



NOVA
NOVA SCHOOL OF
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA E INDUSTRIAL

José Tomás Fabião Paulino

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

CONTRIBUTO PARA A INTEGRAÇÃO ENTRE TEORIA
AXIOMÁTICA, MATRIZ ESTRUTURAL DE PROJETO E
PROJETO PARA CUSTO NO DESENVOLVIMENTO DO
PROJETO DE ENGENHARIA

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa
setembro, 2022



CONTRIBUTO PARA A INTEGRAÇÃO ENTRE TEORIA AXIOMÁTICA, E MATRIZ ESTRUTURAL DE PROJETO E PROJETO PARA CUSTO NO DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DE ENGENHARIA

JOSÉ TOMÁS FABIÃO PAULINO

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Orientador: João Manuel Vicente Fradinho
Professor Doutor, Universidade NOVA de Lisboa

Contributo para a integração entre Teoria Axiomática, Matriz Estrutural de Projeto e Projeto para Custo no desenvolvimento do projeto de engenharia

Copyright © José Tomás Fabião Paulino, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que

Este documento foi criado com o processador de texto Microsoft Word e o template NOVAthesis Word [11].

Aos meus pais, José Paulino e Fernanda Rodrigues

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, **Professor João Fradinho**, por toda a disponibilidade demonstrada ao longo desta caminhada.

Aos **meus amigos**, por me terem proporcionado uma experiência incrível, durante estes anos e por nunca me deixarem desistir dos meus objetivos.

À **minha namorada**, por todo o apoio, paciência e motivação ao longo de todo este percurso nos meus últimos anos.

Por último, resta-me agradecer aos **meus pais e restante família** por todo o apoio e motivação que me prestaram ao longo da minha vida académica e pessoal. Foi por eles que me tornei na pessoa que sou hoje.

RESUMO

O processo de decisão no desenvolvimento de um projeto é extremamente importante, uma vez que uma decisão pode mudar o rumo do mesmo, tendo um grande impacto no produto final, tanto no desempenho como a nível de custos, tempo de elaboração, qualidade e sustentabilidade.

Neste trabalho, foram estudadas individualmente três apoios ao processo de projeto, a Teoria Axiomática, a Matriz Estrutural de Projeto e a Projeto para Custo. Ao longo do mesmo, foram analisadas cada uma individualmente, apresentando os seus pontos fortes, as suas limitações, e as suas complementaridades. Posto isto, foi desenvolvido o contributo de todas as metodologias num projeto, destacando os seus pontos fortes, as suas limitações, de forma a colmatar possíveis lacunas existentes, bem como foi criado um caso de estudo onde a aplicação da metodologia proposta resultou numa redução de 41% no tempo de fabrico e 34% em filamento.

Com este desenvolvimento pretende-se elevar o processo de decisão, o desenvolvimento e o melhoramento de um projeto de engenharia.

Palavras chave: Teoria Axiomática, Matriz Estrutural de Projeto e Projeto para Custo, Projeto de Engenharia.

ABSTRACT

The decision process in the development of a design is extremely important, since a decision can change the course of the whole project, having a great impact on the final design, in terms of elaboration time, quality and sustainability.

In this paper, three supports to the design process were analyzed, Axiomatic Design, Design Structure Matrix and Design for Cost. These three were analyzed individually, presenting their strengths and their complementarities. That said, the contribution of all methodologies was developed in this paper, highlighting their strengths, limitations, the way they tackle the deficiency of the DTMs, as well as a case of study was developed, where the implementation of the proposed methodology resulted in a 41% reduction of manufacturing time and 34% less on filament.

From this paper, it's intended to improve the decision process on the field of engineering.

Keywords: Axiomatic Design, Design Structure Matrix, Design for Cost, Design.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Objetivos da Dissertação.....	22
1.2	Estrutura da Dissertação.....	23
2	TEORIA AXIOMÁTICA	25
2.1	Modelo Conceptual da Teoria Axiomática	25
2.1.1	Domínio do Cliente	26
2.1.2	Domínio Funcional	26
2.1.3	Domínio Físico.....	27
2.1.4	Domínio do Processo	27
2.2	Ziguezague	27
2.3	Axioma da Independência.....	28
2.4	Axioma da Informação.....	31
2.5	Pontos Fortes da Teoria Axiomática	32
2.6	Limitações da Teoria Axiomática.....	32
2.7	Caso de estudo – Projeto de um lavatório.....	33
3	PROJETO PARA CUSTO	35
3.1	Modelo Concetual do DfC	35
3.2	Pontos Fortes do DfC.....	38
3.3	Limitações do DfC.....	39
3.4	Caso de Estudo – Projeto para Custo.....	39

4	MATRIZ ESTRUTURAL DE PROJETO.....	43
4.1	Modelo Conceptual da Matriz Estrutural de Projeto.....	43
4.2	Pontos Fortes da Matriz Estrutural de Projeto.....	48
4.3	Limitações da Matriz Estrutural de Projeto.....	48
4.4	Exemplos da implementação da Matriz Estrutural de Projeto.....	49
4.4.1	Exemplo 1 – Gestão de base de dados.....	49
4.4.2	Exemplo 2 - Como ferramenta de organização.....	50
5	INTEGRAÇÃO ENTRE DTMS.....	51
5.1	Integração entre Teoria Axiomática e Projeto para Custo.....	51
5.1.1	Exemplo da EAD.....	52
5.1.2	Vantagens provenientes dos pontos fortes das duas metodologias.....	55
5.2	Integração entre DSM e TA.....	57
5.2.1	Exemplo 1.....	58
5.2.2	Exemplo 2.....	59
5.3	Integração entre DSM e DfC.....	61
6	METODOLOGIA PROPOSTA - INTEGRAÇÃO DAS TRÊS METODOLOGIAS.....	63
6.1	Modelo Conceptual.....	63
6.2	Concepção da Metodologia: Caso de Estudo do Espremedor de Citrinos.....	66
7	CONCLUSÃO.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução dos custos no projeto.	21
Figura 2 - Representação dos domínios da TA.....	26
Figura 3 - Decomposição em ziguezague entre os domínios funcional e físico.....	27
Figura 4 – Processo Da Teoria Axiomática.....	28
Figura 5 – Tipos de projeto de acordo com o Axioma da Independência.....	29
Figura 6 - Caso de Estudo da AD.	33
Figura 7 - Caso de estudo da AD com os DPs reformulados.....	34
Figura 8 - Fatores que influenciam o custo.....	37
Figura 9 – Modelo Conceptual do DfC.....	38
Figura 10 – Análise de custos do caso de estudo do DfC.....	40
Figura 11 - Soluções desenvolvidas para o suporte da máquina CNC.....	40
Figura 12 - Soluções possíveis para os <i>grippers</i>	41
Figura 13 - Efeitos da aplicação dos algoritmos.....	44
Figura 14 - Exemplo matriz DSM.....	44
Figura 15 - Informações registadas na matriz DSM.....	46
Figura 16 – Propagação de alterações.....	47
Figura 17 – Integração da Teoria Axiomática e a Área da Economia.....	53
Figura 18 – Teoria Axiomática Aumentada(EAD)	53
Figura 19 – Exemplo da EAD.....	54
Figura 20 – Matriz resultante do exemplo da EAD.....	55
Figura 21 - Matriz DSM.....	58
Figura 22 - Matriz DSM com <i>clusters</i>	58
Figura 23 - Matriz TA do exemplo 2.....	59
Figura 24 - Matriz DSM do exemplo 2.....	59

Figura 25 - Matriz DSM do exemplo 2 em clusters.....	60
Figura 26 - Matriz DSM e Tabela com os custos.....	61
Figura 27 - Contributo da base de dados do DfC.....	62
Figura 28 - Fluxograma de integração das três DTMs.	63
Figura 29 - Espremedor convencional.....	66
Figura 30 - Matriz DSM do exemplo.....	67
Figura 31 - Espremedor de citrinos.	68
Figura 32 - Matriz DSM.	69
Figura 33 - <i>Creality Ender 3 Pro</i>	70
Figura 34 - Otimização geométrica do espremedor.....	71
Figura 35 - Espremedor de citrinos.	73
Figura 36 - Espremedor acoplado à garrafa de plástico.	74

SIGLAS

ABC	<i>Activity-Based Costing</i> (Custo Baseado em Atividades)
ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i> (Acrilonitrila Butadieno Estireno)
AD	<i>Axiomatic Design</i> (Teoria Axiomática)
AV	<i>Activity Variables</i> (Variáveis de Atividade)
CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Desenho Assistido por Computador)
CE	<i>Concurrent Engineering</i> (Engenharia Concorrente)
CM	<i>Components</i> (Componentes)
CN	<i>Customer Needs</i> (Necessidades do Cliente)
CNC	<i>Computer Numerical Control</i> (Controlo Numérico Computarizado)
DfC	<i>Design for Cost</i> (Projeto para Custo)
DM	<i>Design Matrix</i> ou Matriz de Projeto
DP	<i>Design Parameters</i> ou Parâmetros de Design
DSM	<i>Design Structure Matrix</i> (Matriz Estrutural de Projeto)
DtC	<i>Design to Cost</i> (Projeto de Custo)
DTM	<i>Design Technology and Methodology</i> (Metodologias e Tecnologias de Projeto)
EA	<i>Affected Element</i> (Elemento Afetado)

EAD	<i>Extended Axiomatic Design</i> (Teoria Axiomática Aumentada)
EI	<i>Initiating Element</i> (Elemento Iniciante)
FR	<i>Functional Requirements</i> (Requisitos Funcionais)
GT	<i>Group Technology</i> (Tecnologia de Grupo)
LCC	<i>Life Cycle Cost</i> (Custo do Ciclo de Vida)
LoL	<i>Level of Interaction</i> (Nível de Interação)
PETG	<i>Polyethylene terephthalate glycol</i> (Politereftalato de Etileno)
PLA	<i>Polylactic Acid</i> (Ácido Polilático)
PV	<i>Process Variables</i> (Variáveis de Processo)
QFD	<i>Quality Function Deployment</i> (Desdobramento da Função Qualidade)
RC	<i>Resource Demand</i> (Procura do Recurso)
ToI	<i>Type of Interaction</i> (Tipo de Interação)
TPU	<i>Thermoplastic polyurethane</i> (Poliuretano Termoplástico)
TQM	<i>Total Quality Management</i> (Gestão da Qualidade)

INTRODUÇÃO

Inúmeros artigos e autores afirmam que durante a fase de projeto as decisões efetuadas determinam normalmente 70% dos custos envolvidos no projeto, no entanto, os custos de projeto apenas utilizam 10% do orçamento total [1]. Deste modo, pode-se afirmar que as decisões na fase de projeto determinam a maioria dos custos e quanto mais cedo ocorrer uma decisão ou alteração no projeto, maior será o seu impacto a nível dos custos, ou seja as decisões iniciais num projeto são muito mais significativas do que as decisões posteriores, como por exemplo na fabricação.

O gráfico presente na figura 1, indica a evolução dos custos na fase de projeto, sendo que, 70% dos custos já estão determinados quando apenas 3-4% do projeto está desenvolvido. Isto torna-se um problema, quando os responsáveis pelas decisões e rumo do projeto não têm em atenção a influência e impacto que as mesmas têm nos custos [2].

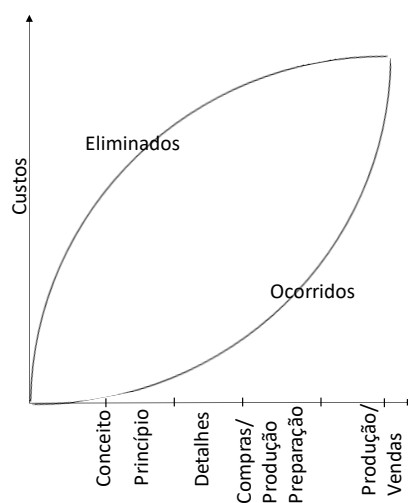


Figura 1 - Evolução dos custos no projeto. Adaptado de [2] .

Um exemplo da importância do projeto e o seu impacto do processo de decisão nos custos, é um estudo realizado pela *Rolls-Royce* no qual, uma equipa de projetistas e engenheiros de produção analisou a proveniência de custos desnecessários em 2 000 componentes. Nesse estudo foi concluído que 20% dos custos desnecessários poderiam ser reduzidos por engenheiros de produção, 30% por alterações em detalhes de desenhos e 50% em alterações no projeto [1]. Assim como é possível perceber, o impacto das decisões e as suas alterações num projeto têm um grande impacto nos custos totais.

De acordo com Burt e Boyle, entre 70 e 80% do total de custos evitáveis são controlados na fase de projeto e, muitos autores concordam que, esta fase tem o maior poder e influência no custo, sendo que algumas destas decisões acabam por ser irreversíveis. Sendo assim, a fase de projeto tem uma enorme relevância no produto e os projetistas e engenheiros de custo têm um papel muito importante no desenvolvimento do projeto. Por exemplo, os custos de fabrico e montagem são definidos na fase de projeto, uma vez que a definição destas etapas influencia as características do mesmo, tais como o material, a maquinaria e os recursos humanos a utilizar [3 , 4].

Considerando a fase de projeto uma etapa extremamente importante, é necessário melhorá-la tendo em vista a sua evolução. Assim, e tendo como objetivo o anteriormente referido, irão ser analisadas três Teorias e Metodologias de Projeto, Teoria Axiomática, Projeto para Custo e Matriz Estrutural de Projeto, de forma a dar um contributo positivo a esta etapa tão importante.

1.1 Objetivos da Dissertação

A presente dissertação tem como principal objetivo interpretar o contributo das Metodologias e Tecnologias de Projeto (DTM) referidas anteriormente, de modo a auxiliar a tomada de decisão no desenvolvimento do projeto.

De modo a concretizar o objetivo definido podem ser identificados diversos pontos cruciais para o desenvolvimento da dissertação, tais como:

- Caracterizar as três DTMs;
- Aplicação no projeto de engenharia em diferentes circunstâncias, nomeadamente, na fase de projeto, em novos projetos e em projetos de melhoria;
- Identificar os pontos fortes e limitações;
- Identificar as complementaridades;
- Identificar e apresentar casos de combinação de 2 DTMs;

- Propor uma metodologia utilizando em conjunto das três DTMs e identificação do seu contributo no desenvolvimento do projeto.

1.2 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação divide-se em sete capítulos principais.

O primeiro capítulo diz respeito à introdução, objetivos e estrutura da dissertação.

De seguida, é possível encontrar três capítulos, cada um correspondente a cada uma das DTMs, onde a metodologia de projeto, a funcionalidade, o objetivo de cada uma destas e os pontos fortes e as suas limitações são apresentados.

O quinto capítulo corresponde às integrações das metodologias, onde são agrupadas duas a duas, e são explicados os seus objetivos e as relações entre estas. Para além disso, é possível encontrar exemplos, de modo a demonstrar os benefícios das integrações.

No sexto capítulo é introduzida a proposta de integração entre as 3 DTMs, encontrando-se explicada a lógica e o raciocínio que levou à sua conceção, expondo os benefícios de utilizar estas metodologias em simultâneo.

Por último, no sétimo capítulo, é feita a conclusão da dissertação, analisando a concretização dos objetivos propostos e onde se encontram as considerações finais sobre o trabalho elaborado e possíveis futuros trabalhos na área.

TEORIA AXIOMÁTICA

2.1 Modelo Conceptual da Teoria Axiomática

A Teoria Axiomática (TA) ou *Axiomatic Design* (AD), foi desenvolvida nos anos 70 pelo professor N. P. Suh. É uma teoria de projeto utilizada para analisar novos projetos, e projetos existentes, de modo a encontrar possíveis melhorias [5]. Esta ferramenta pode ser aplicada em todas as fases do projeto, sendo uma mais-valia, pois permite desenvolver otimizações, que de outra forma não seriam tão óbvias ou que simplesmente passariam despercebidas. A Teoria Axiomática sustenta-se com o uso de dois axiomas fundamentais, o Axioma da Independência e o Axioma da Informação.

Um axioma é uma afirmação que é considerada como verdadeira, mas que não apresenta provas concretas da sua veracidade. O axioma é utilizado como premissa ou ponto de partida para permitir a dedução de bases de conhecimento. Este só é válido se não existirem contra-exemplos ou exceções associadas [6].

A TA auxilia o projetista no processo de conceção e otimização, considerando que este assenta em quatro domínios [7], representados na figura 2, que são:

- Domínio do cliente: Onde se estabelece os requisitos do cliente;
- Domínio funcional: Onde se estabelece os requisitos funcionais do sistema e as suas limitações (*Restrições*);
- Domínio físico: Onde se define os parâmetros de projeto;
- Domínio do processo: Onde são definidas as variáveis do processo.

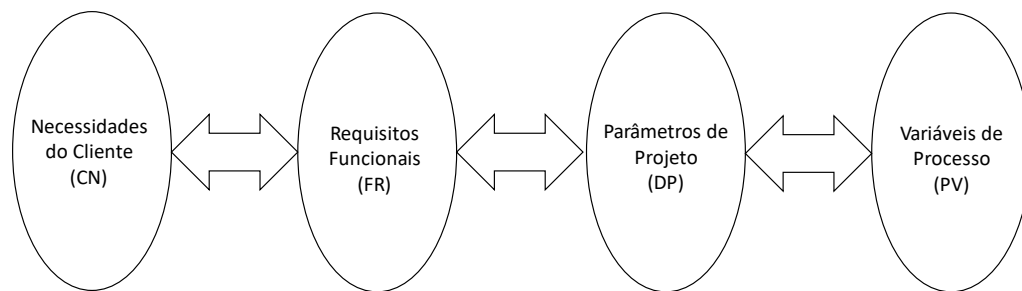


Figura 2 - Representação dos domínios da TA. Adaptado de [8].

A divisão em vários domínios simplifica o raciocínio do projetista encarregue do projeto, uma vez que projetar é um processo bastante interativo, com inúmeras variáveis. Com a TA, um projetista consegue organizar o seu raciocínio desde as necessidades do produto (domínio do cliente) até à definição dos parâmetros de produção do produto (domínio do processo), garantindo assim um cuidado e rigor em todos os fatores, desde o início do projeto [9].

