidas e algumas obtiveram um melhor resultado que o esperado, como o peso total, que obteve uma redução de 30% do valor pré-definido e a qualidade do acabamento superficial, que apesar das rebarbas geradas pós-impressão, um acabamento pôde ser feito e o protótipo ficou com uma superfície uniforme e lisa.

Todo o processo foi desenvolvido seguindo pequenos passos que foram repetidos e avaliados até que um bom resultado fosse alcançado. Alguns protótipos foram projetados e corrigidos, na etapa do *design* 3D da peça, várias vezes na tentativa de alcançar o melhor resultado, e raramente esse resultado é obtido na primeira tentativa. O desenvolvimento de produtos é uma tarefa repetitiva, gradual e lenta que requer muito trabalho de toda a equipe.

CONCLUSÃO

Como um desenvolvimento de produto baseado na metodologia QFD, este estudo alcançou seu propósito. O último protótipo apresentou melhorias significativas quando comparado com os concorrentes, com a maioria dos parâmetros dos clientes alcançados. O ajuste apertado da câmera, que representa os parâmetros dimensionais, foi medido e testado com uma câmera real, e o resultado foi promissor, com um encaixe justo respeitando todas as dimensões. O parâmetro de peso também foi alcançado sendo menor do que o melhor concorrente analisado e um acabamento de superfície liso, muito próximo do concorrente chinês e melhor do que o brasileiro.

Este artigo veio para ajudar a entender como a metodologia QFD poderia ser aplicada como uma ferramenta para produtos impressos em 3D que precisam atender aos parâmetros dos clientes. Para um estudo futuro, dois parâmetros poderiam ser medidos e avaliados para confirmar este projeto: durabilidade ao impacto, que poderia ser testada com ensaios mecânicos relacionados ao impacto; e parâmetros antivibração. Além disso, o QFD poderia ser usado com a extensão completa de cada etapa, proporcionando uma análise mais rica de todos os aspectos da metodologia.

REFERÊNCIAS

Akao, Y. & Mazur, G. H. (2003). The leading edge in QFD: Past, present and future. Em *International Journal of Quality & Reliability Management* (Vol. 20, Número 1, p. 20–35). <https://doi.org/10.1108/02656710310453791>

Banjanin, B., Vladić, G., Pál, M., Baloš, S., Dramićanin, M., Rackov, M., & Knežević, I. (2018). Consistency analysis of mechanical properties of elements produced by FDM additive manufacturing technology. *Revista Materia*, 23(4). <https://doi.org/10.1590/s1517-707620180004.0584>

Bastidas, G., Nery, R., & Carvalho, M. M. (2001). *Uso do qfd no setor de serviços: avaliação de uma transportadora rodoviária de carga*.

Bottani, E. & Rizzi, A. (2006). Strategic management of logistics service: A fuzzy QFD approach. *International Journal of Production Economics*, 103(2), 585-599. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2005.11.006>

Cavalcante, W. S. da S., Da Silva, N. F., Teixeira, M. B., Neto, G. Z., Filho, F. R. C., Cunha, F. N., & Corrêa, F. R. (2022). Tecnologias e inovações no uso de drones na agricultura / Technologies and innovations in the use of drones in agriculture. *Brazilian Journal of Development*, 8(1), 7108-7117. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n1-481>

