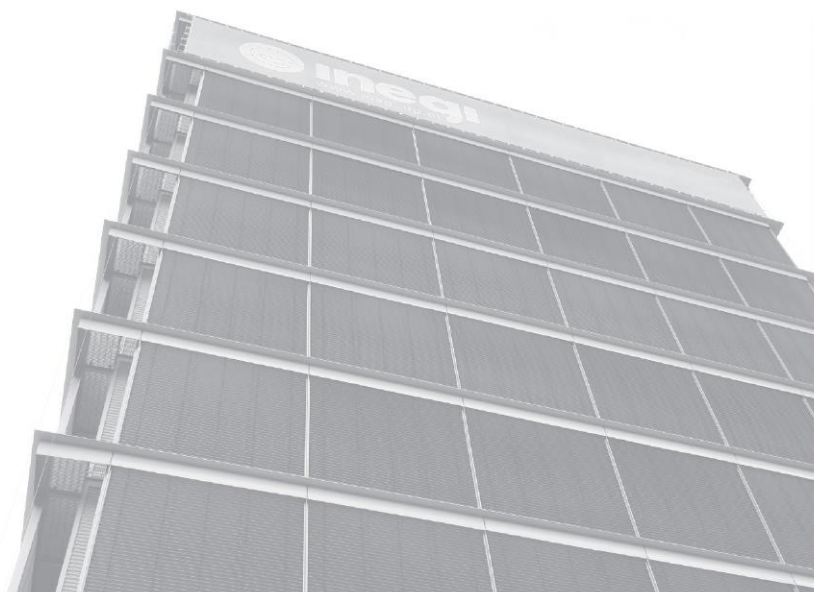
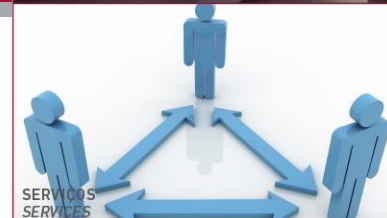
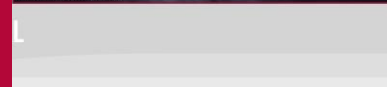
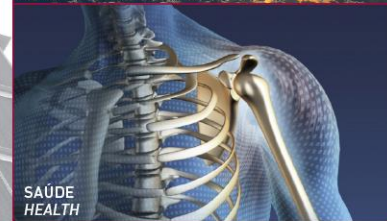




PROJETO ADIRA - TOPMAT

ARTIGO TÉCNICO

Modularidade, *Standardização* e *Design-for-X*
Resultados de casos de estudo



Esta página foi deixada propositadamente em branco

Autores

INEGI

António Baptista
Daniel Peixoto
Tiago Alves
Emanuel Lourenço
Joaquim Santos
João Paulo Pereira

ADIRA MFS

João Paulo Santos
Tiago Brito e Faro

INEGI – Instituto de Ciências e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial

Campus da FEUP | Rua Dr. Roberto Frias, 400 | 4200-465 Porto | PORTUGAL

Tel: +351 22 957 87 10 | Fax: +351 22 953 73 52 | E-mail: inegi@inegi.up.pt | Site: www.inegi.up.pt

Índice

1. Enquadramento.....	7
2. Modularidade e Normalização	9
2.1 Normalização (Standardização)	9
2.2 Modularidade	9
2.3 Reconfigurabilidade	11
2.4 Análise de modularidade utilizando Matrizes DSM: Key Performance Indicators 12	
2.4.1 Índice SMI	13
2.4.2 Índice NZF	14
2.4.3 Índice M	14
2.5 Análise de modularidade utilizando Matrizes DSM: Outros Parâmetros.....	17
2.5.1 Convertibilidade	17
2.5.2 Escalabilidade	18
2.5.3 Reconfigurabilidade.....	19
2.5.4 Conclusões	21
2.6 Análise de modularidade utilizando Matrizes DSM: Modularidade, Reconfigurabilidade e Comunalidade	22
2.6.1 Índice de modularidade - M_D	22
2.6.2 Índice de Reconfigurabilidade	24
2.6.3 Índice de Comunalidade	24
3. Nova metodologia Lean Design-for-X.....	27
3.1 Metodologia MSM – Multi-Layer Stream Mapping.....	28
3.2 Especificação da Metodologia INEGI “Lean Design-for-eXcellence”	33
3.3 Descrição da nova metodologia INEGI “Lean Design-for-eXcellence”	35
3.4 Descrição de variáveis e métricas para os vários critérios de design estudados 38	
3.4.1 Design for Manufacturing / Cost	38
3.4.2 Design for LCA.....	40
3.4.3 Design for Optimization.....	41
3.4.4 Design for Modularity.....	41
3.4.5 Design for Maintenance	41

4.	Alguns resultados de casos de estudo	43
4.1	Quinadora HD-Greenbender	43
4.2	Máquina Laser LF	45
5.	Considerações Finais	49
6.	Bibliografia.....	51

1. ENQUADRAMENTO

O presente documento insere-se no Projeto TOPMAT no âmbito da Aquisição e Desenvolvimento de Competências (Atividade 3) e tem como principal objetivo apresentar e divulgar os desenvolvimentos e resultados técnico-científicos inovadores obtidos no aprofundar de capacidades no domínio da modularidade, desenvolvendo casos de estudo que permitam perceber quais os aspetos mais relevantes e úteis de cada metodologia e métrica para auxiliar ao desenvolvimento de máquinas ADIRA MFS.

Na vertente da modularidade foram aplicadas metodologias que fazem uso do DSM (*Design Structure Matrix*), permitindo desenvolver índices e métricas para avaliar e comparar equipamentos, permitindo assim definir um rumo de desenvolvimento que fortaleça os aspetos mais positivos e minore as desvantagens.

A inovadora Metodologia DfX – Design-for-eXcellence, desenvolvida pelo INEGI é apresentada com vista à sua aplicação e demonstração nos casos de estudo ADIRA, reforçando assim a aplicabilidade desta metodologia e proveito possível para o tipo de equipamentos a desenvolver pela ADIRA. A nova metodologia está alicerçada, como previsto nos objetivos do projeto, na abordagem modular de sistemas complexos e permite agregar a análise e avaliação simultânea de diferentes domínios de projeto (*design*).

2. MODULARIDADE E NORMALIZAÇÃO

2.1 Normalização (Standardização)

A metodologia a aplicar para uniformizar ou *standardizar* um dado componente tem três etapas essenciais:

- Especificação;
- Unificação;
- Simplificação.

A especificação passa por um levantamento dos conjuntos que compõem a estrutura em questão e a sua gama. A unificação escolhe as formas e as dimensões ideais sem comprometer a funcionamento do componente. A simplificação, por sua vez, elimina duplicações e adapta um mesmo conjunto a uma gama o mais abrangente possível, respeitando as considerações de projeto e um coeficiente razoável de fiabilidade e segurança do componente.

Ao processo de standardização pode-se acoplar o conceito “*Lean Thinking*”, reduzindo ou eliminando desperdícios tais como: a produção excessiva; tempos de espera de mão-de-obra; movimentação de materiais ou produtos semi-acabados; sobreprocessamento; os defeitos. O “pensamento lean” (Pinto 2009) consiste num conjunto de conceitos e princípios, que têm como objetivo simplificar o modo como uma empresa produz valor enquanto se tentam eliminar todos os seus desperdícios (Vaughn, Fernandes et al. 2002).

2.2 Modularidade

A modularização tem três objetivos principais [Baldwin, C. Y. and K. B. Clark (2004)]:

- Tornar a complexidade possível de gerir;
- Permitir a realização de trabalho em paralelo;
- Permitir maior resposta à incerteza do futuro;

A modularização tenta reduzir a complexidade relativamente aos módulos aplicados, sendo que cada módulo não interfere na especificação dos restantes. A estratégia modular, tenta minimizar os problemas tecnológicos e organizacionais através da redução da complexidade, uma vez que separando as diferentes tecnologias em vários módulos, dividem-se igualmente as várias etapas de produção dum produto final. Ao dividir um produto em vários módulos, cada módulo deve ter o mínimo de interações

entre os seus principais subsistemas. Este conceito vai ao encontro da teoria da modularização que diz que um produto necessita de um conhecimento mínimo da atividade do projeto.(Baldwin and Clark 2004).