2.1.1 Domínio do Cliente

No início do projeto, o responsável pelo mesmo, para alcançar as necessidades do cliente (*customer needs*- CN) procura responder a perguntas como: "o que se pretende?" ou "o quê?" em reuniões com os clientes de modo a perceber e satisfazer as necessidades dos mesmos, efetuando essas mesmas perguntas as vezes que forem necessárias de modo a poder obter e definir todos os critérios e necessidades do cliente de maneira a que definir e encaminhar o projeto da melhor maneira.

Nesta fase, devem ser consideradas as exigências e opiniões do cliente, de modo a formular as necessidades do mesmo

2.1.2 Domínio Funcional

Após definir as necessidades do cliente, é necessário encontrar os requisitos funcionais (*Functional Requirements* – FR), de modo a satisfazer as necessidades do cliente. Esta etapa requer conhecimento técnico da parte do projetista, de modo a conseguir formular os requisitos necessários.

Os FRs representam as ações ou o conjunto de ações que o produto deverá executar, de modo a satisfazer os requisitos do cliente.

2.1.3 Domínio Físico

Seguidamente, após definir os requisitos funcionais (FR) no domínio funcional, é necessário relacionar estes com os parâmetros de projeto (*Design Parameters* - DP), de modo a responder à pergunta “como?”, como é que se irá obter o resultado pretendido. É no domínio físico que se começa a caracterizar fisicamente o produto.

Para cada FR, poderão surgir um ou mais DPs que satisfaçam o mesmo. Na transição entre o domínio funcional e o domínio físico irá ocorrer um relacionamento entre os FRs e DPs, onde os mesmos vão interagir entre si, de modo a definir as funções do produto e os parâmetros que as permitam realizar. Nesta transição é aplicado o processo ziguezague.

2.1.4 Domínio do Processo

Na fase final, restam as variáveis de processo (*Process Variables*, PV). São estas variáveis que vão responder “como” será fabricado o projeto, em termos de que processos e material utilizar, “como” será elaborada a montagem, “será uma peça única ou um conjunto de peças?”.

2.2 Ziguezague

O ziguezague é um processo que se realiza entre domínios, neste caso, entre o domínio funcional e o domínio físico, alternando entre si, até que cada requisito seja satisfeito, decompondo o problema do projeto. No caso da figura 3, os FRs do primeiro nível definem os DPs do mesmo nível. Estes DPs irão definir os FRs do nível inferior, segundo nível, e assim sucessivamente, aumentando o nível de detalhe do projeto, até que a solução encontrada estiver definida.

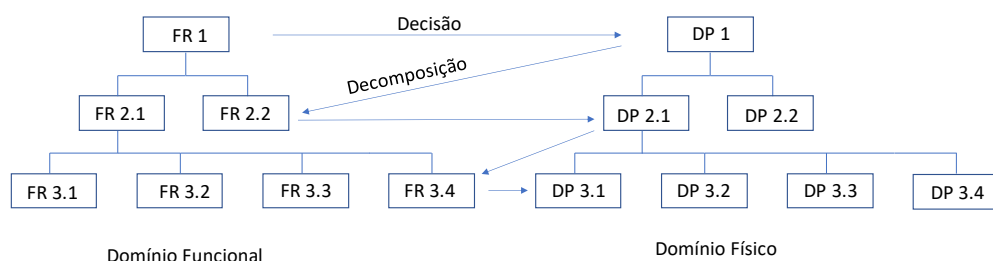


Figura 3 - Decomposição em ziguezague entre os domínios funcional e físico. Adaptado de [10].

Na figura 4, está representado o raciocínio axiomático (ziguezague) ao longo da decomposição do projeto, onde o desenvolvimento do mesmo é realizado da esquerda para a direita, sendo que o domínio à esquerda representa “o que se pretende” e o da direita representa “como é que se pode satisfazer os requisitos à esquerda”.

Ao efetuar o ziguezague, deverão ser aplicados os axiomas e verificar a sua satisfação, lembrando que, primeiro é necessário que o axioma da independência seja satisfeito e depois será utilizado o axioma da informação de modo a identificar qual o melhor projeto.

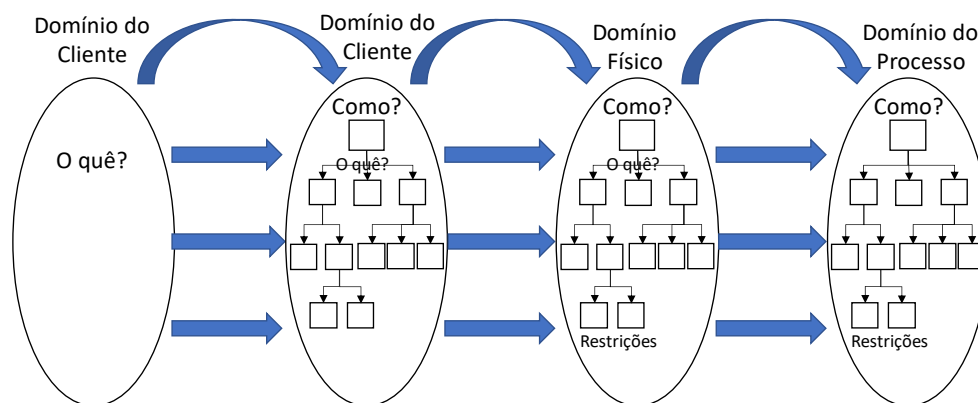


Figura 4 – Processo Da Teoria Axiomática. Adaptado de [11].

2.3 Axioma da Independência

O Axioma da Independência é definido da seguinte forma:

“In an acceptable design, DPs and FRs are related in such a way that a specific DP can be adjusted to satisfy its corresponding FR without affecting other functional requirements” [12].

O axioma da independência procura que os componentes de um sistema não dependam uns dos outros, ou seja, este axioma dita que para garantir um projeto ideal, é necessário manter independência entre os requisitos. Este axioma aplica-se nas passagens do Domínio Funcional para o Domínio Físico e, do Domínio Físico para o Domínio de Processo.

Muitas vezes, a dificuldade ao projetar um sistema complexo não está na criação de soluções (DPs) para os requisitos (FRs), mas sim em verificar e garantir a independência dos vários parâmetros.

O Axioma da Independência pretende que os FRs sejam independentes entre si, ou seja, cada FR deve ser afetado por um e um só DP. É necessário também ter atenção na escolha do DP, de modo que este apenas afete o FR a que corresponde.

As relações entre os DPs e os FRs são definidas pelo projetista e são esquematicamente representadas através da matriz de projeto [A], obtendo-se a equação (1):

$$[FR_i] = [A] \cdot [DP_j] \quad (1)$$

As características da matriz [A] irão determinar a satisfação do Axioma da Independência.

Assumindo um projeto com três FRs e com três DPs, a matriz de projeto, [A], será uma matriz 3x3, como se verifica na equação (2).

$$\begin{bmatrix} FR1 \\ FR2 \\ FR3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & X \\ X & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP1 \\ DP2 \\ DP3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Tendo em conta as características da matriz de projeto, é possível obter três tipos diferentes de projetos, representados na figura 5:

- Projeto desacoplado;
- Projeto desacoplável;
- Projeto acoplado.

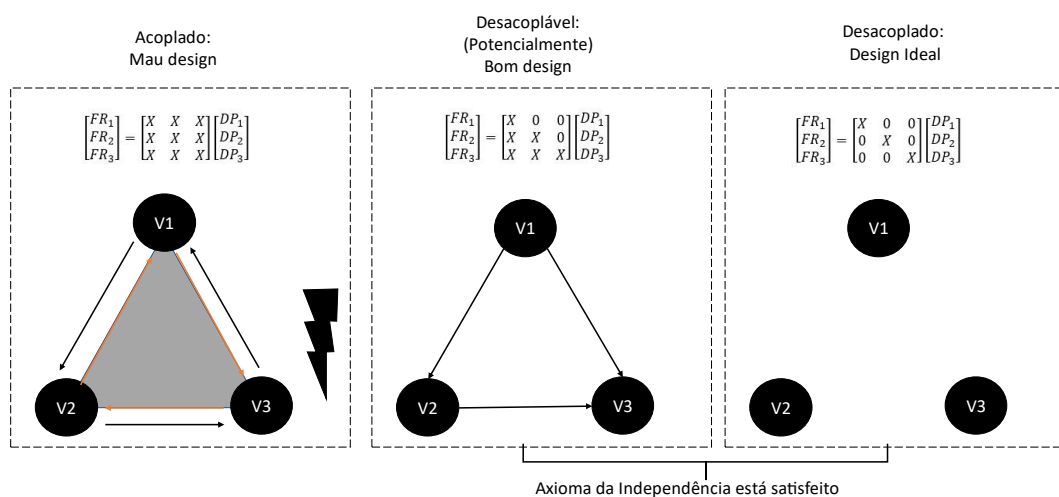


Figura 5 – Tipos de projeto de acordo com o Axioma da Independência. Adaptado de [5].

Projeto Desacoplado

O objetivo da Teoria Axiomática com o uso do Axioma da Independência é obter uma matriz diagonal, ou seja, cada um dos DPs apenas afeta o FR para o qual está projetado, resultando numa matriz igual à equação 3.

$$\begin{bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Neste tipo de projeto, como cada DP afeta o seu FR correspondente, a otimização de um DP resulta na melhoria do FR correspondente, sendo que não interessa a ordem pela qual os FRs são ajustados. Esta otimização irá resultar num melhor projeto.

Projeto Desacoplável

Nem sempre é possível obter uma matriz de projeto como no projeto desacoplado. Nessas situações, não é possível encontrar DPs que afetem um só FR. Sendo assim, a maneira mais simples de garantir um certo grau de independência, é considerando uma matriz específica, como por exemplo a que pode ser observada na equação 4.

$$\begin{bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Este projeto é caracterizado por ter uma matriz de projeto triangular, ou seja, uma matriz que só tem elementos não nulos acima ou abaixo da diagonal. Uma matriz triangular mostra que o processo pode ser otimizado se for considerada uma ordem, neste caso, ao começar por um DP que afeta um FR e, posteriormente, e percorrer o seguimento da matriz dos restantes DPs.

A situação ideal seria obter um projeto desacoplado, no entanto, as relações consequentes deste tipo de projeto, serão mais fáceis de analisar e tratar em comparação com um projeto

acoplado. Sendo assim, deve-se escolher sempre uma matriz desacoplável, em detrimento de uma acoplada.

Projeto Acoplado

O projeto acoplado não respeita o Axioma da Independência, pois os vários DPs podem influenciar um FR, verificando-se que a matriz projeto tem simultaneamente elementos não nulos acima e abaixo da diagonal. Este tipo de projeto pode ser traduzido visualmente pela equação 5.

$$\begin{bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & X \\ X & X & X \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Neste tipo de projeto, todos os DPs afetam todos os FRs. Neste caso, de modo a otimizar o projeto e respeitar o axioma da independência, terão de ser analisadas as relações entre os DPs e os FRs. Este processo terá de ser feito de forma iterativa, uma vez a cada alteração nas variáveis de cada um dos DPs, vários FRs vão sofrer alterações. Num projeto complexo com muitas variáveis, esse processo iterativo torna-se muito trabalhoso e inviável.

Ao respeitar o Axioma da Independência, pretende-se evitar este tipo de projetos.

2.4 Axioma da Informação

O Axioma da Informação é definido da seguinte forma:

"In a set of designs that satisfy the same functional requirements and conform to the independence axiom, the best is the one with the minimum information content" [13].

Primeiramente, um projeto terá de satisfazer o Axioma da Independência, no entanto, existem cenários onde diversos projetos conseguem cumprir esse requisito. Devido a este facto, recorre-se ao Axioma da Informação de modo a identificar qual o melhor projeto. Para reconhecer o melhor, compara-se o conteúdo de informação de cada um dos projetos.

Na Teoria Axiomática, a quantidade de informação está relacionada com a complexidade de um projeto e, por sua vez, a complexidade relaciona-se com a probabilidade de sucesso de um projeto.

O valor quantitativo da informação é calculado segundo a equação 6, onde o "p" corresponde à probabilidade de satisfação de um dado FR através de um DP associado a este.

$$I = \log_2 \left(\frac{1}{p} \right) \quad (6)$$

Num projeto desacoplado com "n" FRs, utiliza-se a seguinte expressão, 7, para determinar qual o melhor projeto, isto é, o que tem menor conteúdo de informação.

$$I_{total} = \sum_{i=1}^n I_i = \log_2 \left(\frac{1}{p_i} \right) \quad (7)$$

2.5 Pontos Fortes da Teoria Axiomática

Os pontos fortes que se podem retirar da Teoria Axiomática são, em primeiro lugar, a AD tem aplicabilidade no início da fase do projeto, e pode ser aplicada tanto para novos projetos, como em para melhoramentos de projetos [9]. Para além disso, esta metodologia tem a capacidade de representar um sistema complexo de forma simples e concisa. Por último, pode-se salientar ainda, a capacidade que a TA possui de partir de uma ideia complexa e desenvolvê-la de forma detalhada, ajudando na decomposição do projeto e também no processo de decisão do projetista.

2.6 Limitações da Teoria Axiomática

Por outro lado, a Teoria Axiomática apresenta também algumas limitações, uma vez que o projetista tem de ser bastante criterioso e rigoroso na seleção dos DPs e FRs [9]. Outra limitação deve-se ao facto de nesta metodologia poder não existir relação dos DPs entre si, embora haja entre os FRs e os DPs. Por fim, a TA também tem como limitação, não considerar parâmetros, como, os custos envolvidos, o tempo de fabrico ou outro tipo de relações dos DPs, como por exemplo, relações espaciais entre componentes [14].

2.7 Caso de estudo – Projeto de um lavatório

O seguinte exemplo[15] é acerca um caso de estudo, presente nas figuras 6 e 7, de um projeto de um lavatório, onde é aplicada a TA. De acordo com as necessidades do cliente, a água tem de sair da torneira com um caudal constante na temperatura desejada e, para além disso, é necessário que a água se acumule no lavatório.

Tendo em conta as necessidades do cliente, foram formulados os seguintes FRs:

- FR1 – Sair água de forma contínua com a temperatura desejada;
- FR2 – Sair água de forma contínua com o caudal desejado;
- FR3 – Acumular água no lavatório.

Depois de definir os FRs, foram considerados os seguintes DPs, de modo a satisfazer os FRs referidos anteriormente:

- DP1 – Manípulo para a água quente;
- DP2 – Manípulo para a água fria;
- DP3 – Tapa do ralo.

Resultando na seguinte matriz de projeto, equação 8:

$$\begin{bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & 0 \\ X & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$



Figura 6 - Caso de Estudo da AD. Adaptado de [15].

Como é possível verificar a matriz projeto, segundo o Axioma da Independência, corresponde a um projeto acoplado. É possível observar que, o FR1 é afetado pelo DP1 e DP2 e o FR2 pelo DP1 e DP2, indicado pelos "X's". Os DPs selecionados resultam numa interdependência entre o FR1 e FR2.

De modo a resolver a interdependência entre os FRs mencionados, os DPs foram alterados para os seguintes:

- DP1 – Alavanca de controlo da temperatura da água;
- DP2 – Alavanca de controlo do caudal da água;
- DP3 – Tampa do ralo.

Estas alterações originaram a seguinte matriz de projeto, na equação 9:

$$\begin{bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$



Figura 7 - Caso de estudo da AD com os DPs reformulados. Adaptado de [15].

A matriz de projeto com os DPs reformulados, resultou num projeto desacoplado, onde os FRs são independentes uns dos outros.

PROJETO PARA CUSTO

3.1 Modelo Conceitual do DfC

O aumento da competitividade no mercado, aliado aos requisitos e necessidades do consumidor, bem como o aumento da complexidade dos projetos, materiais e processos utilizados[16][17], fazem com que seja necessária uma redução de custos de operação de um produto[18]. De modo a realizar projetos economicamente viáveis, sem comprometer os requisitos e a qualidade do mesmo, é necessário utilizar ferramentas e metodologias, como o Projeto para Custo, *Design for Cost* (DfC) [19].

Todas as decisões efetuadas pelos projetistas na fase de projeto influenciam o custo deste, sendo que nesta fase a importância e impacto das mesmas é grande. Portanto, de modo a melhorar um projeto a nível económico é recomendado facultar as ferramentas que auxiliem os projetistas nesse aspeto, levando a que os mesmos tenham uma maior consciência do impacto das suas decisões a nível de custos num produto [20]. Posto isto, ao considerar o custo como um parâmetro de *projeto*, a DfC poderá ser uma mais-valia.

O Projeto para Custo (DfC) é uma metodologia de projeto que incorpora fatores que influenciam o *Life Cycle Cost* (LCC) ou custo do ciclo de vida, tornando o projeto mais eficiente a nível de custos [21]. O custo do ciclo de vida de um produto diz respeito a todos os custos que estão associados a um produto, nomeadamente, o custo de fabrico, o custo de venda, o custo de uso, o custo de manutenção e o custo de reciclagem [22].

"Low cost cannot be managed into a product; it must be engineered into a product." [23].

Este método é útil em qualquer circunstância, mas é melhor aplicado durante a fase de projeto, uma vez que, é onde é possível ter um maior contributo, ao atuar e ao analisar os custos do ciclo de vida de um produto, e modificar o projeto de modo a reduzir os mesmos.

No entanto, o DfC apesar de ter impacto nos fatores que influenciam o LCC, não implica uma redução da qualidade. Para atingir estas metas, o DfC diferencia-se da metodologia *Design to Cost* (DtC), um processo que também incorpora o custo como um parâmetro. No entanto, este caracteriza-se como um processo iterativo de repensar o projeto até atingir o custo objetivo ou *target costing*, implicando custos de repensar e de *rework*, e também um aumento de tempo despendido. Por outro lado, o DfC pretende eliminar o processo iterativo, projetando o projeto uma e uma vez só, resultando numa redução de custos, de carga laboral e de tempo [23].

O DfC pretende controlar o LCC ao estabelecer metas em todas as etapas e componentes de um projeto, e tomar as decisões necessárias para que o projeto elaborado cumpra as metas e limites impostos.