- Chao, L. P. & Ishii, K. (2004). Project quality function deployment. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 21(9), 938-958. <https://doi.org/10.1108/02656710410561763>
- Cohen, L. (1995). *Quality function deployment: how to make QFD work for you*. Prentice Hall.
- Consumer Drone Market. (2023). <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/consumer-drone-market>
- Cooper, G. R. (2000). *Winning with new products: doing it right* (6^o ed, Vol. 64).
- Dwyer, C. M., Carrillo, J. G., De la Peña, J. A. D., Santiago, C. C., MacDonald, E., Rhinehart, J., Williams, R. M., Burhop, M., Yelamanchi, B., & Cortes, P. (2023). Impact Performance of 3D Printed Spatially Varying Elastomeric Lattices. *Polymers*, 15(5), 1178. <https://doi.org/10.3390/polym15051178>
- El-Shekeil, Y. A., Sapuan, S. M., Abdan, K., & Zainudin, E. S. (2012). Influence of fiber content on the mechanical and thermal properties of Kenaf fiber reinforced thermoplastic polyurethane composites. *Materials and Design*, 40, 299-303. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.04.003>
- Ficalora, J. P. & Cohen, L. (2009). *Quality Function Deployment and Six Sigma A Qfd Handbook*. Prentice Hall.
- Filho, E. R., Ferreira, C. V., Miguel, P. A. C., Gouvinhas, R., & Naveiro, R. (2009). *Projeto do Produto* (1^o ed). Elsevier.
- Haryńska, A., Gubanska, I., Kucinska-Lipka, J., & Janik, H. (2018). Fabrication and characterization of flexible medical-grade TPU filament for Fused Deposition Modeling 3DP technology. *Polymers*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/polym10121304>
- Kiill Santos, J., Paulo de Souza, J., & José Borges, W. (2019). Matrix QFD: study and application in a fashion confectionary company. *Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas*, 14(1), 48-76. <https://doi.org/10.15675/gepros.v14i1.2053>
- Lubombo, C. & Huneault, M. A. (2018). Effect of infill patterns on the mechanical performance of lightweight 3D-printed cellular PLA parts. *Materials Today Communications*, 17, 214-228. <https://doi.org/10.1016/J.MTCOMM.2018.09.017>
- Silva, L. & Menezes, M. (2005). *Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação* (4^o ed). <http://www.ufsc.brCTCCentroTecnológicohttp://www.ctc.ufsc.brhttp://www.ced.ufsc.brhttp://www.cin.ufsc.br>
- Malhotra, N. K. (2006). *Pesquisa de marketing: uma orientação aplicada* (4^o ed). Bookman.
- Melnikova, R., Ehrmann, A., & Finsterbusch, K. (2014). 3D printing of textile-based structures by Fused Deposition Modelling (FDM) with different polymer materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 62(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/62/1/012018>
- Miguel, P. A. C., Telfser, M., Maruca, A., Gallonetti, A., Saracura, A., Martins, L., Hori, M., Ribeiro, P., Campos, R. de, Marconato, T., & Mora, V. (2003). Desdobramento da qualidade no desenvolvimento de filmes flexíveis para embalagens. *Polímeros*, 13(2), 87-94. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282003000200005>
- Oakland, J. & Pereira, A. G. (2007). *Gerenciamento da qualidade total TQM* (1^o ed). Nobel.
- Pinto, J. K., & Kharbada, O. P. (1996). How to fail in project management (without really trying). *Business Horizons*, 39(4), 45-53. [https://doi.org/10.1016/S0007-6813\(96\)90051-8](https://doi.org/10.1016/S0007-6813(96)90051-8)
- Podroužek, J., Marcon, M., Ninčević, K., & Wan-Wendner, R. (2019). Bio-inspired 3D infill patterns for additive manufacturing and structural applications. *Materials*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/ma12030499>
- Simões, C. L., Viana, J. C., & Cunha, A. M. (2009). Mechanical properties of poly(ϵ -caprolactone) and poly(lactic acid) blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 112(1), 345-352. <https://doi.org/10.1002/app.29425>
- Stansbury, J. W. & Idacavage, M. J. (2016). 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. *Dental Materials*, 32(1), 54-64. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.09.018>
- Su, A. & Al'Aref, S. J. (2018). History of 3D printing. Em *3D Printing Applications in Cardiovascular Medicine* (p. 1-10). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803917-5.00001-8>
- Tymrak, B. M., Kreiger, M., & Pearce, J. M. (2014). Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Materials & Design*, 58, 242-246. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2014.02.038>
- Unterleider, C. E. A. & Sellitto, M. A. (2012). Aplicação do qfd em etapas iniciais do desenvolvimento de um odorizador de automóveis. *Revista Produção Online*, 12(2), 377-401. <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v12i2.848>
- Volpato, L. F., Meneghim, M. de C., Pereira, A. C., & Ambrosano, G. M. B. (2010). Planejamento da qualidade nas unidades de saúde da família, utilizando o Desdobramento da Função Qualidade (QFD). *Cadernos de Saúde Pública*, 26(8), 1561-1572. <https://doi.org/10.1590/S0102-311X2010000800010>
- Wilson, E. (2010). Maximizing Designers' Impact on Market Success through Product Definition. *Design Management Journal (Former Series)*, 4(4), 62-68. <https://doi.org/10.1111/j.1948-7169.1993.tb00374.x>