A modularidade também permite maior resposta à incerteza do futuro porque os constituintes de um projeto modular podem ser alterados com maior facilidade, pois apenas têm que cumprir um conjunto de regras de projeto a nível de interfaces, permitindo substituir elementos antigos por novos com maior facilidade e menores custos.

O conceito de arquitetura de um produto concentra-se na especificação das diferentes interfaces que unem os diversos componentes e na definição das suas funções, contribuindo para um determinado funcionamento no produto final. A arquitetura dum produto pode ser integral ou modular dependendo de duas propriedades, a ligação entre os diversos elementos físicos que constituem o produto e o nível de ligação entres estes elementos.

A modularidade pode-se dividir em três tipos principais: Modularidade no Projeto (*modularity-in-design*), Modularidade na Produção (*modularity-in-production*) e Modularidade no Uso (*modularity-in-use*).

Um conjunto de bens apresenta-se como assente em abordagens que incluam a “modularidade para o uso” se o consumidor conseguir misturar e combinar os componentes do produto para que o produto final corresponda aos seus gostos e necessidades. Por exemplo os consumidores comprem camas, colchões, almofadas, lençóis e cobertores de fabricantes e lojas distintas. No entanto todos estes componentes encaixam corretamente, porque os diferentes fabricantes utilizam medidas standard que são comuns entre fabricantes, revendedores e clientes. Assim a modularidade em uso apoia a customização do sistema por forma a cumprir com necessidades e gostos dos consumidores.

Os fabricantes utilizam a modularidade em produção há mais de um século. Os fabricantes de automóveis, por exemplo, produzem componentes em vários sítios e depois agrupam-nos na montagem final. Esta capacidade existe porque cada fabricante define de forma precisa e completa como os componentes interagem com o veículo. Este tipo de modularidade é fundamental para a produção em massa.

Um complexo sistema de engenharia é modular em projeto apenas se o processo de desenvolvimento do sistema poder ser dividido e distribuído através dos diferentes módulos, sendo este desenvolvimento coordenado por regras de desenvolvimento fixas e não por consulta entre os projetistas. De todos os tipos de modularidade, a modularidade em projeto é o menos bem entendido e o que tem consequências económicas mais interessantes, uma vez que permite que sejam obtidos novos rumos de projeto correspondem a opções com uma determinada valorização económica, permitindo multiplicar as opções inerentes num sistema complexo. Por sua vez estas opções permitem aumentar o valor do projeto e alterar a forma como o sistema evolui.

2.3 Reconfigurabilidade

Os sistemas reconfiguráveis de produção são eficientes a nível de custos porque (Aboufazeli, Nasser (2011)):

- Recursos ajustáveis implicam escalabilidade para permitir alterar de acordo com a procura de mercado e convertibilidade para criar novas variantes da família de peças. Desta forma consegue-se evitar, por exemplo, a substituição de equipamentos antigos por mais recentes;
- Flexibilidade customizada na família de componentes de forma a garantir produtividade aceitável e flexibilidade. Os equipamentos de produção reconfiguráveis têm a capacidade de serem flexíveis para novos produtos quando estes são necessários, mas sem tempos de setup elevados.

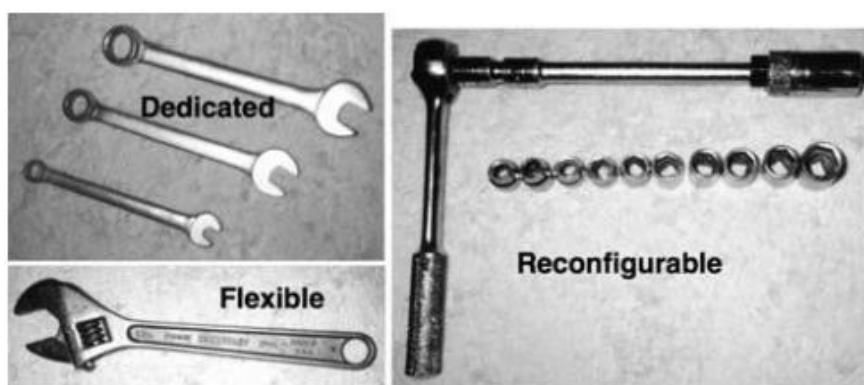


Figura 1 - Equipamentos reconfiguráveis completam o intervalo entre os equipamentos dedicados e os equipamentos flexíveis.

Os equipamentos reconfiguráveis inserem-se entre os equipamentos dedicados e os equipamentos flexíveis. O equipamento dedicado possui muitas ferramentas para trabalhar apenas num componente, o que permite ter enorme produtividade com a penalização da flexibilidade. Os equipamentos flexíveis, como uma máquina CNC, permite produzir com menor produtividade, abarcando no entanto uma maior capacidade de alteração do componente. Os equipamentos reconfiguráveis abarcam o espaço entre estes tipos de equipamento, já que permitem produzir um elevado número de variantes dum componente, produzindo-o com custos controlados e com rápida capacidade de resposta à alteração do componente.

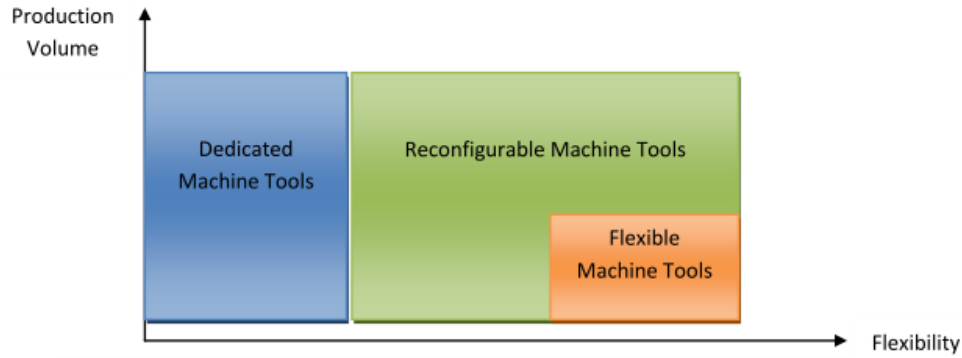


Figura 2 – Flexibilidade vs Volume de produção de diferentes classes de máquina ferramenta.

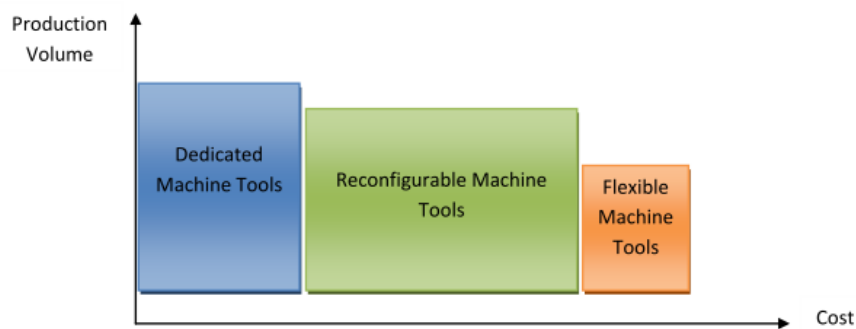


Figura 3 – Custo vs Volume de produção de diferentes classes de máquinas ferramenta.

2.4 Análise de modularidade utilizando Matrizes DSM: Key Performance Indicators

Existe um elevado conjunto de aspetos designados por *Key Performance Indicators* [KPI], para avaliar os diferentes aspetos das matrizes DSM.