De modo a poder utilizar todo o potencial do DfC, é importante considerar a criatividade e originalidade da equipa, de forma a poder simplificar e inovar o projeto, cumprindo os requisitos do produto, e evitar gastos desnecessários [24].

Durante a fase de projeto, o DfC serve como uma ferramenta de decisão. Os principais *inputs* ao elaborar o projeto serão as necessidades do cliente e as especificações de produção. No entanto, o custo é um critério importante que irá influenciar a decisão que será tomada, mesmo que as estimativas de custo nesta fase não sejam precisas, tendo em conta que não existe muita informação ou que o projeto não está especificado ou desenvolvido o suficiente. Ao desenvolver o projeto, a estimativa de custo torna-se mais precisa, uma vez que se vão contabilizando mais variáveis e constrangimentos no desenvolvimento do mesmo.

As estimativas de custo são importantes pois é a partir destas que é possível perceber o impacto das decisões nos custos. Assim o projetista pode avaliar vários parâmetros e alternativas, que alteram o custo do ciclo de vida do produto e selecionar as mais viáveis.

Para além de influenciar a decisão dos projetistas, as estimativas de custo permitem um contínuo controlo do custo durante o desenvolvimento, o que permite a comparação de diferentes alternativas ou cenários de um projeto, de modo a encontrar oportunidades de custo menor.

"Design for cost relies heavily on effective cost estimating, so that the designer can use it for a quick check on cost when (s)he makes a decision" [11].

"Designing for cost is the conscious use of engineering process technology to reduce life cycle cost. [...] Designing for cost seeks to increase system performance while reducing cost" [23].

Como se pode observar na figura 8, existem inúmeras variáveis nas diferentes etapas do projeto que influenciam a estimativa, sendo assim necessário ter uma ferramenta como o DfC que consiga processar todas essas variáveis e auxiliar o projetista.



Figura 8 - Fatores que influenciam o custo. Adaptado de [11].

Para realizar e auxiliar as estimativas de custo, tendo em conta as inúmeras variáveis e a sua influência em diferentes etapas do projeto, o DfC utiliza as seguintes ferramentas [11,13]:

- Gestão de qualidade total (TQM);
- Desdobramento da função qualidade (QFD);
- Engenharia concorrente (CE);
- Método *Taguchi*;
- Custo baseado em atividades (ABC);
- Tecnologia de Grupo (GT);
- *Feature Mapping*.

Na metodologia do DfC, representada na figura 9, é possível observar que os custos estão presentes em todas as fases do projeto, desde a decisão do material ao seu acondicionamento, sempre com o auxílio de ferramentas de estimativas de custo e também com uma base de dados de informações e conhecimentos.

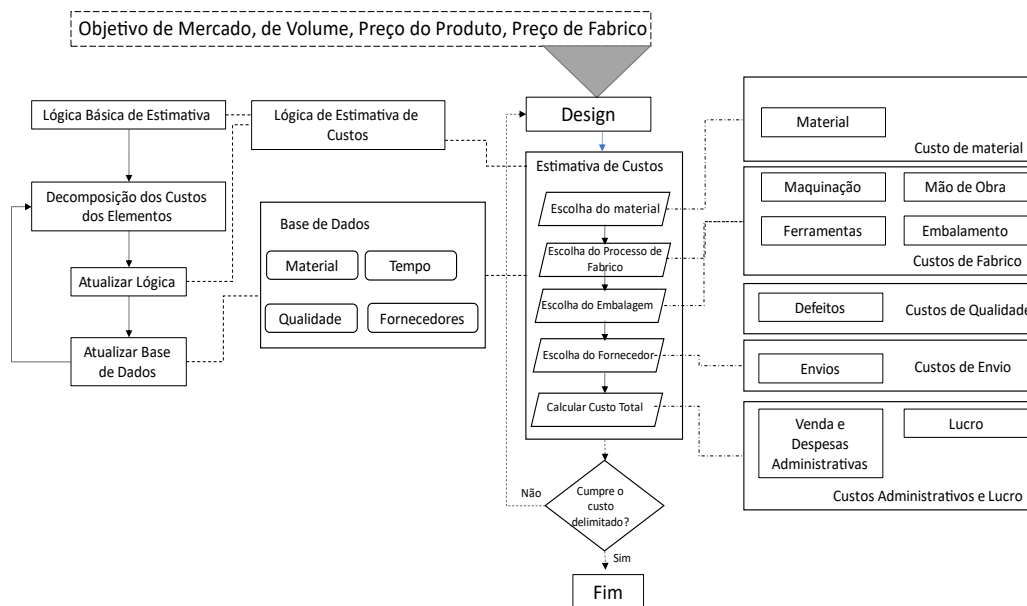


Figura 9 – Modelo Conceptual do DfC. Adaptado de [25].

Após este processo e tendo em conta as soluções e resultados obtidos, a equipa de projetistas irá desenvolver e tomar decisões de modo a obter o melhor produto possível.

Esta base de dados é um ponto fulcral, bem como as ferramentas de estimativa de custos, uma vez que, esta contém todo o tipo de informações que auxiliam o projetista, quer seja informações ou conhecimentos de projetos semelhantes.

3.2 Pontos Fortes do DfC

O DfC tem inerente a si vários pontos fortes, à semelhança da metodologia abordada anteriormente. O primeiro ponto forte a salientar, é a contribuição que esta metodologia poderá ter no que diz respeito a massivas poupanças no custo do ciclo de vida do produto. Esta redução está, também, relacionada com o melhoramento do processo de fabrico, quer em

tempo, quer em qualidade [26]. Para além disso, o DfC pode ser aplicada em todas as fases de um projeto.

3.3 Limitações do DfC

No que diz respeito a limitações, o DfC apresenta várias.

Em primeiro lugar, o facto de o DfC ser um processo que requer bastante tempo e ser mentalmente exaustivo, pode levar a que após alguns eventos, os engenheiros responsáveis pela mesma não se apercebam destes e das alterações induzidas pelos eventos. Outra limitação, é a dificuldade de conseguir ultrapassar a inércia por parte da equipa de projeto, de modo que esta metodologia possa ser implementada e bem-sucedida [16].

Por último, tem-se a falta de acesso a informações sobre os custos por parte dos responsáveis pela fase de projeto, devido à falta de transparência de informação[27].

3.4 Caso de Estudo – Projeto para Custo

O caso de estudo [28] apresentado é o de um suporte de ferramentas para uma máquina CNC, estando o foco nos componentes do suporte e dos *grippers* do carrossel da mesma.

Na figura 10 está representado o estudo de como o projeto foi abordado e analisado, onde os módulos 1 e 3 correspondem ao suporte e aos *grippers*, respetivamente. A solução analisada teve em conta a montagem, o material, o fabrico e o custo das peças.

Módulos Funcionais	Soluções	Montagem	Material	Fabrico	Custos
Módulo 1 (Suporte) Propriedades Estrutural Resistência à Fadiga Estabilidade	Estrutura Soldada	Soldado ↑	Aço Carbono ↑↑	Chapas + Soldadura ↑	Operadores e Maquinaria ↑ ✓
	Bloco Monolítico Al	Sem montagem ↑↑↑	Alumínio ↓	HPDC ↓↓	Depende do lote
	Bloco Monolítico Al	Sem montagem ↑↑↑	Alumínio ↓	Fundição em areia ↓↓	Depende do lote
	Estrutura Roscada	Montagem Manual ↓↓↓	Aço Carbono ↑↑	Chapas + Parafusaria ↑↑	Preparação e operadores ↓↓
Módulo 2 (Conexões Elétricas) Condutividade Elétrica	Cabos	Fornecido			✓
Módulo 3 (Grippers) Resistência Mecânica Geometria Definida Manutenção	Peça Maquinada	Sem montagem ↑↑↑	Aço Inoxidável ↓↓	Maquinação ↑	Maquinação ↑ ✓
	Peça Fundida Zn	Sem montagem ↑↑↑	Liga de Zinco ↑	Fundição Injetada ↓	Depende do lote
	Peça Fundida Al	Sem montagem ↑↑↑	Alumínio ↓	HPDC ↓↓	Depende do lote
	Peça de Plástico	Sem montagem ↑↑↑	Plástico ↑	Injeção por Moldes ↑↑	Depende do lote
Módulo 4 (Motor Elétrico) Precisão Velocidade/Binário Adequado	Motor Spindle	Fornecido			✓

Figura 10 – Análise de custos do caso de estudo do DfC. Adaptado de [28].

Na figura 11, estão representadas as soluções desenvolvidas para o suporte da máquina CNC, tendo em conta as variáveis anteriormente referidas (montagem, material, fabrico e custo), apresentando no final a estimativa de custo e número de peças. Através da análise da figura é possível perceber que a solução economicamente mais viável é a da estrutura soldada.

Nome dos Componentes	Material/Processo/ Investimento	Soldado		Monolítico	
		[Peças]	[€]	[Peças]	[€]
Estrutura Soldada	Aço Carbono/Soldadura	10	231,50		
	Equipamento Soldadura		5,00		
Bloco Monolítico	Alumínio/HPDC			1	121,60
	Moldes				200,00
Braçadeira de Arame	PP/Injeção Moldes	4	5,08		
Braçadeira de Arame Ajustável	PP/Injeção Moldes	4	0,60	4	0,60
Total		18	241,83	5	321,66

Figura 11 - Soluções desenvolvidas para o suporte da máquina CNC. Adaptado de [28].

De entre as soluções possíveis para os *grippers*, presentes na figura 12, a mais viável economicamente é a estrutura de plástico.

Nome dos Componentes	Material/Processo	Fundição Zn		Plástico	
		[Peças]	[€]	[Peças]	[€]
Corpo	Liga ZAMAK/ Fundição	1	0,96	1	0,96
Capa Corpo	ABS/ Injeção Moldes	1	2,93	1	2,93
Pino de Suporte	ABS/ Injeção Moldes	1	0,36		
Pinos	Aço Inoxidável/Rotação, Desgaste	1	0,54		
Parafuso M4x8	Aço Galvanizado/Rotação	1	0,03		
Parafuso M6x18	Aço Galvanizado/Rotação	2	0,06	1	0,03
Anilha	Aço Galvanizado/Rotação	2	0,002		
Total		9	4,88	3	3,92
Total (x16 Peças)		144	78,11	48	62,72

Figura 12 - Soluções possíveis para os *grippers*. Adaptado de [28].

Com a análise da estimativa de custos, tendo em conta os fatores que influenciam os custos dos componentes do projeto da máquina de CNC, foi possível avaliar as soluções propostas, evitando *rework* e repensar, isto é, futuras alterações que poderiam alterar o progresso do projeto, tanto a nível de tempo como de custos.

MATRIZ ESTRUTURAL DE PROJETO

4.1 Modelo Conceptual da Matriz Estrutural de Projeto

A Matriz Estrutural de Projeto, DSM, também conhecida como, *Design Structure Matrix*, é um método que é utilizado para representar e analisar projetos entre várias áreas, desde a automóvel até à de comunicações [29], e é, ainda, usada como ferramenta de planeamento e gestão de um projeto, com o auxílio de algoritmos, tais como *partitioning* e *clustering*.

A DSM, é representada na forma de matriz quadrada, isto é, possui um igual número de linhas e colunas. Este método permite identificar interações entre os elementos de um projeto. Esta matriz é caracterizada por ter a mesma identificação na coluna e na linha correspondente, onde a diagonal está anulada e as marcas nas células fora da diagonal identificam interações entre os elementos do sistema (componentes de um produto, parâmetros de projeto, variáveis de processos) [30].

O *partitioning* é o processo de reorganizar a ordem das atividades e dos elementos, de forma que as marcas da matriz sejam movidas para as proximidades da diagonal ou abaixo da mesma. Deste modo, pretende-se transformar a matriz da DSM numa matriz com uma forma triangular abaixo da diagonal [31].

O *clustering*, por sua vez, tem como objetivo de formar *clusters* ou módulos que são mutuamente exclusivos, ou seja, elementos que têm informações ou relações de dependência em comum, e agrupá-los, criando módulos ou grupos independentes dos outros elementos ou atividades.

O efeito destes algoritmos, o *partitioning* e o *clustering*, estão representados na figura seguinte, figura 13.

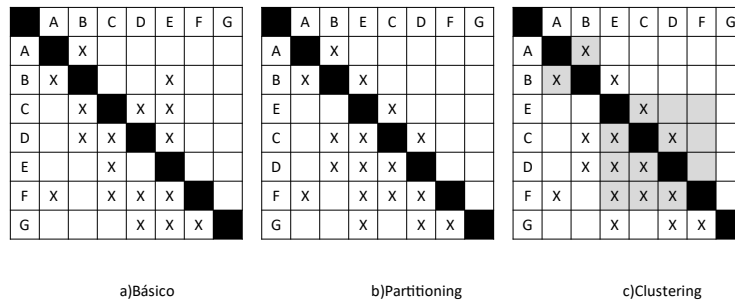


Figura 13 - Efeitos da aplicação dos algoritmos. Adaptado de [32].

Tendo em conta as aplicações da DSM, podem-se classificar em quatro formas diferentes. Em primeiro lugar tem-se a DSM de arquitetura, que é útil para representar as relações de componentes de um sistema, de seguida, a DSM de organização, que é utilizada para representar e ter em conta as relações entre equipas. Tem-se, ainda, a DSM de atividade, que permite representar fluxos de informações entre atividades e, por fim, a DSM de parâmetros, onde é possível analisar as relações físicas dos DPs [33].

Posto isto, na figura 14, pode-se encontrar uma matriz com oito elementos, de "a" a "h". Como é possível verificar, a diagonal da matriz encontra-se anulada e cada elemento ocupa a sua posição correspondente na linha e coluna da matriz. Ao interpretar este exemplo, segundo a DSM, o elemento "c" é influenciado por uma dependência ou um fluxo de informação sobre o elemento "b" e, na mesma matriz, em "d" ocorre o mesmo para o elemento "c" [34].

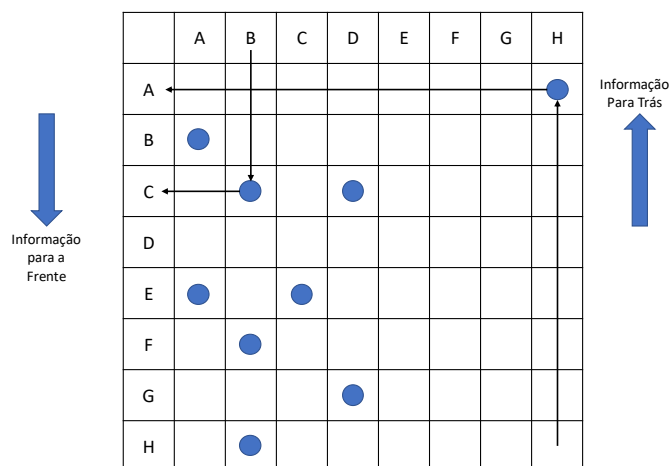


Figura 14 - Exemplo matriz DSM. Adaptado de [34].

Com a DSM, é possível identificar o tipo e a força de dependência entre elementos, apresentando informações críticas e úteis como medições de desempenho ou possibilidade de falha, *failure rate*.

Esta metodologia é importante na fase de projeto, uma vez que, entender as dependências e interações dos elementos de um projeto é essencial para geri-lo e tomar decisões de forma eficiente. Assim, pode levar a uma diminuição de dependências, em componentes e processos, reduzindo o tempo de projeção e os custos.

Caso seja pretendido desenvolver um projeto do início, de modo a realizá-lo no menor tempo possível, os projetistas recorrem a informações revelantes que estão disponíveis, como por exemplo, projetos semelhantes. Neste caso, procuram fundamentos, razões e informações úteis sobre o mesmo e os “porquês” das decisões envolvidas em projetos semelhantes e anteriores. Como a DSM permite indicar e caracterizar as dependências, esta ferramenta pode ser bastante útil, tornando-se numa ferramenta de análise e gestão de informação.

O sucesso da DSM, baseia-se na análise correta das interações e dependências dos elementos. É, assim, necessário entender as características e comportamentos dos elementos, quanto mais informações existirem e quanto melhor for a percepção e análise do sistema, maior será o seu sucesso. Geralmente, uma DSM é criada, primeiramente, com o auxílio de documentos e informações existentes do projeto e, depois, são efetuadas entrevistas à equipa de projetistas e engenheiros que irão complementar e validar a mesma. De forma a descobrir a origem responsável pelas interações, é necessário perceber os comportamentos e características destas interações nos elementos. Numa interação, entre dois elementos, um deles é designado o elemento iniciante e o outro, o elemento afetado.

De modo a analisar uma interação podemos utilizar e obter as seguintes informações [34]:

- Elemento Iniciante (EI) e Elemento Afetado (EA): Estes elementos formam uma relação e podem ser considerados como componentes, tarefas em processos e entre outras possibilidades;
- Tipo de interação (Tol): O tipo de interação dos elementos num sistema é classificado de acordo com as propriedades dos elementos em questão. Num sistema, os elementos podem ter interações a nível espacial, energético, de informação e material;
- Nível de interação (Lol): O nível de interação quantifica as interações e a sua magnitude. Sendo possível classificar como baixa, média ou alta, ou em percentagem;

- Etapa: Utilizada para especificar a situação ou período do tempo de ciclo em que a interação ocorre;
- Critério: É utilizado para o medidor de decisão avaliar a interação entre dois elementos (custo, tempo, *performance*, entre outros);
- Dependências e relações geométricas: Este tipo de informações provêm das interações e relações no modelo CAD;
- Constantes, algoritmos e relações: Os elementos derivados de cálculos baseados em algoritmos e/ou constantes são dependentes e regidos por outros elementos. Por exemplo, os elementos podem ser calculados com influência de constantes, tais como, propriedades mecânicas;
- Regras comuns de *design*: Algum conhecimento de *design* por detrás de interações de elementos provêm de regras normalizadas que podem ser encontradas em livros ou normas.

Como se pode observar na figura seguinte, figura 15, utilizando a DSM, é possível registar e organizar informações sobre as dependências ou interações dos componentes. No futuro, este tipo de informações poderá ser útil para outros projetos, auxiliando a construção de futuras DSMs de projetos semelhantes ou apenas ao fornecer informação de forma organizada e sucinta, que de outra forma, poderia não estar explícita em documentos.



Figura 15 - Informações registadas na matriz DSM. Adaptado de [34].

No caso de um projetista querer alterar ou melhorar um projeto já elaborado, este pode usar a DSM deste, para simular e registar as alterações e comportamentos que podem ocorrer ao alterar um elemento. Esta funcionalidade é bastante vantajosa, especialmente em produtos complexos como um automóvel, onde vários componentes e sistemas estão bastante interdependentes. Uma alteração num elemento do sistema tem uma elevada probabilidade de

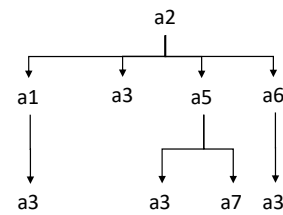
resultar na alteração de outro elemento, podendo alastrar para mais elementos. Este fenómeno é reconhecido como propagação de alterações, *Change Propagation*. A eficiência com que um projetista consegue prever e controlar as alterações tem consequências diretas no impacto do projeto [30].

Ao analisar a propagação das alterações pode-se considerar dois tipos tendo como o exemplo a figura 16:

- Alterações diretas: Como o próprio nome indica, a interação é direta. Apenas existe um elemento iniciante e um afetado. Tem-se como exemplo, a interação direta "a2" com "a3".
- Alterações indiretas: Neste caso, as alterações são propagadas de forma indireta. Como por exemplo, a existência de uma alteração em "a2", implica a alteração de elementos até ao elemento "a3". Na figura 14 b), a propagação será, "a2" → "a5" → "a3" ou "a2" → "a6" → "a3". Interdependências como estas são prejudiciais, pois exigem mais trabalho [34].

	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7
a1	-	X	X				
a2		-				X	
a3	X	X	-		X	X	X
a4				-			
a5		X	X	X	-		
a6		X				-	
A7			X		X		-

a)



b)

Figura 16 – Propagação de alterações. Adaptado de [34].

É de senso comum que o conhecimento e experiência desempenham um papel muito importante no desenvolvimento de um produto. Estas aptidões aliadas a uma possível determinação do efeito das alterações num projeto, revelam-se bastante úteis para um projetista. Para além das aptidões referidas anteriormente, a DSM pode ser utilizada para avaliar melhoramentos de processos, priorizar atividades, monitorizar processos e analisar dependências de recursos num projeto [35]. Assim sendo, pode-se considerar a DSM como uma poderosa e útil ferramenta.

4.2 Pontos Fortes da Matriz Estrutural de Projeto

A DSM possui vários pontos fortes. Um deles, deve-se ao facto de conseguir representar um sistema complexo de forma simples e concisa. Para além disso, identifica os problemas e dependências, podendo-se destacar as dependências mais críticas e as suas interações, de modo a melhorar um projeto. Esta metodologia apresenta-se, também, como uma boa ferramenta de mapeamento e organização de informação.

Além disso, a DSM tem a capacidade de representar e gravar informações das interações entre componentes, assim como, pode ser útil como referência para futuros projetos, reduzindo o tempo e o custo de desenvolvimento em pesquisa.

Ainda, consegue simular e registar as alterações e comportamentos, que podem ocorrer após a alteração de um elemento, propagação de alterações.

Por fim, e em comparação com outras DTMs gráficas, a DSM fornece uma perspetiva mais simples e compreensível de sistemas complexos [33].

4.3 Limitações da Matriz Estrutural de Projeto

Esta metodologia, tal como todas as outras abordadas, para além de apresentar pontos fortes, tem também algumas limitações.

Em primeiro lugar, a DSM é limitada na previsão de interações no início de um projeto [36]. Outra limitação, deve-se à dificuldade em obter uma DSM de um novo produto que nunca foi projetado [36] e além disto, a DSM ao contrário da TA, apenas relaciona elementos do mesmo tipo, por exemplo DPs com DPs.

De seguida, o facto de ser necessário entrevistar os engenheiros presentes na equipa do projeto, faz com que seja essencial a sua cooperação e disponibilidade, o que implica mais trabalho e tempo gasto na fase de projeto, uma vez que os engenheiros e projetistas já se encontram ocupados a desempenhar o seu papel [9].

Para além do já referido, a informação obtida para a DSM através de entrevistas e pesquisa, apresenta-se como outra limitação, uma vez que, está dependente das ideias do entrevistado e da informação transmitida e, depende também, do tipo de pesquisa feita e da sua veracidade. Este processo pode ser demoroso e não existem certezas se a informação recolhida é suficiente para elaborar uma boa matriz [9].

4.4 Exemplos da implementação da Matriz Estrutural de Projeto

4.4.1 Exemplo 1 – Gestão de base de dados

Na figura presente em anexo, anexo 1, está representada uma matriz DSM de desenvolvimento de um projeto de microprocessadores da Intel[37].

Esta matriz, é composta por 60 atividades, onde o "x" indica fluxos de informação entre as atividades.

Neste exemplo, é possível verificar que esta DSM para além de representar as atividades e o fluxo de informação no desenvolvimento do projeto, também consegue identificar possíveis falhas ou contratempos que poderão ocorrer no projeto, desviando-o do plano ideal.

Cada marca com o "O", acima da diagonal, representa uma possível falha de um processo. Se são identificadas falhas, então, será necessário realizar trabalho extra, o que implica mais custos e tempo. Esta situação é possível ser verificada na atividade 43, marcada com a linha a vermelho na figura. Se essa falha ocorrer poderá despoletar outras possíveis falhas que irão resultar em *rework* para outras atividades, neste caso das atividades 17 a 28 e, também, das atividades 29 a 42. Estas falhas de processo e as suas implicações são uma grande influência no custo e tempo do projeto.

É, ainda, possível verificar na figura, que existem marcas a azul, denominadas de "aprendizagem geracional". Estas marcas representam possíveis falhas de processo que seriam demasiado dispendiosas, em termos de custo ou tempo para corrigi-las. Neste caso, seria necessário fazer alterações nas atividades iniciais levando a possíveis *reworks* de tarefas e trabalhos já concluídos. No entanto, estas marcas são úteis uma vez que, permitem à equipa anotar estas informações e aprender com os seus erros, que devem ser evitados no próximo projeto. Sendo assim, num próximo projeto que seja baseado nesta DSM, será necessário ter em atenção os resultados das atividades 40 e 48 deste projeto.

Sendo assim, é possível perceber que a DSM pode servir como uma base de dados e registar as experiências passadas e o conhecimento de um projeto.

4.4.2 Exemplo 2 - Como ferramenta de organização

Neste exemplo, anexo 2, a DSM foi utilizada com o objetivo de melhorar a comunicação e organização no desenvolvimento de um motor[38]. A empresa inicialmente tinha 22 grupos que foram divididos em quatro equipes, como se pode ver na figura.

Após fazer um questionário às equipes acerca da comunicação entre as mesmas, foi possível criar uma DSM, onde foram utilizados três símbolos que refletem a frequência das interações entre equipes. Neste estudo, um círculo grande diz respeito a comunicações diárias, um círculo de tamanho médio corresponde a comunicações semanais e um círculo pequeno a comunicações mensais.

Ao observar a DSM, é possível detectar algumas falhas, como por exemplo, as interações frequentes entre as quatro equipes e os grupos externos a estas. No caso do grupo responsável pelo "*engine block*", esta tem reuniões diárias com todos os grupos da "*valve train system team*"; no entanto, pertencem a grupos de equipes diferentes e têm reuniões diárias.

Após aplicar o *clustering*, foi possível obter uma nova DSM, melhorando a organização das equipes. Esta reorganização passou por agrupar os grupos com necessidades de comunicação que passam por toda a organização e, depois, agrupar os restantes, tendo em conta a frequência das comunicações, quer sejam diárias, semanais ou mensais. Como é possível verificar, a estrutura de organização das equipes melhorou bastante e promoveu a criação de equipes mais eficientes.

INTEGRAÇÃO ENTRE DTMS

5.1 Integração entre Teoria Axiomática e Projeto para Custo

Após a análise das metodologias TA e DfC e tendo em conta os seus pontos fortes e limitações, pode-se destacar algumas relações benéficas entre ambas. Um exemplo disso é visível quando se olha para a limitação da TA, que não tem em consideração alguns parâmetros, tal como o custo. Assim sendo, a escolha dos DPs, na TA, na fase de projeto pode não ser a mais adequada, induzindo a uma escolha menos viável economicamente. Tendo em vista a resolução do problema referido, pode-se incorporar o raciocínio do DfC e a sua função de estimativa de custos com a TA, colmando desta forma a limitação acima referida. A associação das duas metodologias, tendo como objetivo o referido anteriormente, pode ser realizada de três formas diferentes.

Uma alternativa possível e tendo em consideração que a TA é uma ferramenta maioritariamente utilizada em projeto, poder-se-ia então utilizar o DfC, simultaneamente, como uma ferramenta auxiliar do projetista, de modo que este possa estimar os custos associados à sua decisão no momento. Isto irá permitir dar um maior destaque ao custo, uma vez que, o projetista terá uma maior consideração deste parâmetro. Posto isto, numa situação onde um projetista considere várias soluções ou alternativas para um DP que irá satisfazer o FR correspondente, este poderá utilizar o DfC para estimar os custos das diferentes alternativas para o DP em causa, e efetuar uma decisão tendo em conta o custo, tornando então o projeto mais viável.

A segunda alternativa possível, seria tratar o custo como uma restrição, definindo uma meta para o custo, e com o auxílio das ferramentas do DfC, simular os custos associados às decisões do projetista, sendo que o mesmo deve tomar as decisões em função das restrições. Uma pergunta que poderá facilmente surgir é o porquê de tratar o custo como uma restrição.

Portanto, tendo em conta que o custo é afetado por todas as decisões e, é por isso mesmo que este não consegue ser independente sobre outros FRs. Deste modo, utilizando o custo como restrição será possível elaborar um projeto desacoplável e viável, desde que o custo limite não seja ultrapassado [39].

A terceira e última alternativa de incorporar os métodos do DfC e da TA, seria com recurso à *Extended Axiomatic Design* ou Teoria Axiomática Aumentada, EAD, onde se integra a TA com a área da Economia, que incorpora os custos. Ao incluir estes, torna-se possível otimizá-los, utilizando as metodologias e ferramentas do DfC, desenvolvendo assim uma alternativa de forma a integrar a TA com o DfC.

5.1.1 Exemplo da EAD

Após a terceira alternativa apresentada para integrar as duas metodologias abordadas, o DfC e a TA, segue-se o presente exemplo[40], de modo a elucidar quais as vantagens da utilização de uma EAD com foco nos custos.

A utilização da Teoria Axiomática Aumentada, nas condições anteriormente referidas, permite relacionar a Teoria Axiomática com a visão económica, o que irá possibilitar a incorporação dos custos na mesma.

A criação da EAD, tal como é possível observar na figura 17, é a integração da teoria de projeto de engenharia com a economia, incluindo dois domínios, as variáveis de atividade, AV, e a procura dos recursos RC. O AV substituiu os PVs na Teoria Axiomática, possibilitando a implementação da teoria de produção e as suas funções. O RC diz respeito ao consumo de material, mão de obra e outros recursos necessários à produção do projeto.

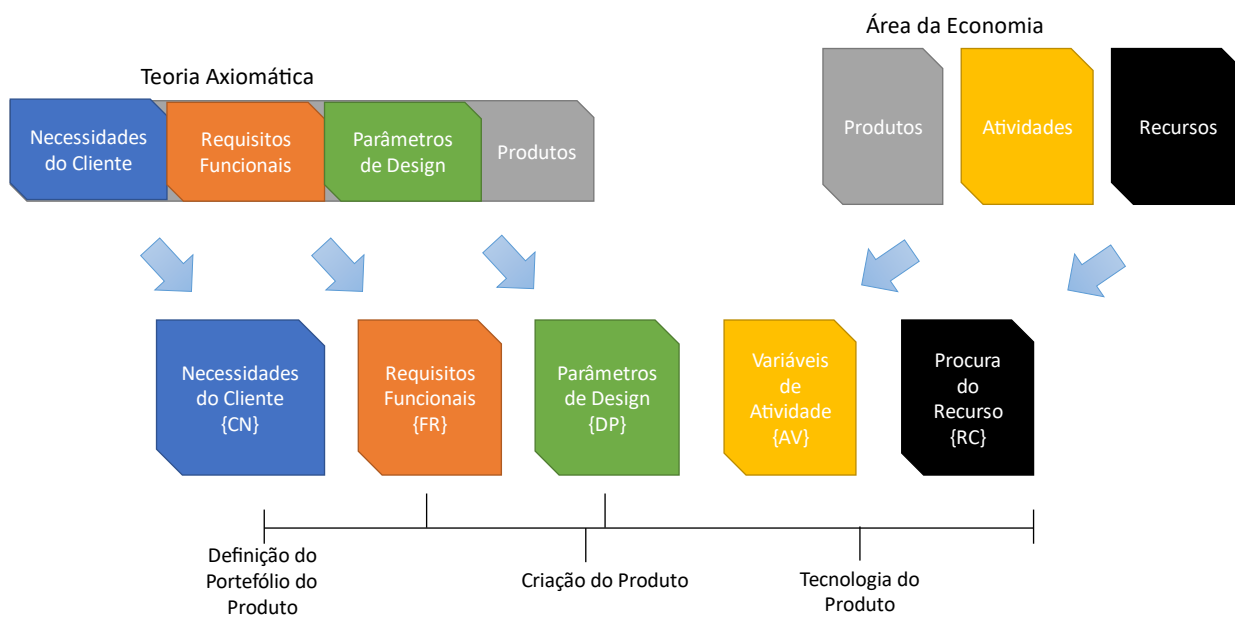


Figura 17 – Integração da Teoria Axiomática e a Área da Economia. Adaptado de [40].

O resultado da EAD está presente na figura 18, onde é possível relacionar os três módulos, “Definição do Portefólio do Produto”, “Criação do Produto” e “Tecnologia do Produto”. Assim, é possível relacionar os dois domínios, AV e RC, e também introduzir os componentes CM, que correspondem aos DPs da Teoria Axiomática, onde cada DP ou respetivo CM está relacionado com as variáveis de atividade e com a procura dos recursos.

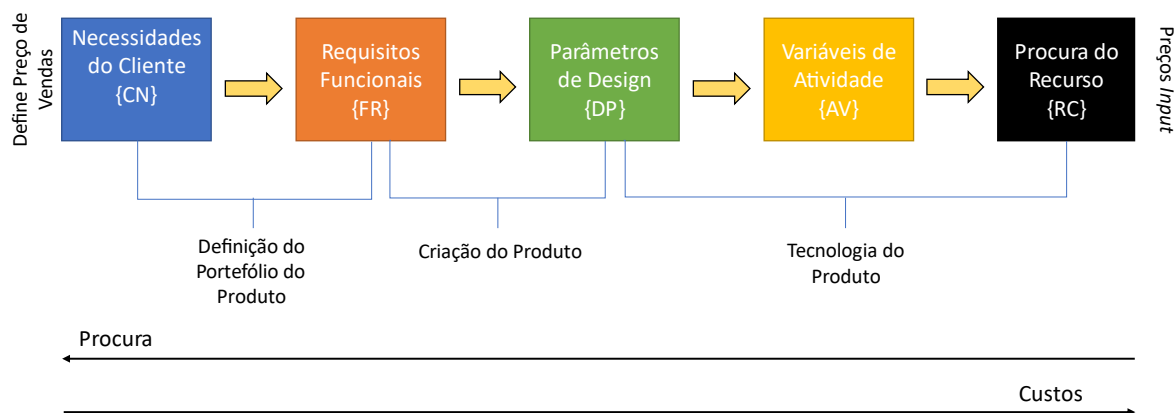


Figura 18 – Teoria Axiomática Aumentada(EAD) . Adaptado de [40].

O exemplo referido anteriormente, encontra-se presente na figura 19. Este caso é composto por dois produtos, um que contém uma unidade de controlo, que satisfaz as necessidades do cliente, CN1 e outro produto, que para além de satisfazer a CN1, será ainda introduzido e satisfeito um segundo CN (CN2), que diz respeito à proteção para o frio, “proteção para o frio”.

CN	FR	#	CM	#	AV	#	RC	
Controlo (CN1)	Processamento (FR1)	1	Invólucro (CM1) [1,5€]	1	Processo do Invólucro (AV1) [1,5€]	1	Material do Invólucro (RC1) [0,5€]	
					Montagem da Placa (AV2) [1€]	2	Mão de Obra (RC2) [0,5€]	
						1	2	Material da Placa (RC3) [1€]
							1	Operário da Placa (RC4) [1€]
							1	Tempo do Engenheiro (RC5) [2€]
Proteção para o Frio (CN2)	Proteção Baixas Temperaturas (FR2)	1	Invólucro Térmico (CM3) [4€]	1	Ajuste do Invólucro (AV4) [2€]	1	Isolamento Térmico (RC6) [2€]	
				2	Testagem (AV5) [1€]	1	Tempo do Engenheiro (RC7) [2€]	

Figura 19 – Exemplo da EAD. Adaptado de [40].

Ao observar a figura anterior, é possível verificar a influência da complexidade no custo de um produto, uma vez que, a unidade de controlo mais simples, tem um custo associado de 5€, enquanto a unidade mais complexa tem um custo de 9€, que resulta da criação de um novo componente (CM) de modo a satisfazer a segunda necessidade do cliente. Neste caso corresponde ao “Invólucro Térmico”, levando a um acréscimo de 4€, devido ao isolamento térmico, RC6, e testes de qualidade.

Na figura 20, encontra-se a matriz resultante da EAD do exemplo acima referido.