De seguida serão apresentados dois KPIs estudados para a avaliação do grau de modularidade obtido através da criação e estudo de uma DSM: *Singular Value Modularity Index* [SMI] e o *Non-Zero Fraction* [NZF]. Estas equações desenvolvidas por Holttä et al. são métricas que permitem calcular o valor do SMI de uma DSM.

$$SMI = 1 - \frac{1}{N \cdot \sigma_1} \sum_{i=1}^{N-1} \sigma_i [\sigma_i - \sigma_{i+1}] \quad (1)$$

$$SMI' = \frac{1}{N} \arg \min_{\alpha} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\sigma_i}{\sigma_1} - e^{-\frac{[i-1]}{\alpha}} \right| \quad (2)$$

$$SMI = \frac{\alpha}{N} \quad (3)$$

$$NZF = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N DSM_{ij}}{N[N-1]} \quad (4)$$

Para cálculo dos valores de SMI e NZF foram consideradas as equações (1), (2), (3) e (4) (Hölttä, Suh et al. 2005; Stryker and Jacques 2009). A equação (1) (Hölttä, Suh et al. 2005) não se utiliza uma vez que se encontram formulações mais recentes para o mesmo KPI (equações (2) e (4)) (Holtta-Otto and de Weck 2007; Stryker and Jacques 2009).

Por simplificação, nos casos estudados, considerou-se que as ligações entre características tinham todas a mesma importância, optando-se por matrizes binárias.

2.4.1 Índice SMI

O SMI permite avaliar o grau de modularidade de um sistema através de uma variação entre 0 e 1, sendo que um valor próximo de 1 indica elevada modularidade. O SMI é independente do tamanho da matriz DSM, o que possibilita comparar o grau de modularidade de produtos distintos.

As equações (2) e (3) desenvolvidas por Hölttä-Otto et al. (Holtta-Otto and de Weck 2007), assumem, por questões comparativas, que os valores singulares em todos os sistemas diminuem exponencialmente de acordo com “ $\exp[-i/\alpha]$ ”. Deste modo é obtido um valor de SMI’ para o qual ‘ α ’ é mínimo, e, de seguida, através da equação (3), é determinado o SMI dividindo este valor de “ α ” pelo número de elementos (N) em que o produto foi dividido.

Os passos para obtenção dos valores singulares de uma matriz DSM são apresentados na Figura 4.

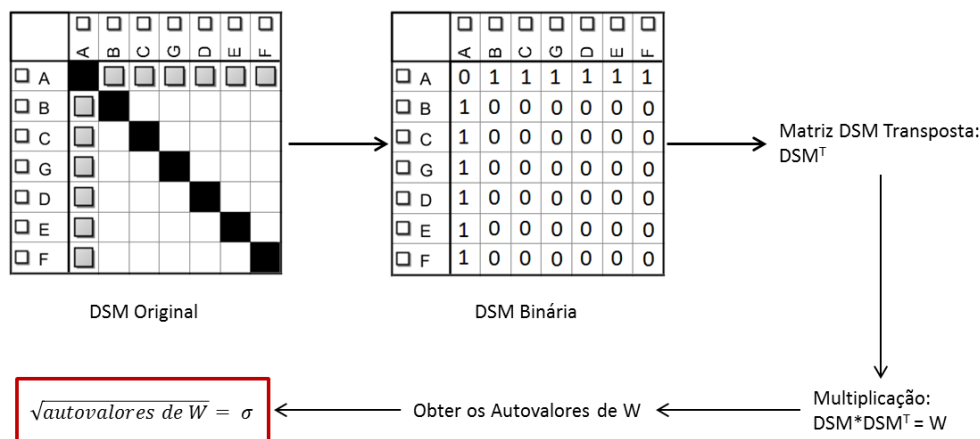


Figura 4 – Passos desde a matriz inicial DSM até à obtenção dos valores singulares.

D valores singulares [σ] da DSM, efetua-se um ciclo do qual resulta o valor de “ α ” para o qual o somatório é mínimo. Aplicando este α com (4) e (3) obtém-se o valor de SMI.

2.4.2 Índice NZF

O índice NZF é um indicativo da dispersão do DSM, variando, tal como o SMI, de 0 a 1. Um valor de NZF mais perto de 1 significa que todos os componentes estão ligados a todos os outros componentes. Um valor de NZF aproximadamente igual a 0 indica um sistema disperso em que os componentes são praticamente todos independentes uns dos outros. O NZF é também independente da reorganização de linhas e colunas.

O cálculo do NZF consiste numa fração, em que o numerador é a soma de todas as entradas diferentes de zero na matriz binária após a remoção dos elementos da diagonal e o denominador depende apenas do número de características a avaliar.

Numa fase posterior surgiu a oportunidade de contacto entre o INEGI e o criador do programa CAM [David C. Wynn], e após alguma discussão e esclarecimento por parte de ambas as entidades, foram geradas e inseridas rotinas de cálculo para o SMI e NZF no programa CAM. Deste modo atualmente é extremamente simples determinar estes parâmetros para qualquer DSM criada no programa CAM.

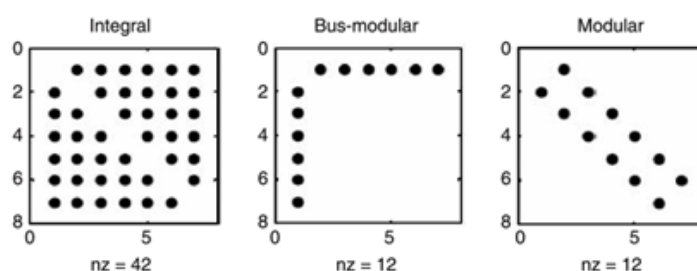


Table 1. Values of SMI and NZF for idealized architectures with $N = 7$.

Case	Description	N	α	SMI (Equation (6))	NZF (Equation (7))
(a)	Integral	7	1.12	0.16	1.0
(b)	Bus-modular	7	0.82	0.12	0.29
(c)	Modular	7	5.67	0.81	0.29

Figura 5 – Exemplos de cálculo de SMI e NZF (Holtta-Otto and de Weck 2007).

2.4.3 Índice M

Segundo Mikkola (Mikkola and Gassmann 2003; Mikkola 2006; Mikkola 2007) a modularidade de um produto é calculado através da seguinte fórmula:

$$M = e^{-n_u/[2N.s.\delta]} \quad (5)$$

Em que:

- M – é o resultado do índice de modularidade proposto;

- n_u – é o número de peças [ou componentes] únicas;
- N – é o número total de peças;
- S – é o grau de substituíbilidade das peças do produto [ou sistema];
- δ – é o grau de acoplamento.

O M depende da maneira como os componentes e módulos estão relacionados entre si, pelo que esta métrica depende da arquitetura do produto o que resulta em vários valores de M para *clusterings* diferentes.

Num produto normalmente existem peças que não são standardizadas [peças únicas – u]. Quanto maior o número de peças únicas menor será o valor de M .

Passos para calcular a Modularidade [M]:

1. Dividir o produto em sistemas, subsistemas, módulos e peças [ou componentes];
2. Identificar as interfaces entre componentes;
3. Identificar os componentes únicos;
4. Criar uma DSM juntamente com o correspondente diagrama de Blocos da arquitetura do produto.

No passo 1 a divisão de um produto deve ser aquela que se ache necessária. A Figura 6 apresenta um exemplo da hierarquização de um produto.

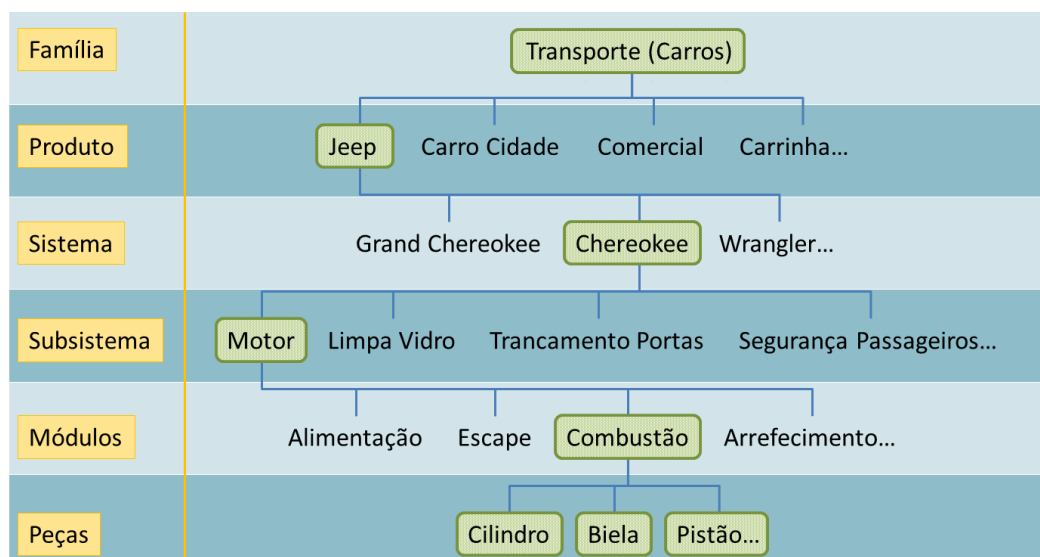


Figura 6 – Exemplo de uma hierarquização de um produto.

Grau de Acoplamento [δ]

O grau de acoplamento é uma medida da média das relações entre componentes [dentro de um módulo] e entre módulos [de um subsistema] definida como:

$$\delta = \delta_{\text{módulos}} + \delta_{\text{subsistemas}} \quad (6)$$

$\delta_{\text{módulos}}$ é a média aritmética de todos os δ_m , em que δ_m é o grau de acoplamento de um módulo e N_m é o número de módulos existentes no subsistema que está a ser analisado.

$$\delta_{\text{módulos}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_m} \delta_m}{N_m} \quad (7)$$

$$\delta_m = \frac{\text{Número de ligações entre componentes de um módulo}}{\text{Número total de componentes desse mesmo módulo}} \quad (8)$$

De modo semelhante $\delta_{\text{subsistemas}}$ é a média aritmética de todos os δ_s , δ_s é o grau de acoplamento de um subsistema e N_s é o número de subsistemas existentes no sistema que está a ser analisado.

$$\delta_{\text{subsistemas}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} \delta_s}{N_s} \quad (9)$$

$$\delta_s = \frac{\text{Número de ligações entre módulos de um subsistema}}{\text{Número total de módulos desse mesmo subsistema}} \quad (10)$$

Grau de Substituibilidade [s]

O grau de substituibilidade quantifica quão substituível é uma peça ou módulo é substituível dentro de um módulo ou subsistema respetivamente, sendo calculado do seguinte modo:

$$s = \frac{\text{Número de outros sistemas onde o módulo com os componentes únicos pode ser usado}}{\text{Número de ligações do módulo em questão com os outros módulo do presente sistema}} \quad (11)$$

Neste parâmetro o que interessa é um componente ou módulo no sistema completo.

Tabela de correspondências

Na Tabela 1 está uma lista de terminologias e siglas utilizadas no cálculo da modularidade.

Tabela 1 – Siglas e nome de parâmetros de cálculo para a modularidade M.

Sigla	Nomenclatura
N	Número total de componentes
$(n_{std} + n_u)$	
N_m	Número de componentes de um módulo
n_{std}	Componentes standardizados
n_u	Componentes únicos [não standardizados]
$(n_u = n_{u_c} + n_{u_nc})$	
n_{u_c}	Componentes únicos personalizáveis
n_{u_nc}	Componentes únicos não personalizados
N_m	Número de módulos de um subsistema
N_s	Número de subsistemas de um sistema
K	Número de interações
K_c	Número de interações entre componentes de um módulo
K_m	Número de interações entre módulos de um sistema
K_m'	Número de interações entre módulos de um subsistema

2.5 Análise de modularidade utilizando Matrizes DSM: Outros Parâmetros

Existem outros KPI's que podem ter interesse na análise de um sistema modular e que são descritos e caracterizados de seguida.

2.5.1 Convertibilidade

As equações propostas por Koren et al. (Maier-Speredelozzi, Koren et al. 2003) [equações (12) a (17)] são utilizadas para calcular o parâmetro C_s muito específico a sistemas de produção e não produtos. Este autor define **convertibilidade como sendo a capacidade que um sistema tem de ajustar ou alterar as funcionalidades de produção de um produto para outro.**

$$C_s = w_1 C_c + w_2 C_M + w_3 C_H \quad (12)$$

$$C_C = 1 + \frac{\text{Log}\left(\frac{C'_C}{C'_{C,serial}}\right)}{\text{Log}\left(\frac{C'_{C,K-Parallel}}{C'_{C,K-serial}}\right) \cdot \frac{1}{9}} \quad (13)$$

$$C'_C = \frac{R \cdot X}{I} \quad (14)$$

$$R_{max} = 2n + f \sum_{i=1}^{n-1} i \quad (15)$$

$$C_M = \frac{\sum_{i=1}^N C'_M}{N} \quad (16)$$

$$C_H = \frac{\sum_{i=1}^M C'_H}{M} \quad (17)$$

Os parâmetros C_C , C_M e C_H representam valores de convertibilidade associados, respetivamente a configuração, máquinas e processamento de materiais/matérias-primas. Os parâmetros C'_M e C'_H são definidos a partir de questões relacionadas com as funcionalidades que as máquinas possuem. Por exemplo para determinar C'_M da primeira máquina do sistema é verificado se:

- A máquina está equipada com sistema automático de troca de ferramentas;
- A máquina é facilmente reprogramada, com software flexível;
- A máquina é modular, com componentes de hardware flexíveis;
- A máquina tem a capacidade de ser colocada e fixada em qualquer parte da fábrica;
- A máquina está equipada com uma grande variedade de ferramenta (Maier-Sperdelozzi, Koren et al. 2003).

Se a máquina em análise tiver todas estas funcionalidades é dado um valor de 10 à máquina, e se não tiver nenhuma é dado o valor de 0. Esta métrica fica assim muito dependente da perceção de cada utilizador e mostra pouca flexibilidade para outras utilizações.

2.5.2 Escalabilidade

Em 2002 Koren et al. definiram escalabilidade como sendo a aptidão de um sistema para ajustar a sua capacidade de produção através da reconfiguração desse mesmo sistema, com custos mínimos e num tempo mínimo, abrangendo de modo incremental uma vasta

área produtiva (Spicer, Koren et al. 2002). Em 1993 Luke (Luke 1993) define este conceito como sendo a capacidade de manter custos de produção enquanto a carga de trabalho aumenta num determinado sistema.

O cálculo para este parâmetro é obtido através do conceito de “effectiveness” que varia entre zero e infinito. Aplicando uma ligeira alteração à fórmula da equação (18) esta (equação (19)) passa a determinar o grau de escalabilidade de um sistema, grau este que varia entre zero e um (Gumasta, Kumar Gupta et al. 2011).

$$Effectiveness = \frac{t_1}{t_{exec}^2 N} \quad (18)$$

$$Escalabilidade = \frac{Eficiência}{\frac{1}{k}} \quad (19)$$

2.5.3 Reconfigurabilidade

Um sistema reconfigurável permite flexibilidade produtiva, capacidade de incorporar novos módulos com novas tecnologias, adaptabilidade a variações do mesmo componente. Assim não só a nível de produção se obtém flexibilidade mas também no próprio sistema.

C. Riba R. et al. propõe duas métricas distintas em 2006 (R., R. et al. 2006), dizendo respeito especificamente a máquinas ferramentas. São estas a Reconfigurabilidade para Máquinas Ferramentas [Rf] e Reconfigurabilidade para Máquinas de Corte [Rc].

A equação (20) apresentada por C. Riba R. et al. é uma possível métrica para cálculo de reconfigurabilidade de máquinas ferramentas.

$$Rf = \ln(Cfg) * \ln\left(\frac{Aop * Mct}{\ln(Stc)}\right) * 0.368 \quad (20)$$

Em que:

- Rf – Métrica para a reconfigurabilidade de máquinas ferramenta.
- Cfg – Número de configurações possíveis.

Este parâmetro indica o número de configurações possíveis que a máquina ferramenta pode ter de modo a desempenhar operações tecnológicas genéricas dentro de um determinado tempo. Por exemplo um torno apenas terá uma configuração possível já que a única operação que consegue desempenhar é de rodar em torno de um eixo.

- Stc – Número de componentes estruturais.