Matriz para a EAD

$$\begin{array}{l}
 \begin{bmatrix} A_{CN_{FR}} & FR_1 & FR_2 \\ CN_1 & 1 & 0 \\ CN_2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \leq \\
 \begin{bmatrix} A_{FR_{CN}} & CM_1 & CM_2 & CM_3 \\ FR_1 & 1 & 1 & 0 \\ FR_2 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \leq \\
 \begin{bmatrix} A_{CM_{PV}} & AV_1 & AV_2 & AV_3 & AV_4 \\ CM_1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ CM_2 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ CM_3 & 0 & 0 & 2 & 1 \end{bmatrix} \leq \\
 \begin{bmatrix} A_{PV_{RC}} & RC_1 & RC_2 & RC_3 & RC_4 & RC_5 & RC_6 \\ AV_1 & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ AV_2 & 0 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ AV_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ AV_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{array}$$

Procura de Recursos/Matriz Consumo

$$\begin{bmatrix} A_{CN_{RC}} & RC_1 & RC_2 & RC_3 & RC_4 \\ CN_1 & 1 & 2 & 2 & 1 \\ CN_2 & 2 & 4 & 4 & 2 \end{bmatrix}$$

Figura 20 – Matriz resultante do exemplo da EAD. Adaptado de [40].

Esta EAD com foco nos custos tem várias vantagens na área de projeto, uma vez que, permite simulações e otimizações através da nova matriz desenvolvida, consegue, também, relacionar e avaliar projetos a nível financeiro em qualquer fase do projeto e, ainda, demonstrar de forma simples, projetos complexos. Estas qualidades advêm da TA. Caso se utilize as ferramentas do DfC, será possível obter melhores resultados na área das estimativas de custo, dando assim, um maior contributo a este método e ao projeto.

Assim sendo, é possível inferir que aliando as vantagens destas duas DTMs, o projetista poderá beneficiar bastante, uma vez que cada teoria tem um papel fundamental no desenvolvimento do projeto.

5.1.2 Vantagens provenientes dos pontos fortes das duas metodologias

Aliando os pontos fortes que as duas metodologias possuem, obtêm-se várias vantagens.

Em primeiro lugar, e tendo em conta que os custos estão associados à complexidade de um projeto[19], ao se reduzir a mesma com a Teoria Axiomática estar-se-á a reduzir os custos. Para além disso, ao providenciar ao projetista esta ferramenta levará a uma maior consciencialização destes, na tomada de decisão.

Outra vantagem advém do acesso a uma base de dados e do conhecimento do DfC, o que permite um melhor auxílio ao projetista, com novas soluções, o que induz a uma otimização do projeto e a uma redução do tempo na fase de projeto.

Para além do já referido, o facto da TA ter a capacidade para lidar com projetos complexos devido à sua componente de decomposição, permite otimizar o processo de estimativa de custos. A utilização apenas do DfC faz com que exista um acompanhamento da estimativa de custos à medida que o projeto é desenvolvido, não havendo por isso um impacto tão grande. Assim, ao conjugar as capacidades de utilização e impacto da TA no início da fase de projeto, permite o DfC atuar em simultâneo, numa fase mais inicial do projeto, o que não seria possível caso não se aliasse as vantagens da TA.

Por último, outra vantagem desta integração, é o facto poder conciliar a base de dados de conhecimentos do DfC o processo de decisão da TA ao definir e descartar projetos inviáveis. Esta vantagem permitiria complementar o processo de decisão e melhorar as soluções definidas, melhorando o projeto.

Em suma, é possível verificar que quando se conjuga as vantagens das duas DTMs em causa, o projetista conseguirá beneficiar bastante, uma vez que cada teoria tem um papel fundamental no desenvolvimento do projeto.

“Axiomatic design enhances creativity by eliminating bad ideas early and thus, helping to channel the effort of designers” [7].

5.2 Integração entre DSM e TA

Observando os pontos fortes e limitações de cada uma das metodologias, é possível verificar complementaridades entre ambas, sendo que a sua integração poderá beneficiar o desenvolvimento do projeto [41][42].

A TA, tem principal atenção ao mapeamento entre FRs e DPs, no entanto, não se foca nas relações e interações entre os DPs. Estas relações, entre DPs, poderão ter consequências a nível de desempenho dos FRs. Para além desta falta de relacionamento entre DPs, a TA não considera parâmetros como o custo, o tempo ou as relações espaciais, por exemplo [41].

No caso da DSM, esta foca-se principalmente no mapeamento e informações entre DPs, identificando problemas e dependências, de modo a melhorar o projeto. Analisando a figura 15, é possível verificar que ao contrário da TA, a DSM considera e mostra informações sobre inúmeros parâmetros relacionados com as interações dos DPs. Em contrapartida, a DSM não consegue ter o mesmo impacto que a TA no início do projeto, uma vez que, necessita de mais informações e conhecimento sobre o produto a desenvolver, com a finalidade de construir a matriz DSM [36].

Posto isto, esta DTM poderá providenciar à TA o elemento que faltava a esta metodologia [36]. A TA direciona o projetista a encontrar DPs adequados às necessidades dos FRs. No entanto, num cenário em que existem inúmeros DPs que satisfazem o Axioma da Independência e o FR correspondente é através dos parâmetros e interações entre DPs que, é possível efetuar uma decisão mais informada na escolha do DP, para além do Axioma da Informação.

A integração destas duas metodologias resultará em:

- Utilizar a DSM numa fase mais inicial, fase esta onde as decisões mais importantes do sistema ou produto são feitas [36];
- Satisfazer a necessidade de seguir e analisar o impacto das decisões ao longo do projeto [41];
- Integrar parâmetros como o custo, as relações geométricas, entre outros [41];
- Analisar a relação entre FRs e DPs, graças à TA, e relacionar os DPs, entre si, graças à DSM. Assim, o projetista terá uma oportunidade de propor alterações e alternativas, antes das decisões serem tomadas, e analisar o efeito que essas mesmas têm no projeto [41];

5.2.1 Exemplo 1

Para demonstrar a integração entre a TA e DSM, é utilizado o exemplo do lavatório[15] demonstrado no capítulo da Teoria Axiomática. Após obter um projeto com independência segundo a TA, o passo seguinte será construir a matriz DSM com os três DP's definidos anteriormente.

	DP1	DP2	DP3
DP1	.	X	
DP2	X	.	
DP3			.

Figura 21 - Matriz DSM.

Embora o DP1 e DP2 sejam funcionalmente independentes como demonstrado na DM, ao analisar a matriz DSM, verifica-se que existem duas marcas fora da diagonal, indicando que são fisicamente interdependentes. Esta relação de interdependência, deve-se ao facto de que o controlo da temperatura e do caudal da água são fisicamente integrados, partilhando o mesmo mecanismo de alavanca (figura 6).

	DP1	DP2	DP3
DP1	.	X	
DP2	X	.	
DP3			.

Figura 22 - Matriz DSM com *clusters*. Adaptado de [15].

Como o DP1 e DP2 são interdependentes, os projetistas responsáveis pelo desenvolvimento do DP1, vão ter de estar em comunicação com os projetistas do DP2, equipa A, de modo a decidir o mecanismo de alavanca. Como o DP3 é independente dos restantes DPs, os projetistas responsáveis pelo mesmo poderão estar numa equipa separada, equipa B.

5.2.2 Exemplo 2

O próximo exemplo é acerca de uma grua[43], cuja DM estará representada na figura seguinte, figura 23.

		DPs															
		1	211	2121	2122	213	221	222	223	224	311	321	322	323	324	4	
FRs	1	1															
	211		1	1	1	1											
	2121			1													
	2122			1	1												
	213					1											
	221			1	1		1										
	222			1	1		1	1									
	223						1	1	1								
	224						1	1		1							
	311										1						
	321											1					
	322											1	1				
	323											1	1	1			
	324											1	1		1		
	4															1	

Figura 23 - Matriz TA do exemplo 2. Adaptado de [43].

Após obter a DM, foi efetuado o método de transformação de DM para DSM explicado anteriormente. A DSM obtida está representada nas figuras seguintes, figura 24 e 25.

		DPs															
		1	211	2121	2122	213	221	222	223	224	311	321	322	323	324	4	
DPs	1	1															
	211		211														
	2121		1	2121	1												
	2122		1		2122												
	213		1			213											
	221			1	1		221										
	222			1	1		1	222									
	223						1	1	223								
	224						1	1		224							
	311										311						
	321											321					
	322											1	322				
	323											1	1	323			
	324											1	1		324		
	4															4	

Figura 24 - Matriz DSM do exemplo 2. Adaptado de [43].

		DPs															
		1	211	2121	2122	213	221	222	223	224	311	321	322	323	324	4	
DPs	1	1															
	211		211														
	2121			2121	1												
	2122			1	2122												
	213			1		213											
	221			1	1		221										
	222			1	1		1	222									
	223						1	1	223								
	224						1	1		224							
	311										311						
	321											321					
	322											1	322				
	323											1	1	323			
	324											1	1		324		
	4																4

Figura 25 - Matriz DSM do exemplo 2 em clusters. Adaptado de [43].

Com estes exemplos, é possível utilizar a Teoria Axiomática para modelar e decompor o projeto e identificar os FRs e DPs, enquanto juntamente com a DSM e o *clustering*, agrupar os DPs. Estes DPs vão ser organizados em grupos, de modo a melhorar a organização e comunicação entre DPs, e também utilizar a DSM como ferramenta de análise, numa fase inicial do projeto.

Ao obter uma matriz DSM numa fase inicial do projeto, poderemos usar a mesma, na etapa onde as decisões mais importantes do sistema ou produto são realizadas. Isto trará enormes benefícios como a capacidade de ajudar e a documentar informações do projeto, para uso futuro; utilizar as capacidades de análise e gestão do projeto da DSM, de modo a auxiliar os projetistas no planeamento e gestão do projeto e evitar reformulações; mostrar o nível de complexidade do projeto e se possível comparar com alternativas e efetuar uma decisão com base na complexidade; evitar todo o processo de captação de informação através de documentos, pesquisa e entrevistas, tornando o processo de obtenção da DSM mais rápido, de modo a atuar na fase inicial do projeto [36].

"In Short, this technique enables us to compare system complexity of design concepts, planning and managing the design process with knowledge about the system interactions before the resources are committed, so that we could avoid costly rework later on in the design process" [36].

5.3 Integração entre DSM e DfC

Analisando as características das metodologias DSM e o DfC, é possível observar que estas possuem atributos que poderão ser benéficos para ambas as metodologias, quando aliadas. As características referidas são a propagação de alterações da DSM, a base de dados presente na DSM e no DfC, a capacidade de estimativa de custos do DfC e a capacidade de organização e recolha de informação da DSM.

Na figura seguinte, figura 26, está presente um exemplo que será tomado como ponto de partida para a análise da relação entre as características mencionadas anteriormente. No exemplo, encontra-se uma matriz DSM e uma tabela com os custos associados a cada componente.

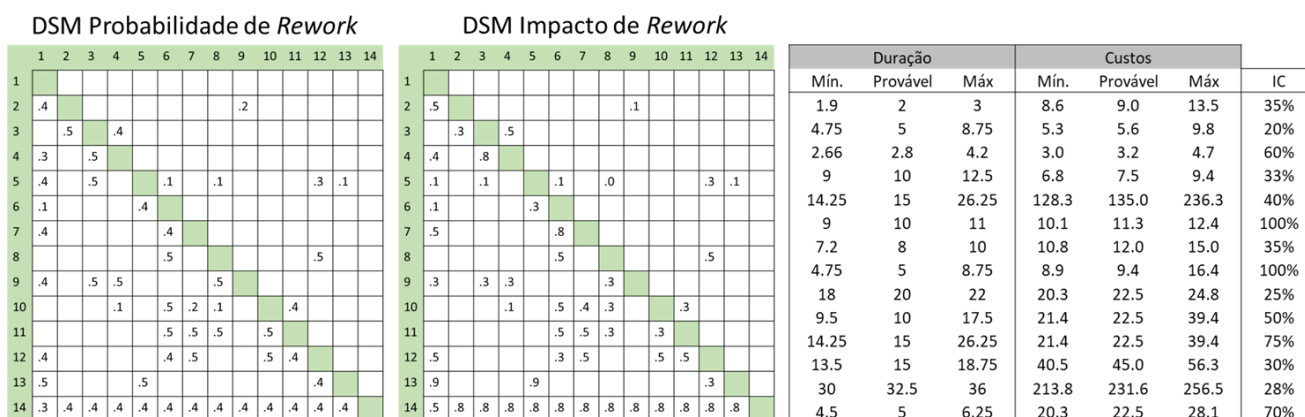


Figura 26 - Matriz DSM e Tabela com os custos. Adaptado de [44].

Na figura anterior, foi utilizada a propagação de alterações da DSM, e é possível verificar, de forma rápida e intuitiva, o impacto das decisões quando são realizadas alterações no projeto, tais como, os custos e tempo associados a cada atividade.

Estas estimativas de custos e de tempo conjugadas com as ferramentas utilizadas na metodologia DfC, podem resultar numa estimativa e simulação de custos mais precisa e completa, do que anteriormente. Assim sendo, é possível aliar a DSM com o DfC, conjugando os custos com os elementos da matriz.

Ainda, na figura anterior, as estimativas de custo foram calculadas tendo em conta a duração da atividade e os recursos utilizados, então obtém-se assim uma funcionalidade onde é possível verificar o impacto das alterações nos elementos da matriz a nível de custos. À medida que existe uma alteração ou *rework* na DSM, é possível verificar o impacto da mesma, a nível de custos e tempo e, permitir analisar as consequências inerentes à alteração. Assim, esta funcionalidade seria bastante útil durante a fase de projeto, uma vez que permite dar

informações importantes, relacionadas com os custos, à equipa durante a criação do mesmo e verificar o impacto que as decisões ou alterações têm.

Para além do benefício anteriormente referido, esta associação das características da DSM com o DfC possui ainda mais vantagens. Em primeiro lugar, é necessário destacar a capacidade da DSM de armazenar e organizar informação, constituindo uma fonte de dados, que mais tarde poderá auxiliar a base de dados do DfC, o que representa uma mais-valia na estimativa de custos. Um exemplo dessa base de dados está representada na figura seguinte, figura 27, onde é possível observar o contributo da mesma, ao longo das várias fases do projeto.

No fluxograma da direita, da figura 27, tem-se a implementação de uma base de dados onde poderão estar guardados dados de um projeto passado ou de um atual, que contribuirão como uma ferramenta de auxílio ao projetista com sugestões para melhorar o projeto e/ou evitando, por exemplo, reiteraões no projeto.

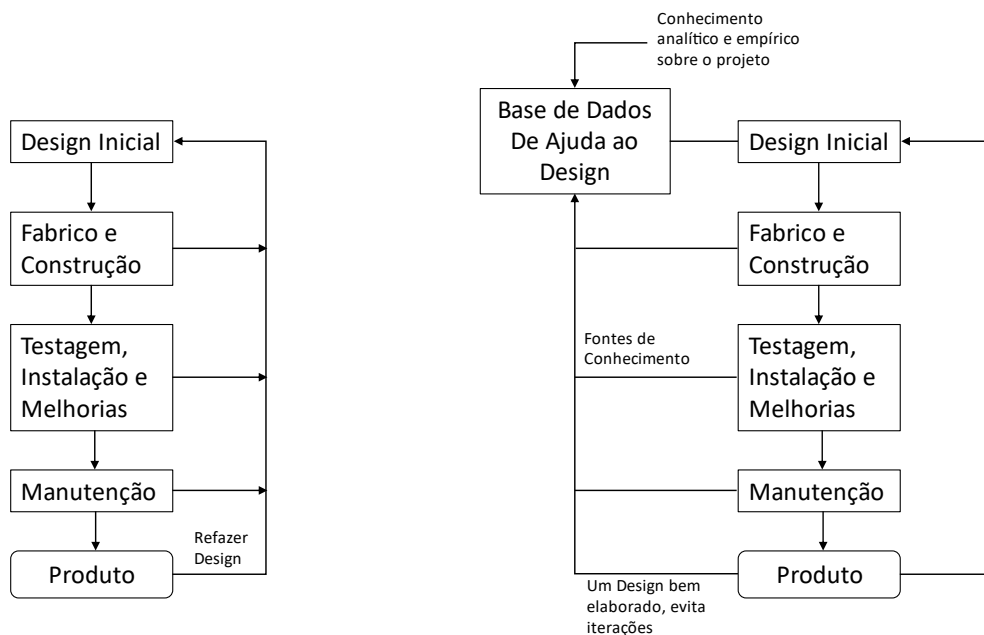


Figura 27 - Contributo da base de dados do DfC. Adaptado de [16].

METODOLOGIA PROPOSTA - INTEGRAÇÃO DAS TRÊS METODOLOGIAS

6.1 Modelo Conceptual

Após estudar e analisar as características e as funções de cada umas das DTMs, bem como analisar as integrações entre as mesmas, pode-se realizar uma proposta de integração das três DTMs onde foi possível colmatar os pontos fracos e, amplificar os pontos fortes das mesmas, de modo a poder contribuir para um melhor projeto de engenharia. Assim sendo, a proposta de integração das três metodologias apresenta-se representada na figura seguinte, (figura 28).

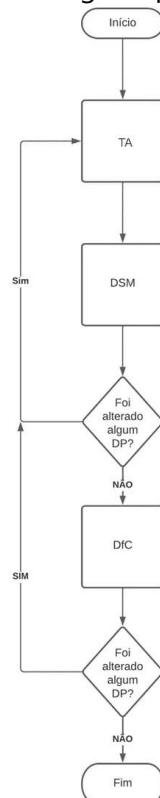


Figura 28 - Fluxograma de integração das três DTMs.

Analisando a figura anterior, é possível observar a ordem de aplicação de cada DTM, começando pela TA, seguindo para a DSM e, finalmente, o DfC.

Esta proposta tem como finalidade a aplicação a projetos novos, no entanto, é possível adaptar a mesma para que possa ser aplicada noutros momentos, como em melhorias de projeto ou criação de projetos semelhantes a projetos já existentes. A integração das três DTMs pode ser dividida em três etapas.