Este parâmetro indica o número de componentes fundamentais da máquina ferramenta. No caso de um torno convencional seriam contabilizados 5 componentes: quadro, caixa de velocidades, suporte à peça a maquinar, cabeçote móvel e eixo.

- Mct – Número de movimentos possíveis efetuados pelos componentes da máquina ferramenta.

Este parâmetro permite caracterizar numericamente o número de movimentos executáveis [rotação e/ou translação, numa, duas, ou mais direcções] pelos constituintes da máquina ferramenta.

- Aop – Número de operações auxiliares.

Este parâmetro indica o número de operações auxiliares que a máquina ferramenta consegue desenvolver.

Um valor elevado para Rf, implica um elevado grau de reconfigurabilidade.

Cálculo de Índice de Dificuldade de Reconfigurabilidade

O cálculo do RDI (*Reconfigurability Difficulty Index*) é indicado em Aboufazel, Nasser (2011) como sendo:

$$RDI = w_1 * \frac{(N_{cm})_i}{(N_{cm})_{max}} - w_2 * 1.443 * [\ln(p_1) + \ln(p_2) + \ln(p_3)] \quad (21)$$

Em que:

- $(N_{cm})_i$ – É o número de módulos na configuração número i que podem ser alterados;
- $(N_{cm})_{max}$ – É o número máximo de módulos alteráveis entre as configurações geradas;
- p_1, p_2, p_3 – Probabilidade de sucesso nas interfaces mecânicas (p_1), de potência (p_2) e informáticas (p_3), antes de receber informação por parte do sistema. Estas probabilidades podem ser obtidas por análise de histórico e experiência de operadores e engenheiros;
- w_1, w_2 – Peso da complexidade relativa proveniente do número de módulos e da complexidade relativa da complexidade das interfaces (w_2). Tipicamente a dificuldade imposta à reconfigurabilidade devido à complexidade das interfaces é superior à dificuldade de reconfigurabilidade devido ao número de módulos, pelo que $w_2 > w_1$. O peso relativo destes devem ser ajustados de acordo com a experiência e dados históricos;

2.5.4 Conclusões

Em relação ao SMI e ao NZF verificaram-se os seguintes pontos:

- O *clustering* devolvido pelo programa CAM é apenas uma alternativa possível á alteração da DSM e não o fim do processo de análise de modularidade;
- Os valores de SMI e NZF não são suficientes para tirar conclusões acerca da validade da DSM criada.
- O NZF depende apenas do número de interações da matriz;
- O SMI depende da natureza da ligação entre componentes. O que altera o valor do SMI é a determinação inicial das interações entre componentes. Assim a função *clustering* não altera o valor do SMI. O que altera o valor do SMI é a determinação inicial das interações entre componentes. Desta maneira o SMI não permite avaliar a forma como os componentes podem ser agrupados em módulos distintos.

Assim o SMI e o NZF apresentam uma grande limitação já que o objetivo da modularidade é dividir um produto em módulos, de modo que as ligações entre componentes dentro de um mesmo módulo são maximizadas entre si ao mesmo tempo que ligações entre módulos distintos são minimizadas, algo que nem o SMI nem o NZF permitem avaliar.

Em relação **ao parâmetro M** é necessário destacar as seguintes observações:

As suas vantagens são a quantificação matemática do peso associado à utilização de um componente em vários produtos de uma mesma gama. Assim este índice tem em conta não só o produto por si só, mas também toda a gama deste mesmo produto.

No entanto o parâmetro “u”, que se refere a componentes standardizados, é muito limitado uma vez que apenas permite que um componente seja classificado como standard ou não-standard.

Em relação **à Convertibilidade, Escalabilidade e Reconfigurabilidade** é necessário destacar as seguintes observações:

- Não estão limitadas entre zero e um;
- São pouco flexíveis e com aplicações específicas;

- Muitos dos parâmetros não são claros, como é o caso do parâmetro Aop;
- Na equação Rc, os parâmetros Cpf, Ca e Ced referentes a perfis, áreas e arestas cortantes respetivamente estão limitadas, o que diminui a abrangência da métrica.

2.6 Análise de modularidade utilizando Matrizes DSM: Modularidade, Reconfigurabilidade e Comunalidade

Dado que as métricas existentes apresentam várias limitações, já apresentadas, desenvolveram-se métricas que permitam diminuir estas limitações, tornando os seus outputs mais fiáveis e úteis.

2.6.1 Índice de modularidade - M_D

Tendo em conta todas as limitações anteriormente verificadas o INEGI criou uma fórmula matemática que avalia as ligações dentro de módulos face às ligações entre módulos distintos (projeto SysMAP). Este parâmetro [M_D] mede a modularidade através das ligações e aglomerados gerados.

De forma simplificada a Figura 7, Figura 8, Figura 9 e Figura 10 demonstram casos extremos de produtos modulares e não modulares.

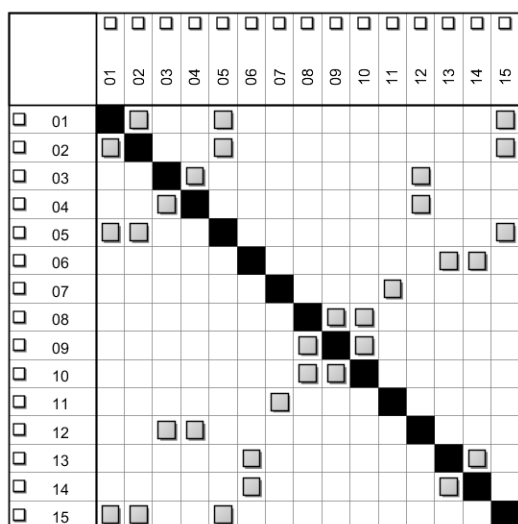


Figura 7 - DSM original [exemplo modular].

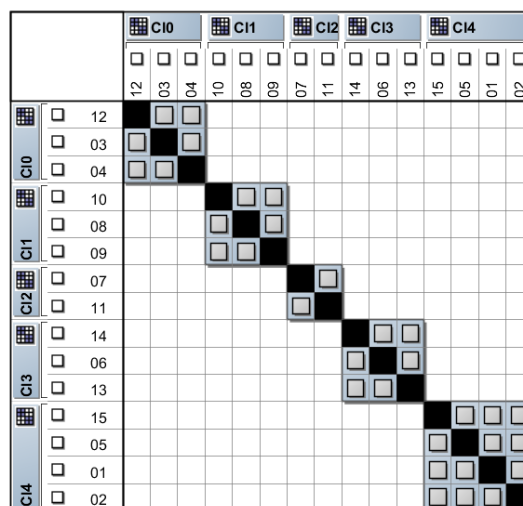


Figura 8 - DSM após algoritmo de aglomeração [exemplo modular].

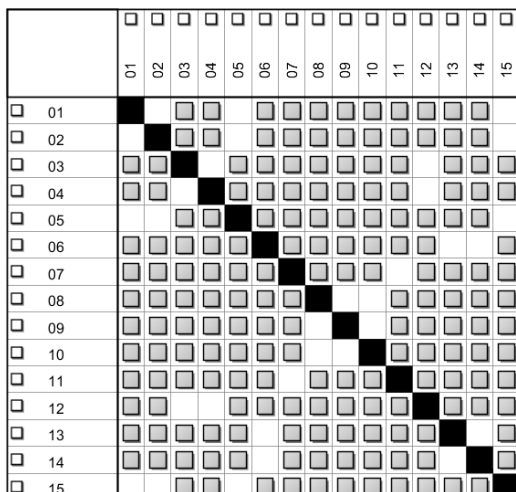


Figura 9 - DSM original [exemplo não modular]

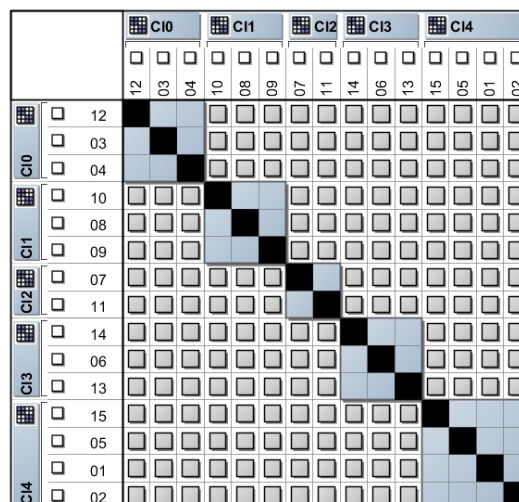


Figura 10 - DSM após algoritmo de aglomeração [exemplo não modular]

A Figura 7 apresenta uma DSM genérica e a Figura 8 apresenta esta mesma DSM, mas após aplicação do *clustering*. Na matriz aglomerada verifica-se que as ligações entre componentes de um mesmo módulo estão maximizadas [todos os módulos estão completamente preenchidos] e as ligações entre módulos distintos são inexistentes. Assim o parâmetro desenvolvido devolve o valor de 1.

Numa situação contrária extrema, se todas as ligações estivessem fora dos módulos, o grau de modularidade seria 0. Esta situação é visível na Figura 10, partindo da Figura 9. Estas DSMs das figuras Figura 8 e Figura 10 são exemplos teóricos daquilo que seria um produto perfeitamente modular [modularidade = 1] ou perfeitamente “não-modular” [modularidade = 0] respetivamente.

As fórmulas desenvolvidas pelo INEGI para cálculo do parâmetro de modularidade estão apresentadas de seguida.

$$d_i = \frac{n^{\circ} \text{ total ligações num cluster}}{(n_i - 1) * n_i} \quad (22)$$

$$D = \frac{\sum_{i=1}^c d_i}{c} \quad (23)$$

$$E = \frac{n^{\circ} \text{ total ligações exteriores aos clusters}}{(N - 1) * N - \sum_{i=1}^c ([n_i - 1] * n_i)} \quad (24)$$

$$M_D = \frac{(D - E) + 1}{2} \quad (25)$$

Nestas equações:

- n_i – Número de componentes do cluster i
- C – Número total de *clusters* de uma DSM
- N – Número total de componentes da DSM
- M_D – Parâmetro de Modularidade INEGI dps

Este novo parâmetro é claramente uma mais-valia no processo de avaliação do grau de modularidade uma vez que apenas com o SMI não seria possível determinar qual das duas soluções geradas são melhores.

2.6.2 Índice de Reconfigurabilidade

Esta métrica avalia a DSM segundo a sua facilidade em remover um determinado *cluster*/módulo e inserir outro no seu lugar.

A facilidade em substituir um módulo da DSM está diretamente associado às ligações entre um módulo e outro, ou seja baseia-se nas ligações entre módulos e não nas ligações dentro de um módulo.

$$r_i = \frac{n^{\text{o}} \text{ total ligações de um cluster a outros clusters}}{(N - n_i) * n_i} \quad (26)$$

$$R_D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^c (1 - r_i)}{c} \quad (27)$$

Nestas equações:

- n_i – Número de componentes do cluster i
- C – Número total de *clusters* de uma DSM
- N – Número total de componentes da DSM
- R_D – Parâmetro de Reconfigurabilidade desenvolvido pelo INEGI dps

Para produtos pertencentes a uma mesma gama este parâmetro torna-se uma poderosa ferramenta para se perceber e comparar relações entre produtos.

2.6.3 Índice de Comunalidade

Para a aplicação desta métrica é necessário definir a hierarquia de um produto, sendo apenas possível calcular a comunalidade a nível da família de um produto ou da gama de um produto.

$$co_i = \frac{\frac{\alpha}{\beta} + \left(\frac{\gamma - \beta}{\gamma - \alpha}\right)}{2} \quad (28)$$

$$Co_D = \frac{\sum_{i=1}^N co_i}{N} \quad (29)$$

Olhando para a comunalidade de uma gama [composta por vários modelos], tem-se três variáveis principais:

- α – Número de opções por produto.

Este parâmetro responde à questão: Num determinado produto quantas peças tenho disponíveis que desempenham a mesma função mas estão restritas a um dos modelos.

- β – Número de peças diferentes para uma dada função.

Este parâmetro responde à questão: Num determinado produto quantas peças há disponíveis que desempenham a mesma função e que não estão restritas a um dos modelos. No fundo são as opções disponíveis para uma determinada função.

- γ – Número de produtos da gama.
- N – Número total de componentes do produto [correspondente ao número total de componentes da DSM do mesmo produto].

3. NOVA METODOLOGIA LEAN DESIGN-FOR-X

As empresas atuais sofrem enormes pressões devido a um mercado altamente competitivo e globalizado. O mercado exige simultaneamente baixo custo e elevada qualidade, para além da incorporação de cada vez mais tecnologia e inovação nos equipamentos. As empresas num esforço para responder às solicitações impostas pelo mercado, muitas vezes descaram fatores importantes e que escondem ineficiências e custos que têm obrigatoriamente que ser introduzidos nos custos dos equipamentos, diminuindo a competitividade. Estes custos podem ter várias fontes, como por exemplo falta de otimização das estruturas dos equipamentos (e consequentes maiores custos ambientais e de material), falta de modularidade, o que implica maior número de referências, dificuldade em realizar um custeio completo, que tenha em conta todos os gastos necessários na empresa para a produção do equipamento. Para além do mais, a análise tradicional não efetua um estudo crítico de cada etapa de desenvolvimento e produção do equipamento, uma vez que não caracteriza cada uma das etapas.

As metodologias Design-for-X procuram melhorar de forma simultânea os fatores internos das empresas, como a produtividade, os gastos com energia e matérias-primas, etc, com o objetivo de melhorar a eficiência dos sistemas produtivos através da medição da eficiência global de recursos de um sistema de produção de modo simples e sistemático. Os métodos de DfX oferecem o máximo benefício quando são aplicados numa fase inicial do desenvolvimento, aonde as mudanças são ainda relativamente fáceis de efetuar. Se o DfX for atrasado até que exista projeto detalhado, vai existir pouco dinheiro ou pouco tempo para efetuar alterações profundas. Este aspeto é irónico na medida em que algumas variáveis de DfX só ficam definidas em fases finais do projeto. Um método para lidar com este aspeto é a utilização de sistemas de pontuação que requerem pouca atenção ao detalhe. Estes sistemas de pontuação, embora vantajosos em certos aspetos, podem criar os seus próprios problemas. Uma confiança demasiado elevada nestes pode conduzir a decisões incorretas de projeto, uma vez que pode levar a que a equipa de projeto assuma que a experiência não é um fator crítico para obter bons resultados [Whitney, Daniel E.(2004)].

A análise com DfX é capaz de medir a eficácia global do design integrado de um novo produto, com uma perspetiva de análise simples, através da decomposição dos sistemas complexos em módulos, e de modo sistemático, permitindo não só medir a eficácia global do projeto de modo multi-dimensional (intensidade estrutural, EcoDesign, Manufacturing, "X") mas também com uma perspetiva do grau de eficiência (ou ineficiência) com alcançar dos objetivos/requisitos para o novo produto/equipamento.

A metodologia criada reveste-se assim de um carácter disruptivo de análise relativamente ao estado-da-arte, com a materialização de "cartões de análise dimensional de produto", cada um para cada domínio ("X") e capaz de os interligar de

modo a obter um indicador global do novo produto (design). Outro aspeto muito importante diz respeito ao facto de a nova metodologia estar assente em princípios lean, pelo que se enquadrará nas ferramentas de “lean product development”, aliado às abordagens DfX.

A inovadora metodologia DfX desenvolvida neste projeto utiliza alguns princípios definidos pela metodologia **Multi-Layer Stream Mapping – MSM**, desenvolvida pelo INEGI, e aplica-os ao design integrado de produtos ao invés de processos produtivos e apenas com foco na eficiência dos sistemas. Para este fim substitui as etapas do processo por módulos fundamentais do equipamento em análise e as variáveis como tempo e material por KPIs de aspetos fundamentais para o equipamento, como KPIs de modularidade, e ecodesign, de custos, entre outros.