Na primeira etapa, a DTM selecionada foi a TA, uma vez que esta metodologia tem a capacidade de ser aplicada no início da fase de projeto e a DSM não, sendo uma das suas limitações, e o DfC também consegue ser aplicada. No entanto, esta metodologia tem um maior impacto, quanto maior for a informação disponível para ser analisada. Tendo em conta que a primeira etapa, é o início do projeto, e não existe muita informação, então o DfC será aplicada nas etapas futuras, onde será possível explorar melhor as suas potencialidades. Como se pretende realizar um projeto novo, então a escolha irá recair sobre a TA.

Para além de ser aplicável no início do projeto, a TA permite desenvolver um projeto e decompor o mesmo ao detalhe, o que é necessário, de modo a poder prosseguir com o raciocínio de definição e desenvolvimento dos requisitos dos clientes. Assim é possível obter os FRs e DPs necessários para continuar o avançar no projeto, tendo sempre como objetivo a obtenção de um projeto preferencialmente com independência.

Na segunda etapa, após a definição dos FRs e DPs, utilizar-se-á a Matriz Estrutural de Projeto. De modo a relacionar a TA com a DSM, vai-se utilizar os conhecimentos da integração entre ambas com a finalidade de obter a matriz da DSM.

Esta etapa permite passar o foco para os DPs e as relações entre si, que é um dos pontos fortes da DSM. Ao analisar as relações entre os DPs tem-se a informação e as interações que antes não eram alcançáveis com a TA.

Graças a algoritmos como o *partitioning* e o *clustering*, será possível visualizar e organizar melhor a matriz DSM, bem como as relações entre os DPs. Para além destes benefícios, com a DSM, a propagação de alterações, terá um grande papel, uma vez que irá permitir apresentar o efeito das alterações que poderão ser pretendidas ao longo do projeto e avaliar a influência destas. Nesta etapa, o foco será a alteração dos custos envolvidos no LCC.

Após verificar que não existe nenhuma alteração dos DPs, ou caso exista essa alteração, observar que não compromete os axiomas da TA, é possível então avançar para a última etapa. Na terceira etapa, foi utilizada o DfC, passando a atenção para os custos e otimização dos DPs, com a ajuda das ferramentas desta metodologia, sendo analisados a escolha do material, o

método ideal de fabrico, a qualidade final do produto, a montagem e o envio, como exemplificado na figura 8.

Nesta fase, o DfC juntamente com a propagação de alterações, funcionalidade da DSM, pode-se analisar as decisões e as alterações nos custos dos DPs, provocadas pelas decisões, e consequentemente, no projeto, auxiliando e dando um método imediato para o projetista verificar o impacto das suas decisões.

É necessário referir que qualquer alteração dos DPs na segunda e terceira etapas, terá de ser verificada pela TA de modo a averiguar a satisfação dos FRs.

Ao concluir estas três etapas, iremos obter DPs otimizados, a nível de relações entre si e nível económico, que satisfazem os FRs definidos inicialmente. Uma vez que também foi criada uma matriz DSM para o projeto, ter-se-á as informações e experiências acerca do mesmo, que podem ser úteis no futuro, na conceção de um outro projeto semelhante.

Para além disto, é necessário realçar que caso existam matrizes DSM de projetos anteriores semelhantes, estas serão uma mais-valia, pois podem providenciar informações úteis e melhorar o processo de decisão. Na primeira etapa, seria possível antecipar relações desaconselháveis ou problemáticas entre DPs, evitando o processo de descoberta na segunda etapa, antecipando esses problemas. Na terceira etapa poder-se-ia ter acesso a informações de uma base de dados de custos acerca do projeto a desenvolver, melhorando o processo de estimativa de custos. Tem-se como exemplo, a utilização de DPs semelhantes e otimizados, evitando *rework*, desenvolvendo o projeto num menor tempo e custos.

Posto isto, além da aplicabilidade em novos projetos, é também possível contribuir em casos que se pretende fazer melhorias. Para tal, é necessário efetuar os mesmos passos, no entanto, uma vez que não se está a começar o projeto de raiz, pode-se utilizar as informações já conhecidas e com as funcionalidades das três metodologias. Desta forma, percorrer o fluxograma da figura 28, e realizar as alterações que irão ser propostas pelas DTMs, de modo a desenvolver e efetuar melhorias ao projeto já existente.

Assim, com esta metodologia proposta, será possível contribuir com a aplicabilidade da TA, aplicando os seus axiomas e definindo os FRs e os DPs, sendo complementada com a DSM. Esta complementaridade advém da criação de uma relação entre os DPs criados, aplicando os conhecimentos explicados anteriormente na integração entre TA e DSM, utilizando os benefícios de cada uma e reduzindo as suas limitações. Ao passar da segunda para a terceira etapa, ir-se-á tirar proveito da propagação de alterações e das ferramentas relacionadas com o DfC. Para além disso, também ir-se-á explorar as diferentes variáveis que influenciam o custo dos DPs, bem como melhorá-los, e entender o efeito que essas alterações têm, de forma a

contribuir para uma melhor e mais completa base de dados de custos e projeto. No final, ir-se-á obter DPs melhor que satisfazem os FRs, o que resulta num projeto melhor desenvolvido e numa matriz DSM que poderá ser utilizada no futuro como referência para futuros projetos.

6.2 Concepção da Metodologia: Caso de Estudo do Espregedor de Citrinos

De modo a consolidar e a demonstrar a vertente prática da metodologia proposta foi elaborado o seguinte projeto.

O projeto consiste na criação de um espremedor de citrinos, que neste caso tem como principais requisitos ser uma peça única, portátil e adaptável a uma garrafa, para a qual o sumo será direcionado. O objetivo deste projeto reside na praticidade e rapidez desde a extração do sumo até ao momento da sua ingestão, não sendo necessários outros aparelhos ou tecnologias para o efeito referido, havendo, por isso, a minimização de constrangimentos associados a esta prática.

A ideia partiu do princípio de um espremedor convencional, apresentado na figura 29, um utensílio que se encontra no quotidiano do ser humano, e adaptá-lo a uma garrafa de plástico. Para tal, foi necessário desenvolver um produto que tivesse a forma semelhante à dos habitualmente comercializados, de modo a retirar o sumo dos citrinos à medida que são feitos movimentos rotativos na mesma, e utilizar uma rosca compatível com as garrafas de plástico, para ser possível acoplar o espremedor à mesma.



Figura 29 - Espregedor convencional [45].

Sendo assim, segundo a metodologia proposta, começar-se-á por utilizar a TA. Para tal, é necessário definir os FRs tendo em conta as necessidades do cliente, que são:

- FR1 – Espremer sumo dos citrinos;
- FR2 – Recolher/direcionar o sumo dos citrinos para a garrafa;
- FR3 – Acoplar à garrafa.

Tendo em conta os FRs propostos, podem-se considerar os seguintes DPs, de modo a satisfazer os FRs referidos anteriormente:

- DP1 – Cone do espremedor;
- DP2 – Bandeja do espremedor;
- DP3 – Acoplamento roscado compatível com garrafas de plástico.

$$\begin{bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Graças à TA foi possível estabelecer os DPs e simultaneamente satisfazer os FRs correspondentes. No entanto, até ao momento foi apenas possível definir os DPs, sendo que ainda não é exequível relacionar os DPs entre si e verificar as suas interações, de modo a criar um melhor projeto. Para além disso, também não é possível obter as informações referentes a custos associados, tempo e métodos de fabrico acerca dos parâmetros de *design* escolhidos.

Assim, após definir os DPs pode-se então avançar para a criação da matriz DSM, presente na figura 30.

	DP1	DP2	DP3
DP1	X		0
DP2		X	0
DP3			X

Figura 30 - Matriz DSM do exemplo.

A matriz DSM, presente na figura anterior, relaciona os DPs e verifica a existência de interações e trocas de informação entre os parâmetros de *design*. Neste caso, é possível verificar duas interações. De modo a melhorar a perceptibilidade do projeto, é apresentada a figura seguinte, figura 31, onde se averigua o aspeto visual da peça e os seus parâmetros de *design*.

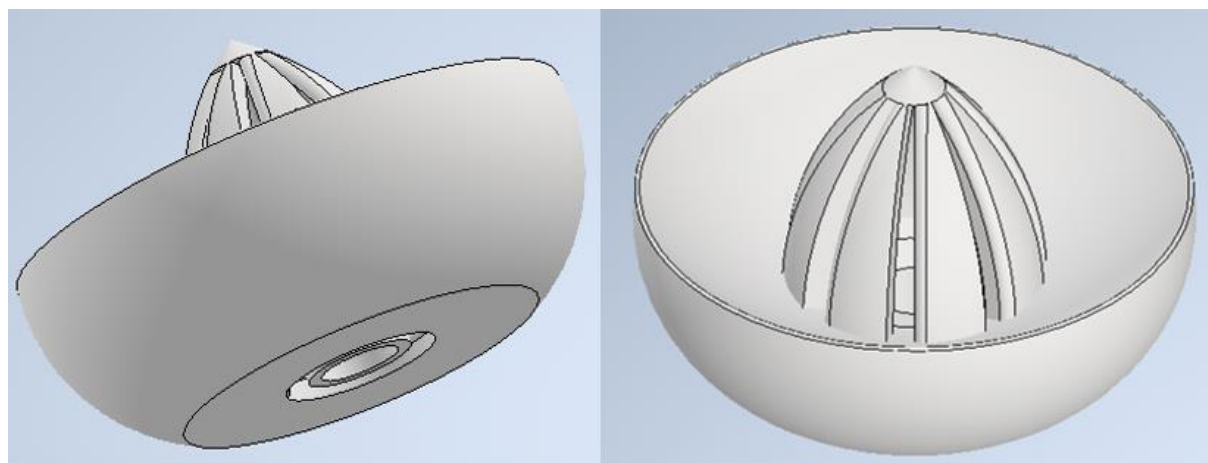


Figura 31 - Espremedor de citrinos.

A primeira interação ocorre entre o DP3 e o DP2, interação espacial, onde o diâmetro do orifício interior do acoplamento do espremedor condiciona o da bandeja do espremedor. Nesta situação, os diâmetros têm de possuir a mesma dimensão, de modo a satisfazer o acoplamento na garrafa e o direcionamento do sumo para esta.

A segunda interação ocorre entre o DP3 e o DP1, tal como na interação anterior, o DP3 é o parâmetro condicionante. Neste caso, o diâmetro da base do cone do espremedor terá de ser superior ao do diâmetro interior do acoplamento da garrafa, de modo a garantir um bom fluxo do sumo dos citrinos.

A figura 32, apresenta a matriz DSM, após a utilização dos seus algoritmos, o *clustering* e *partitioning*, onde foi possível reorganizar a matriz e mover as interações para as proximidades da diagonal. E, também, organizar em dois grupos, A e B, de modo a melhorar a organização e desenvolvimento do projeto. Neste caso, o DP3 é comum aos dois grupos mas estes poderão trabalhar de maneira independente no seu DP designado, precisando apenas de existir comunicação entre as mesmas, acerca do DP3.

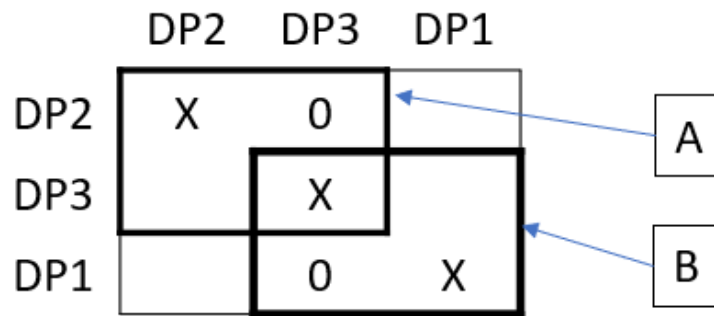


Figura 32 - Matriz DSM.

Após aplicar a DSM e utilizar as suas aplicações, por fim, utilizou-se a última metodologia, o DfC. Uma vez que, nem a TA nem a DSM envolvem a componente dos LCC, dos materiais e dos processos de fabrico, o DfC será crucial nestes aspetos tendo em conta que melhora a viabilidade a nível económico do projeto.

Tendo em conta que não é possível calcular todos os constituintes do LCC, o estudo é focado nos custos dos consumíveis do processo de fabrico. O processo de fabrico considerado foi a Impressão 3D, utilizando uma impressa da marca *Creality*, modelo *Ender 3 Pro*, figura 33, com as seguintes especificações de funcionamento:

- Dimensões máximas de impressão (mm): 220(C)x220(L)x250(H);
- Velocidade de Impressão: até 180mm/s, normal entre 30-60mm/s;
- Precisão de impressão: $\pm 0,1$ mm;
- Temperatura da cama de impressão: até 100°C;
- Temperatura máxima de extrusão: até 250°C;
- Filamento de diâmetro de 1,75mm;
- Filamentos: PLA, ABS, TPU, etc.

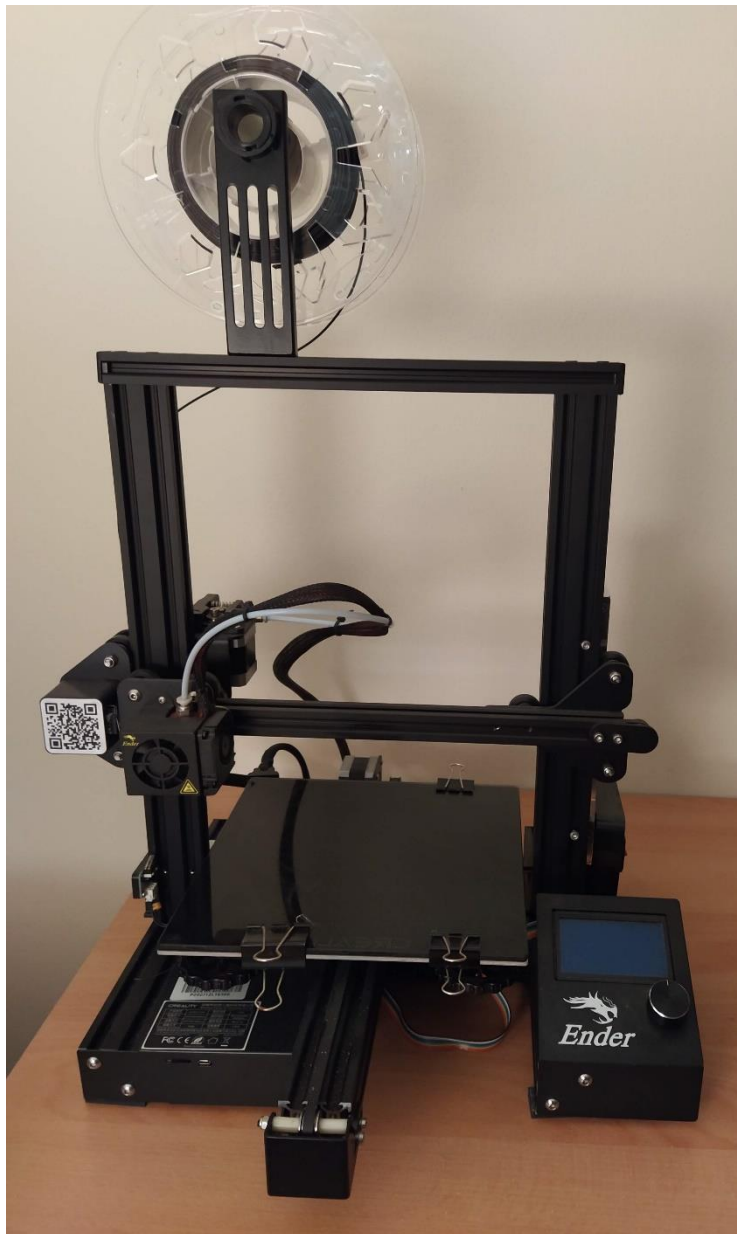


Figura 33 - *Creality Ender 3 Pro*

A impressora disponível para efetuar a impressão, para além da configuração original de fábrica, possui melhoramentos como uma cama de vidro, em vez da original magnética e flexível, contribuindo para uma melhor adesão das impressões à cama e melhor acabamento da zona inferior da peça. A impressora possui ainda espaçadores de silicone em vez de molas em metal, o que torna o suporte da cama mais estável.

Os custos envolvidos neste processo são o custo do filamento utilizado e a eletricidade consumida, que está relacionada com a duração da impressão do projeto.

Posto isto, as variáveis que têm influência nos custos de produção são a quantidade de filamento utilizado e o tempo de fabrico, sendo o objetivo do DfC obter um produto com

menor consumo de filamento e tempo de produção. Analisando a ideia do projeto da figura 31, sem a influência do DfC, num programa designado para a impressão 3D, *Ultimaker Cura*, foi possível verificar que para o fabrico do projeto, utilizando os parâmetros considerados inicialmente, são necessários 96 gramas de filamento e 10 horas e 58 minutos para a sua conclusão, anexo 3. Os principais parâmetros considerados foram:

- Enchimento: 20%;
- Espessura de camada: 0,2mm;
- Opção de adesão na cama: Sim;
- Temperatura do extrusor: 215°C;
- Temperatura da cama da impressora: 70°C;
- Velocidade de impressão: 50mm/s.

Após o desenvolvimento do projeto, através da utilização do DfC, com foco nos custos de produção e melhorando o projeto, foi possível otimizá-lo alterando a sua geometria e os parâmetros de impressão. A ideia inicial do projeto, apresentada na figura 31, foi otimizada com o DfC onde foi alterado a sua forma geométrica, reduzindo a dimensões gerais da peça, diminuindo a quantidade de material utilizado para o fabrico, uma vez que não são necessárias dimensões tão grandes e forma geométrica idealizadas anteriormente. Na figura 34, é possível verificar as diferenças dimensionais ao desenvolver o espremedor de citrinos.