Assim, para perceber a metodologia DfX desenvolvida ao longo do projeto é necessário apresentar a metodologia MSM (*Multi-Layer Stream Mapping*).

3.1 Metodologia MSM – Multi-Layer Stream Mapping

A metodologia do MSM baseia-se num sistema que analisa os materiais e recursos necessários ao processo, detalhados nas suas etapas. Como resultado da análise de cada etapa, para além de uma melhor caracterização dos produtos e sub-produtos verifica-se uma definição detalhada dos resíduos e emissões, o que permite identificar e perceber ineficiências.

Os objetivos principais da metodologia MSM são:

- **Foco na maximização do valor acrescentado e na redução de desperdícios:**
Relacionar diretamente a EFICIÊNCIA (%) e a REDUÇÃO DE DESPERDÍCIO.
- **Simplificação da abordagem e análise dos resultados:**
Passível de ser utilizado desde a gestão de topo até ao operacional.
- **Visão integrada e facilitada da informação (integração de dados):**
Dashboards de leitura e interpretação intuitivas.
- **Rápida identificação de pontos críticos ou limitantes do sistema:**
Triagem fácil de etapas / variáveis menos eficientes e seu impacto na eficiência global.
- **Relacionar a eficiência com os custos associados (que geram valor ou desperdício):**
Avaliação simplificada e desagregada dos custos por etapa / variável de recurso.
- **Potenciar a capacidade de desenhar cenários de melhorias:**
Gerar rapidamente cenários alternativos, quantificar ganhos, e análises simples de *payback*.

- **Sustentabilidade da implementação de melhorias e resultados:**
Precursão intrínseca para eficiência e melhoria contínua (“*lean thinking*”).
- **Capacidade para simplificar léxico e unidades de medida:**
Adoção de linguagem visual, cores comuns, unidades simples (% ou €).
- **Possibilidade de três tipos análises: *ad inicio, in loco, in continuo*:**
Aplicação ao desenho inicial sistemas produtivos; ou a existentes; ou medição em contínuo.
- **Capacidade / potencial para gerir volumes elevados de dados produção:**
Capacidade para aproveitar volumes de dados e gerar informação para suporte à decisão.

A metodologia MSM é composta por quatros pilares base que lhe conferem as capacidades necessárias para os objetivos propostos.



Figura 11 – A análise DfX, utiliza como base a metodologia MSM, definida por quatro pilares principais.

- **1º Pilar: Mapeamento Cadeia de Valor (VSM) com aplicação de Princípios *Lean*:**

Aplicação das bases de uma Ferramenta *Lean*: *Value Stream Mapping* (VSM). O objetivo desta ferramenta é definir num processo as etapas que agregam valor e as que não agregam valor, permitindo realizar a análise da cadeia de valor, identificando as componentes / ações que agregam valor, e as que conduzem a desperdícios.

VSM

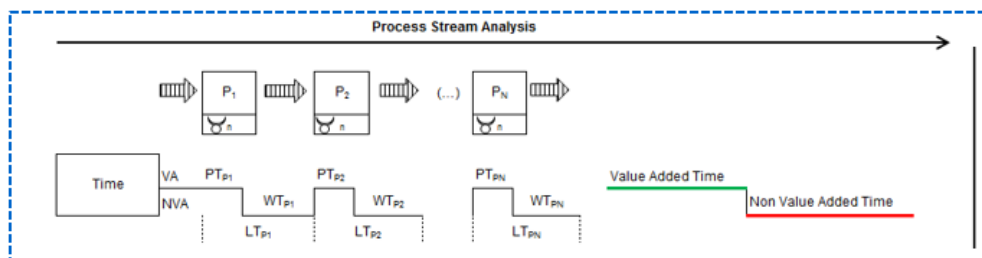


Figura 12 – Análise VSM, com identificação dos tempos que agregam valor e os que não agregam valor em cada etapa.

- **2º Pilar: Avaliar variáveis (KPI) através de rácios de eficiência:**

Este pilar pretende identificar todas as variáveis que influenciam as etapas da cadeia de valor e criar *Key Performance Indicators* (KPI) para as variáveis sob a forma de rácios. Os valores dos rácios sempre dentro do intervalo [0-100%] e sempre utilizando KPI com o objetivo de serem maximizados.

$$\Phi = \frac{\text{Parte "Agrega Valor"}}{\text{Parte "Agrega Valor" + Parte "Desperdício"}}$$

Figura 13 – KPI base, que evidencia a parte que cria valor.

Os valores gerados com a metodologia são adimensionais já que são obtidos pelo quociente entre a parte útil ou aproveitada da variável, sobre o total ou máximo em análise numa dada etapa de processo para a mesma variável.

O VSM atrás indicado fornece uma metodologia para avaliar os tempos que agregam valor e os que não agregam valor. O MSM parte de um princípio semelhante mas expande a sua abrangência para todo um novo conjunto de parâmetros que permite uma análise mais completa de cada etapa do processo em análise, incluindo assim a avaliação de parâmetros como energia ou material. Aplicando corretamente KPI a cada uma das variáveis analisadas, de acordo com os princípios já definidos, é possível transformar os valores recolhidos em indicadores de eficiência, que permitem analisar com maior facilidade as ineficiências de cada processo/etapa (Figura 14).