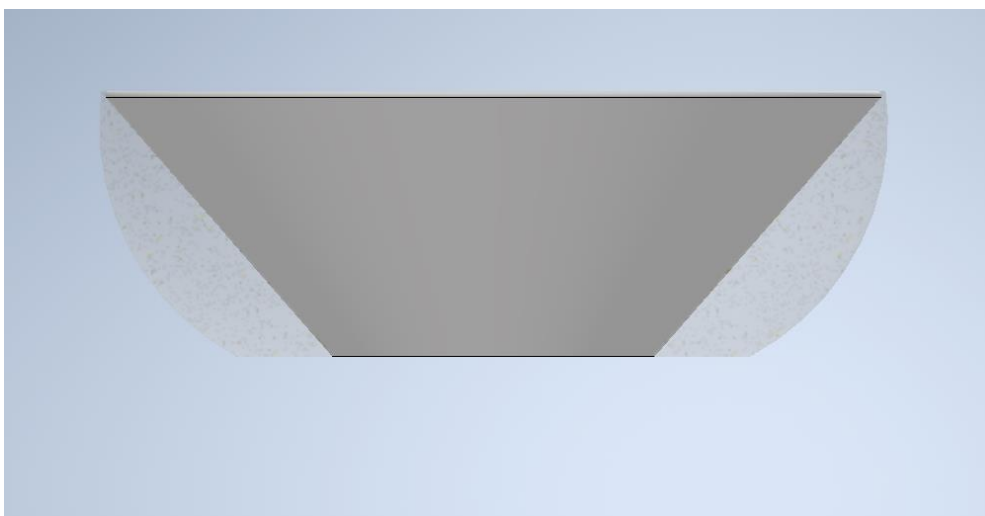


Figura 34 - Otimização geométrica do espremedor.

Após completar a otimização geométrica do espremedor, foi possível obter uma estimativa de filamento utilizado de 63 gramas, demorando 8 horas e 9 minutos a ser produzido, utilizando os parâmetros de impressão iniciais no programa *Cura*, anexo 4.

De modo a continuar a otimização do projeto, os parâmetros foram analisados e melhorados resultando nas seguintes alterações:

- Foi retirado a opção de adesão inicial na impressão;
- Foi necessário aumentar a temperatura do extrusor em 20°C e a da cama em 5°C, uma vez que o filamento a ser utilizado, neste caso, seria um filamento PETG da marca Tucab, de modo a garantir uma melhor qualidade de impressão e acabamento;
- A velocidade de impressão foi aumentada em 25 mm/s, não tendo qualquer efeito negativo na produção e qualidade da peça.

Foi necessário elevar a temperatura da cama, uma vez que, após alguma experiência a utilizar o filamento, este tem uma melhor adesão na cama de vidro evitando situações em que a primeira camada de filamento em contacto com a mesa se descole. Em relação ao aumento da temperatura de extrusão, esta foi resultante de um teste realizado, uma torre de temperatura onde é possível analisar as diferentes temperaturas de extrusão ao longo da altura da torre, onde é possível visualizar o efeito da temperatura e escolher a que contribui para uma melhor qualidade de impressão. Por fim, aumentou-se a velocidade de impressão uma vez que, através da experiência, o aumento desta em 25 mm/s não prejudica a qualidade de impressão e, assim consegue-se reduzir o tempo de impressão.

Os parâmetros utilizados foram:

- Enchimento: 20%;
- Espessura de camada: 0,2mm;
- Opção de adesão na cama: Não;
- Temperatura do extrusor: 235°C;
- Temperatura da cama da impressora: 75°C;
- Velocidade de impressão: 75mm/s.

Percebeu-se que resultaram alterações no consumo de filamento e de tempo de impressão. Neste novo projeto, figuras 35 e 36, com os parâmetros otimizados, a estimativa de filamento utilizado é de 63 gramas, ocorrendo num período de 6 horas e 24 minutos, anexo 5.

As diferenças dos consumos de filamento e tempo nos três projetos, o inicial e os dois otimizados, é de 36 gramas de filamento e 2 horas e 49 minutos de impressão, entre o projeto inicial e o primeiro projeto otimizado, e de 0 gramas de filamento e 1 hora e 45 minutos de impressão, entre os dois projetos otimizados.

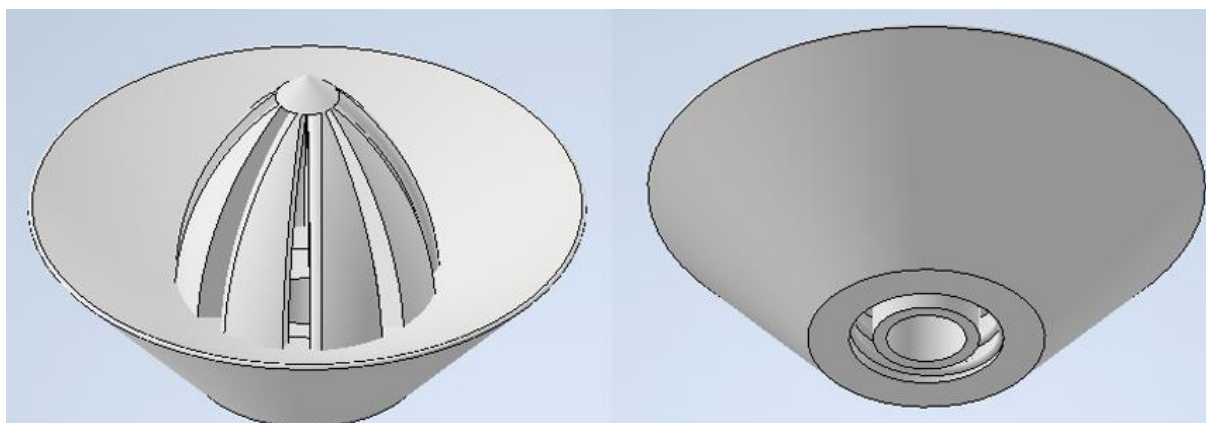


Figura 35 - Espremedor de citrinos.



Figura 36 - Espremedor acoplado à garrafa de plástico.

Como é possível verificar, os projetos embora difiram na sua aparência, possuem a mesma matriz de projeto e matriz DSM, uma vez que não foram alterados os parâmetros de *design* (DPs).

CONCLUSÃO

Desde há muito tempo que se percebeu que a fase de projeto pode influenciar bastante os custos e os resultados deste.

A Teoria Axiomática tem a capacidade e facilidade de ser utilizada no início da fase do projeto, conseguindo representar um sistema complexo de maneira simples e concisa, e partir de uma ideia complexa e abstrata e desenvolvê-la até ao último detalhe. No entanto, esta requer um projetista com algum conhecimento acerca da área do projeto, uma vez que será necessário selecionar os DPs e FRs, de modo a tentar obter um projeto desacoplado, ou caso não seja possível, obter um projeto desacoplável. Para além desse fator do conhecimento e experiência na área, a Teoria Axiomática falha, uma vez que não representa as relações entre DPs, sendo isso um fator crítico.

A Matriz Estrutural de Projeto é utilizada no planeamento e gestão de um projeto, podendo ser utilizada para atividades, componentes e equipas dentro da fase de projeto, que com o auxílio de algoritmos como o *clustering* ou *partitioning*, permite organizar e armazenar informação de forma simples. Esta metodologia permite identificar interações que nas outras metodologias não é possível, permite simular e registar as alterações que poderão acontecer no projeto, propagação de mudanças, de modo a evitar um trabalho mais exaustivo de *rework*. No entanto esta metodologia tem as suas limitações, como o início da fase de projeto, uma vez que esta precisa de informações acerca dos elementos e da equipa responsável do projeto, que só estará disponível com o desenvolver do mesmo, de modo a poder criar uma matriz DSM.

O Projeto para Custo é uma metodologia de projeto que foca a sua atenção no custo do ciclo de vida de um produto, tentando reduzir o mesmo, sem prejudicar a sua qualidade. Tendo em conta os inúmeros fatores que influenciam o LCC, é graças às inúmeras ferramentas

utilizadas nesta metodologia que é possível efetuar estimativas de custo e assim melhorar o projeto. Esta metodologia tem como fatores positivos, a sua aplicabilidade no início da etapa do projeto e a redução dos custos, sem reduzir a qualidade. No entanto, como é possível entender, quanto mais desenvolvido estiver um projeto, mais variáveis poderão ser incluídas nas estimativas de custos e tornar esta mais eficaz.

No que diz respeito às DTMs analisadas neste trabalho, é possível concluir que têm um papel bastante importante na fase de projeto.

As três metodologias têm complementaridade entre elas, sendo assim é possível realizar integrações duas a duas. Destas integrações resultam pontos fortes que, na atuação singular de cada DTM não seriam possíveis, e conseguem-se colmatar algumas das limitações de ambas.

Após a análise de forma singular e verificar que podem ser integradas duas a duas, foi proposta uma integração das três, de forma a potencializar os pontos forte de cada uma e suavizar o impacto das suas limitações num projeto. Esta proposta irá utilizar os processos de decomposição e ziguezague da TA, de forma a decompor e simplificar um projeto, verificando o mesmo através dos Axiomas da Independência e da Informação. Ir-se-á avaliar os DPs resultantes da TA, e graças às funções da DSM avaliar as relações entre os mesmos e verificar o efeito que as decisões têm na fase de projeto. A DSM contribui com a análise das relações entre os DPs, a aplicação de algoritmos como o *partitioning* e o *clustering* e a funcionalidade propagação de alterações. Ao mesmo tempo que são analisados os DPs, todo o fluxo de informações analisado é captado pela DSM. Essas informações poderão vir a ser úteis no futuro ao se trabalhar com projetos semelhantes. Para além de analisar os DPs com a DSM, pode-se utilizar o DfC para o mesmo efeito, de modo a analisar e otimizar melhor o projeto a nível económico, graças às ferramentas do DfC e perceber o impacto que as decisões tem a nível económico.

Na metodologia proposta, utiliza-se as integrações analisadas de modo a transitar de uma metodologia para a outra. Esta proposta possui os pontos fortes das DTMs analisadas e das integrações e, tem como limitações, todas as limitações visualidades das DTMs analisadas, menos aquelas que foram colmatadas.

Analisando a influência que a metodologia proposta tem no exemplo apresentado do espremedor de citrinos, é possível compreender o papel importante da mesma. Com a utilização da TA no início do projeto, foi possível interpretar as necessidades do cliente, definir os FRs que satisfazem as mesmas, bem como respeitar o axioma da independência, devido à escolha dos DPs, o que é fundamental. De seguida, com a aplicação da DSM, foi possível expor

as relações que existiam entre os DPs, facilitando a organização do projeto bem como alertar para a influência que o DP3 tem nos outros DPs, algo que não era perceptível com a utilização da TA. Por fim, com o DfC, após definidos os DPs e as suas relações entre si, foi possível otimizar os processos a nível económico, como os custos e tempo de fabrico. Comparando o projeto idealizado antes e depois do DfC, verificou-se uma redução de 34% do filamento consumido e 41% no tempo de impressão, entre os dois.

Tendo como perspetiva trabalhos futuros, é de interesse, abranger mais componentes do LCC e não apenas o custo de fabrico, de forma a ser possível observar as diferenças do mesmo no ciclo de vida da peça, uma vez que o DfC teve um impacto enorme nos custos de fabrico.

Em suma, com este trabalho é possível observar o que foi referido da importância da fase de projeto, uma vez que, o impacto das decisões é bastante importante e o desenvolvimento desta área é fulcral para encontrar novas soluções. Assim sendo, ao recorrer às DTMs analisadas, às suas integrações e à proposta deste trabalho consegue-se contribuir para este problema.

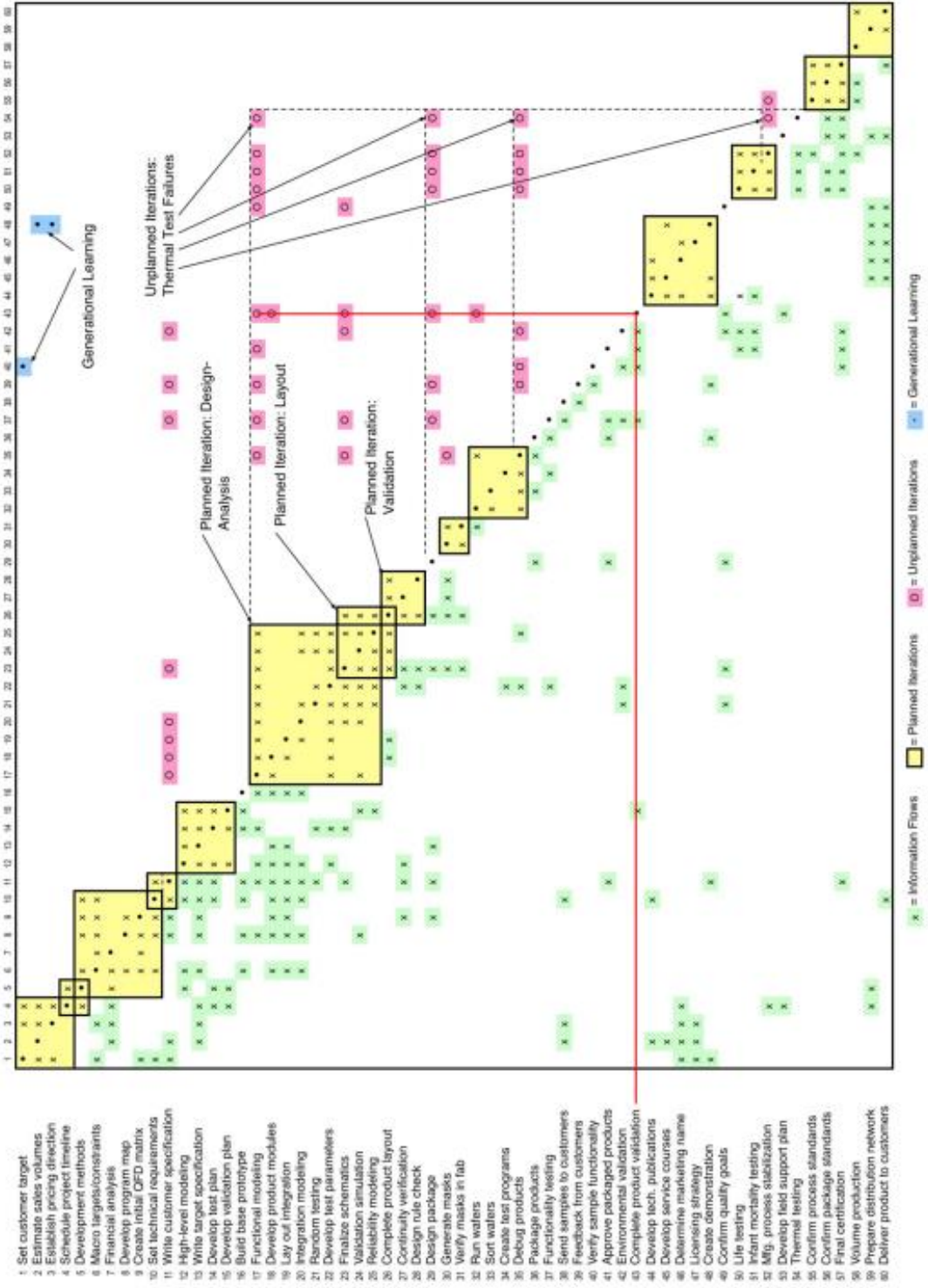
BIBLIOGRAFIA

- [1] S. . Ulrich, K.T. and Eppinger, *Product Design and Development*, (6st ed., pp. 449), *McGraw-Hill*, 2016.
- [2] M. M. Andreasen and J. Olesen, The Concept of Dispositions, *Journal of Engineering Design*, 1(1), pp.17-36, 1990
- [3] G. Q. Huang, *Design for X: Concurrent engineering imperatives*,(1st ed., pp. 489), *Springer*, 1996.
- [4] W. N. Prakash, V. G. Sridhar, and K. Annamalai, *New product development by DFMA and rapid prototyping*, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9(3), pp.1-6, 2014.
- [5] D. T. Matt, Axiomatic Design of Agile Manufacturing Systems, *Future Manufacturing Systems*, 1(1), pp. 179–194, 2010.
- [6] N. P. Suh, *The principles of design*, (1st ed., pp 418), *Oxford University Press*, 1990.
- [7] N. P. Suh, *N. P. Suh: Axiomatic Design. Advances and Applications*, (1st ed., pp. 528), *Oxford University Press*, 2001.
- [8] A. M. Gonçalves-Coelho, G. Neşţian, M. Caviqne, and A. Mourão, *Tackling with redundant design solutions through Axiomatic Design*, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, 13(10), pp. 1837–1843, 2012.
- [9] A. H. and H. F. Meng Wang, Elmar Beeh, *Function Integration for lightweight chassis based on axiomatic design and design structure matrix*, *International Journal of automotive technology*, 19(6), pp. 969–979, 2018.
- [10] J. J. Gonçalves-Coelho, A. M.; Mourão, A. J. F.; Pameis-Teixeira, *Axiomatic Design as a Background for Concurrent Engineering Education and Practice*, pp. 419–427, 2003.
- [11] N. P. Suh, *Complexity : theory and applications*, (1st ed., pp. 312), *Oxford University Press*, 2005.
- [12] G.-J. Park, *Analytic Methods for Design Practice*, (1st ed., pp.643), *Springer*, 2007.
- [13] A. J. F. M. A. M. Gonçalves-Coelho, Axiomatic design as support for collaborative decision-making in a DFM context, pp. 443–448, 2005.
- [14] D. Robertson and K. Ulrich, *Planning for Product Platforms*, *Sloan Management Review*, 39(4), pp. 19–31, 1998.
- [15] S. L. Yee, Differing roles of axiomatic design and design structure matrix in reducing system complexity, *IIEEE Int. Conf. Ind. Eng. Eng. Manag.*, pp. 994–998, 2007.
- [16] T. C. Kuo, S. H. Huang, and H. C. Zhang, *Design for manufacture and design for 'X': Concepts, applications, and perspectives*, *Computers & Industrial Engineering*, 41(3), pp. 241–260, 2001.

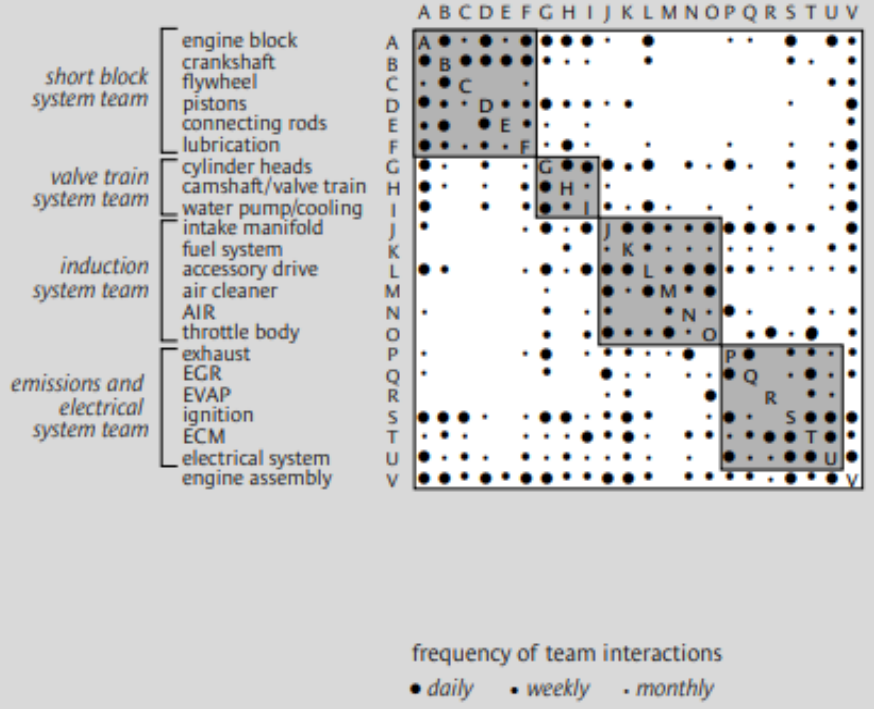
- [17] J. W. Herrmann *et al.*, "New directions in design for manufacturing," *Proc. ASME Des. Eng. Tech. Conf.*, vol. 3, pp. 853–861, 2004.
- [18] M. C. Chiu and G. E. Okudan, "Evolution of Design for X tools applicable to design stages: A literature review," *Proc. ASME Des. Eng. Tech. Conf.*, vol. 6, pp. 171–182, 2010.
- [19] E. B. Dean, *The Design-To-Cost Manifold*, *Int. Acad. Astronaut. Symp. Sp. Syst. Cost Methodol. Appl.*, pp. 1–13, 1990.
- [20] N. Wiener, *Cybernetics*, (2nd ed., pp.231), Cambridge MA: The M.I.T. Press,1961.
- [21] M. Mörtl and C. Schmied, *Design for Cost-A Review of Methods, Tools and Research Directions*, *J. Indian Inst. Sci.*, vol. 95(4), pp. 379–404, 2015.
- [22] X. Chen, J. Yang, B. Li, and X. A. Feng, Methodology and technology of design for cost (DFC), *Proc. World Congr. Intell. Control Autom.*, vol. 3, pp. 1–8, 2004.
- [23] R. U. Edwin B. Dean, *Elements of Designing For Cost*, *Conference of the American Association of Cost Engineers*, pp. 1–7, 1991
- [24] I. C. Arrais, S.P., & Pereira, "Implementing a Design to Cost Strategy in a Complex Aerospace Design Project, Instituto Superior Técnico de Lisboa, pp. 1-10, 2015.
- [25] M. Lee and B. (Serm) Kulvatunyoo, "Design-for-Cost – An Approach for Distributed Manufacturing Cost Estimation," *IFIP Adv. Inf. Commun. Technol.*, pp.1-8, 2019.
- [26] Ahmad Zuhairi Abdul Majid, *Service Design for Six Sigma Deployment*, (1st ed., pp. 448), *Wiley-Interscience*, 2005.
- [27] R. U. Edwin B. Dean, *Elements of Designing For Cost*, *Conference of the American Association of Cost Engineers*, pp. 1–7, 1995.
- [28] C. Favi, M. Germani, and M. Mandolini, *Design for Manufacturing and Assembly vs. Design to Cost: Toward a Multi-objective Approach for Decision-making Strategies during Conceptual Design of Complex Products*, *Procedia CIRP*, vol. 50, pp. 275–280, 2016.
- [29] S. Buzuku and A. Kraslawski, *Use of Design Structure Matrix for Analysis of Critical Barriers in Implementing Eco-design Initiatives in the Pulp and Paper Industry*, *Procedia Manuf.*, vol. 11, pp. 742–750, 2017.
- [30] S. Buzuku and A. Kraslawski, "Use of Design Structure Matrix for Analysis of Critical Barriers in Implementing Eco-design Initiatives in the Pulp and Paper Industry," *Procedia Manuf.*, vol. 11, no. June, pp. 742–750, 2017.
- [31] I. Gunawan, *Analysis of design structure matrix methods in design process improvement*, *Int. J. Model. Simul.*, 32(2), pp. 95–103, 2012.
- [32] M. D. Guenov and S. G. Barker, *Application of Axiomatic Design and Design Structure Matrix to the decomposition of engineering systems*, *Syst. Eng.*, 8(1), pp. 29–40, 2005.
- [33] Q. Shi and T. Blomquist, *A new approach for project scheduling using fuzzy dependency structure matrix*, *Int. J. Proj. Manag.*, 30(4), pp. 503–510, 2011.
- [34] D. Tang, R. Zhu, J. Tang, R. Xu, and R. He, *Product design knowledge management based on design structure matrix*, *Adv. Eng. Informatics*, 24(2), pp. 159–166, 2009.
- [35] T. R. Browning, *Design Structure Matrix Extensions and Innovations: A Survey and New Opportunities*, *IEEE Trans. Eng. Manag.*, vol. 63(1), pp. 27–52, 2016.
- [36] Q. Dong and D. E. Whitney, *Designing a requirement driven product development process*, *ASME 2001 Int. Design Eng. Tech. Conferences* pp. 72–79, 2001.
- [37] T. R. Browning and S. D. Eppinger, *Tackling Project Complexity with the Design Structure Matrix (DSM)*, *Mundo Proj. Manag.*, 9(50), pp. 54–60, 2013.

- [38] S. D. Eppinger, Innovation at the Speed of Information, *Harvard Business Rev.*, no. 3, pp. 1–11, 2001.
- [39] MIT Massachusetts Institute of Technology, Chapter 1 Introduction to Axiomatic Design, 1996, Consultado a september, 20,2022, em <http://web.mit.edu/afs/athena/course/2/2.882/www/chapt%0Aer1/chapter1.htm>.
- [40] K. G. Mertens, *Measure and manage your product costs right–development and use of an extended axiomatic design for cost modeling*, Technische Universität Hamburg 2020.
- [41] M. D. Guenov and S. G. Barker, *Requirements-driven design decomposition: a method for exploring complex system architecture*, *Proceedings of the ASME 2004 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, pp. 145-151, 2004.
- [42] D. B. Tang, G. J. Zhang, and S. Dai, *Integration of axiomatic design and design structure matrix for product design*, *Adv. Mater. Res.*, 25(3), pp. 610-619, 2009.
- [43] X. Cheng and C. Chen, *Applying independence axiom and design structure matrix to product module division*, *2010 Int. Conf. Mech. Autom. Control Eng. MACE2010*, pp. 581–584, 2010.
- [44] S. D. Eppinger and T. R. Browning, *Design Structure Matrix Methods and Applications*, (1st ed., pp.), MIT Press, 2012.
- [45] Amazon (2023). Espremedor de Frutas Mondial. Consultado a january 8, 2023, em https://www.amazon.com.br/Espremedor-Turbo-Citrus-Mondial-Branco/dp/B07659Y78D/ref=sr_1_7?keywords=espremedor+de+laranja&qid=1673225815&sr=8-7.

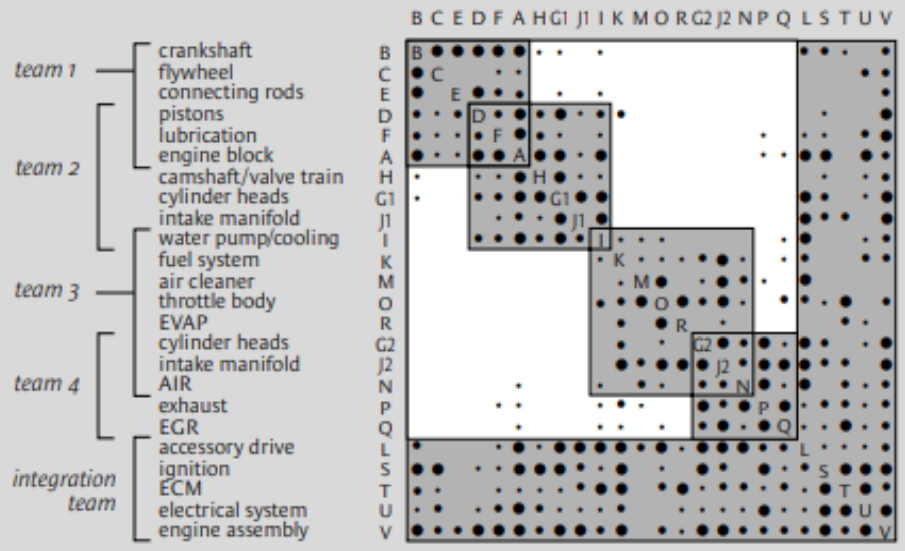
ANEXO 1 [37]



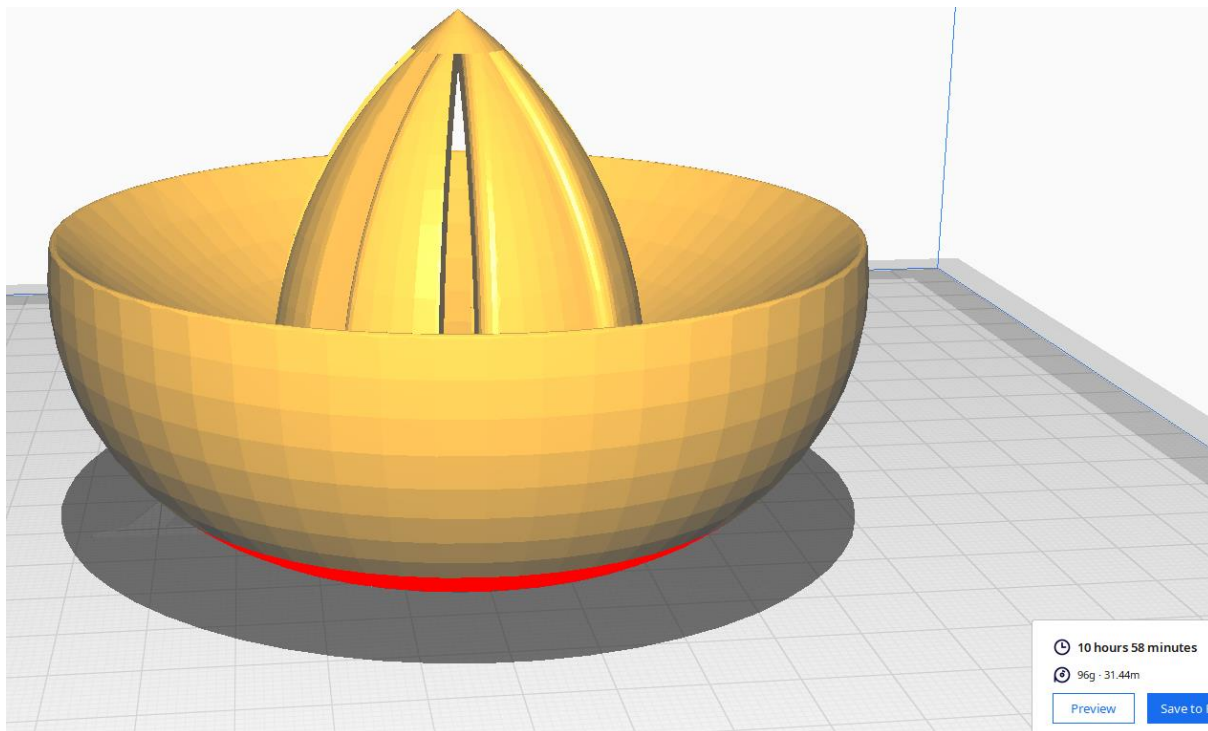
Before...



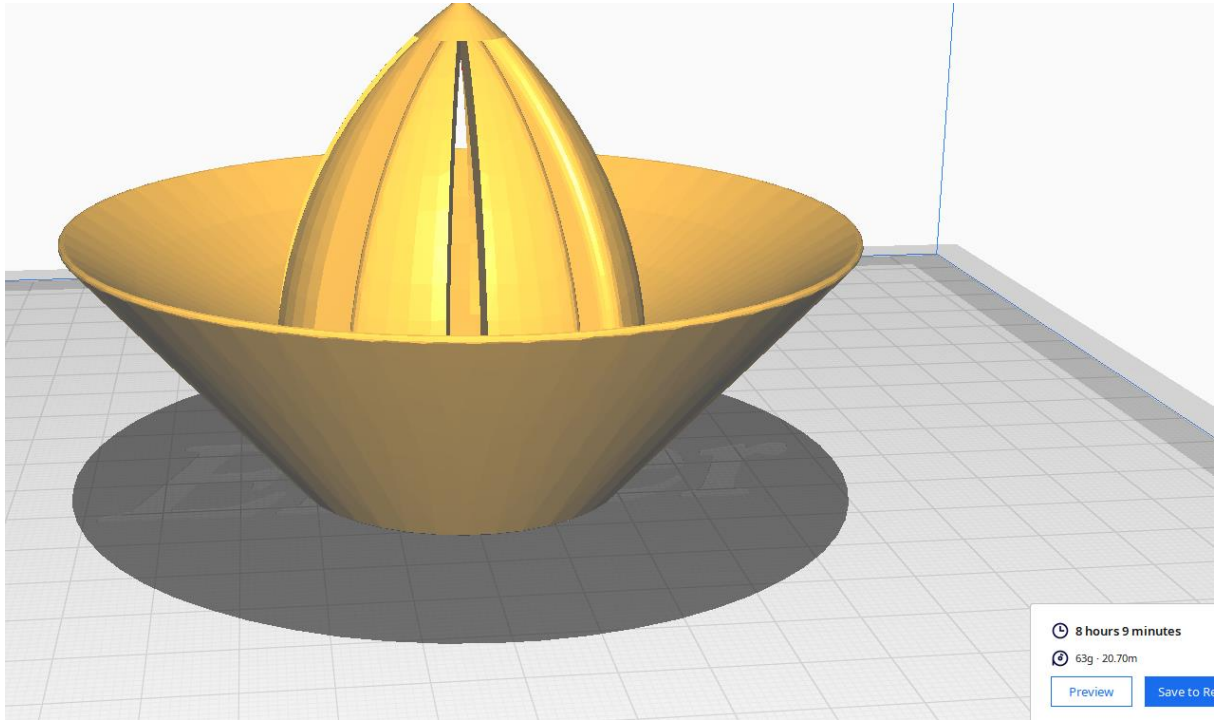
...and After



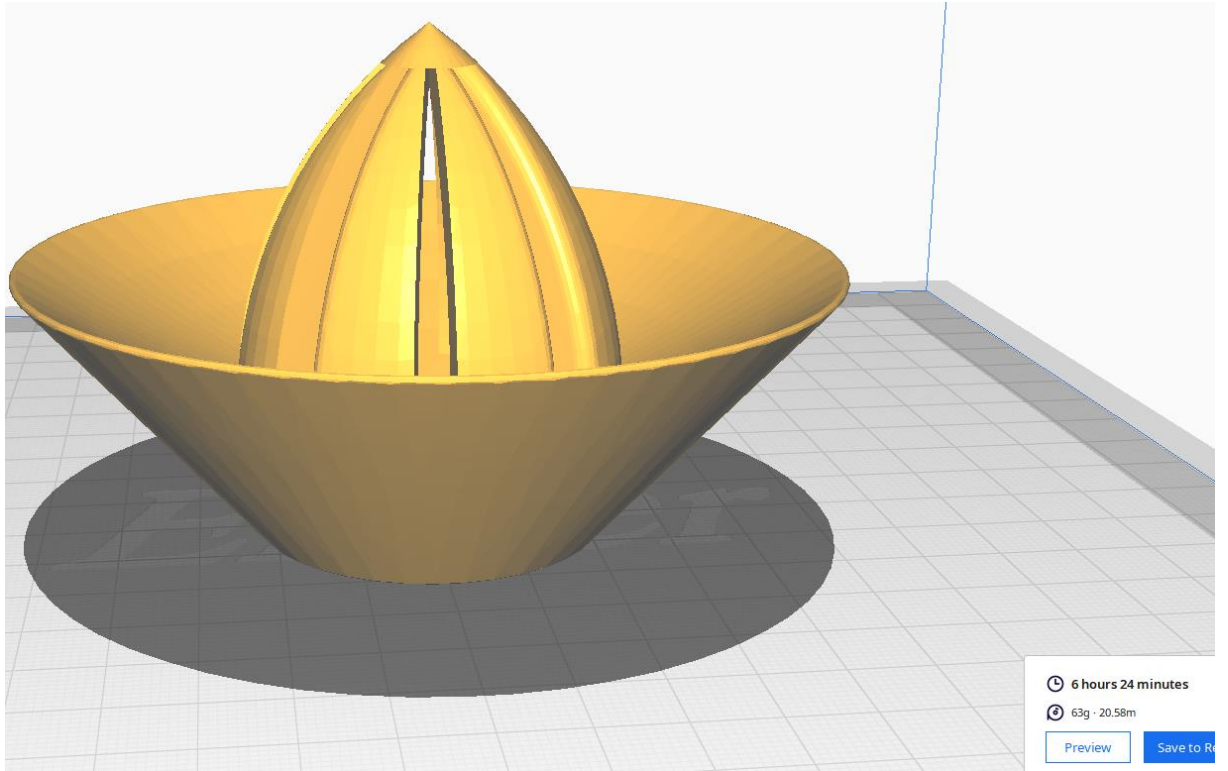
ANEXO 3



Anexo 4



Anexo 5





2022

José Paulino

CONTRIBUTO PARA A INTEGRAÇÃO ENTRE TEORIA AXIOMÁTICA, MATRIZ ESTRUTURAL DE PROJETO E PROJETO PARA CUSTO NO DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DE