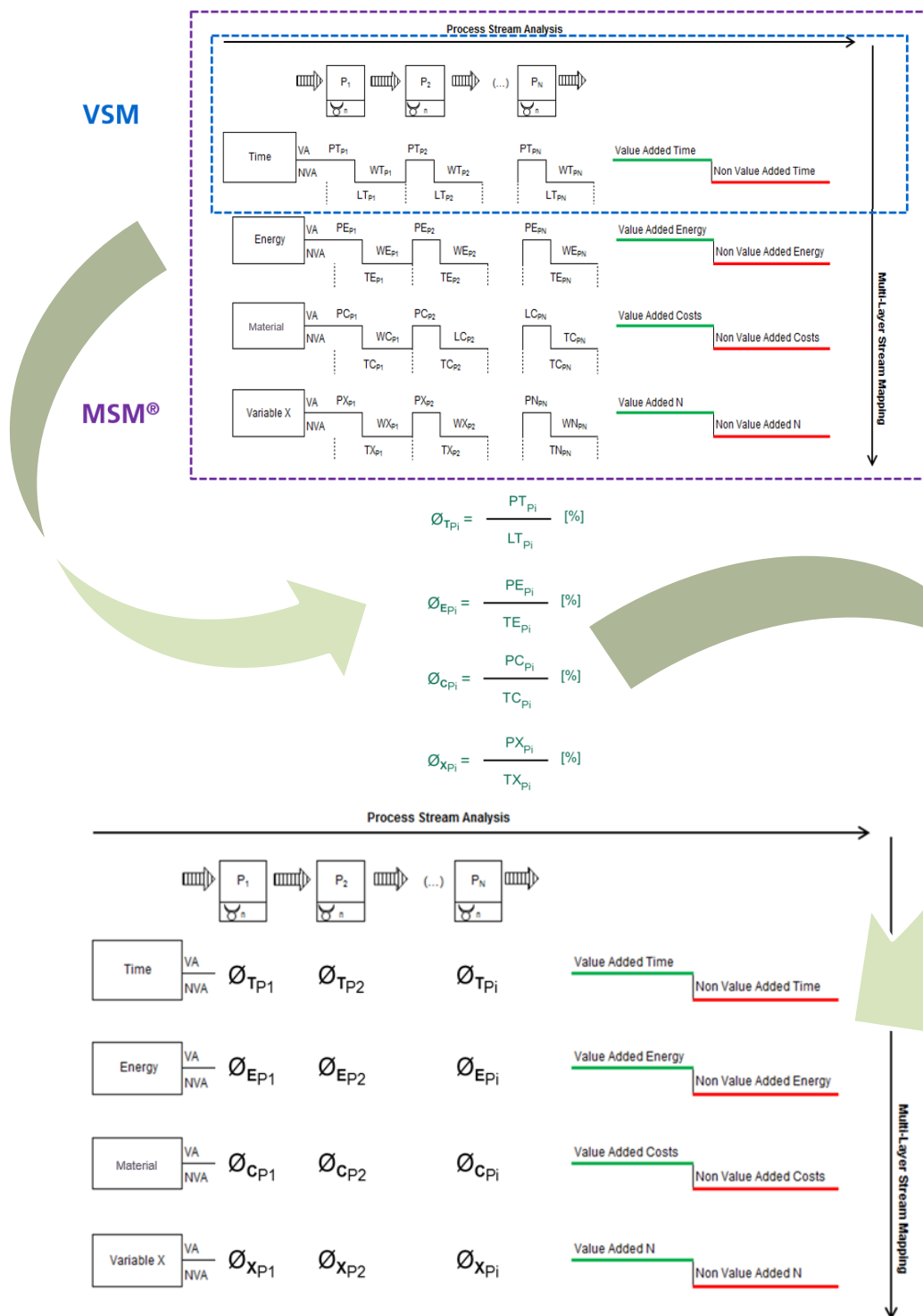


Figura 14 – A utilização de KPI permite uma análise mais fácil de cada processo/etapa. O processo inicia-se com a aplicação do VSM e do MSM para recolha de informação sobre as variáveis definidas dos passos que agregam ou não valor em cada etapa/processo. Esta caracterização permite depois definir KPIs que permitem uma mais fácil análise dos dados recolhidos.

- **3º Pilar: Integração de práticas de Gestão Visual:**

A gestão visual pretende criar mapas que facilitem o estudo e análise dos KPI calculados. O sistema proposto pretende relacionar o nível de eficiência com 4 cores tipo na análise de sistemas (vermelho, laranja, amarelo, verde) na direção do aumento da eficiência [0 a 100%].

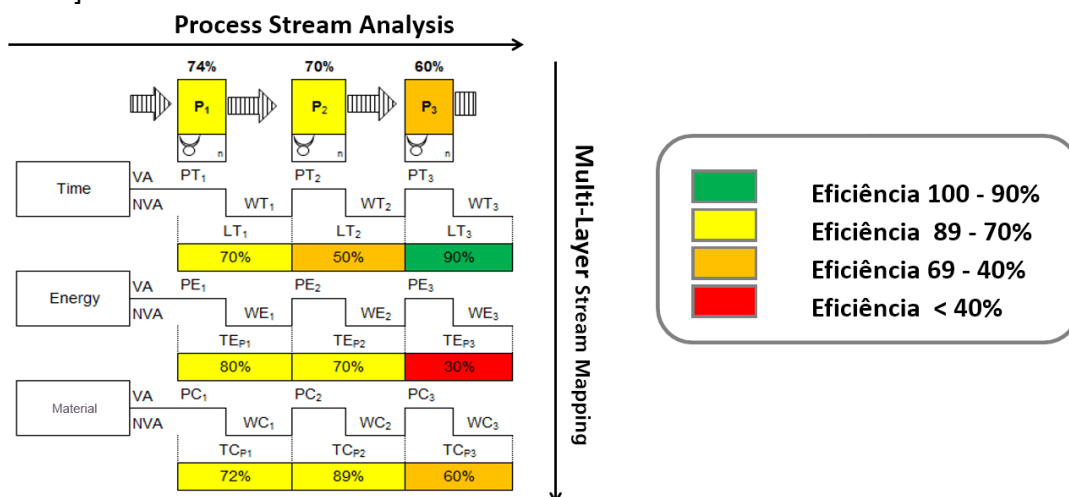


Figura 15 – Mapa de eficiências que apresenta os valores dos KPI definidos para cada variável com princípios de gestão visual para mais fácil interpretação.

- **4º Pilar: Calcular valores agregados de eficiência processos / sistema (análise bottom-up):**

É possível agrupar os valores agregados de eficiência de cada etapa de um processo, por forma a verificar a eficiência de cada variável ao longo das várias etapas do processo e de forma mais geral a eficiência global de cada variável e até de todo o processo.

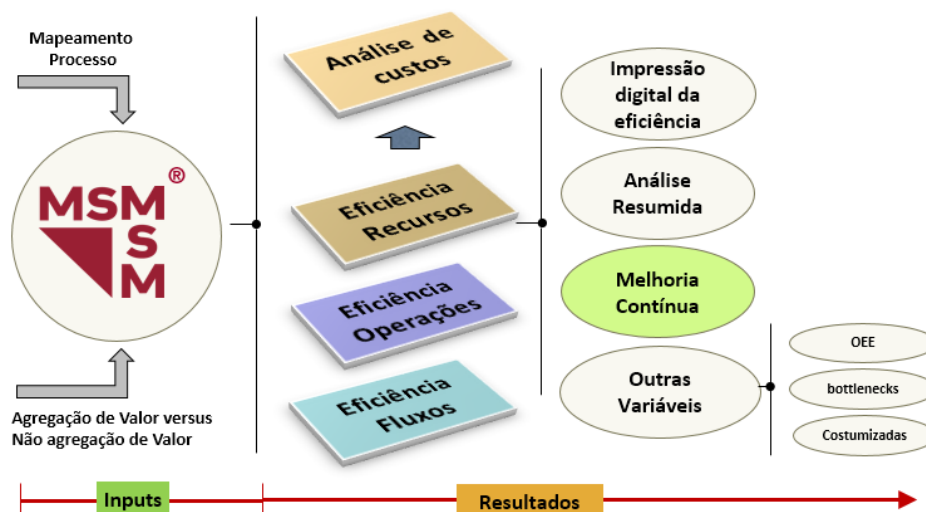


Figura 16 – Resultados da metodologia MSM.

A metodologia MSM tem a possibilidade de retornar vários resultados, e a interpretação destes pode ser utilizada para aplicar melhorias em vários aspetos. O cartão de eficiência MSM facilita grandemente essa análise.

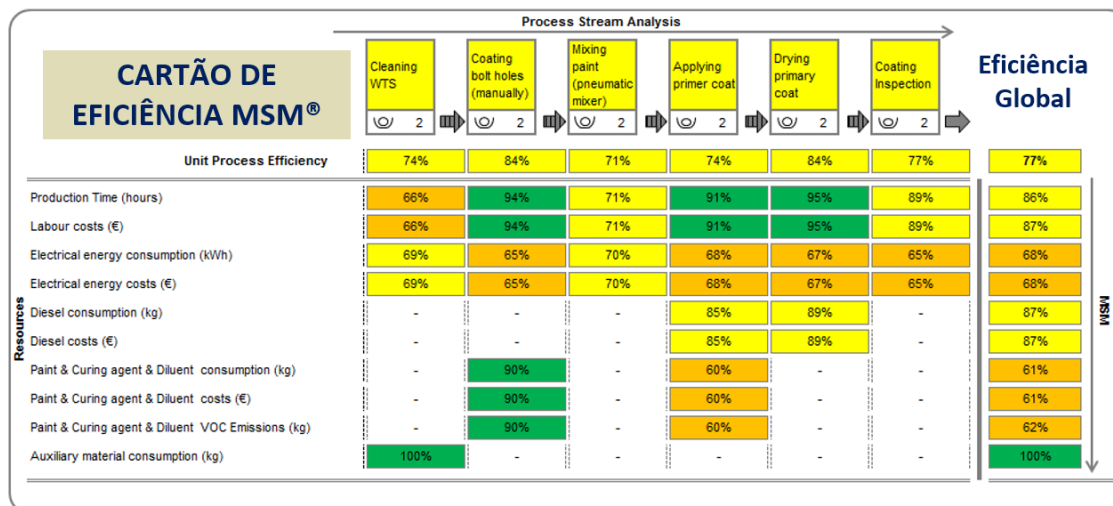


Figura 17 – Exemplo de “cartão de eficiência MSM”.

3.2 Especificação da Metodologia INEGI “Lean Design-for-eXcellence”

Tomando como base a conceptual do MSM, a nova metodologia Lean Design-for-eXcellence (ou Lean DfX) permite analisar o processo de desenvolvimento integrado de equipamentos, analisando individualmente os módulos mais importantes e simultaneamente definindo uma vista global integrado de todo o equipamento e que traduz a eficácia de um grande conjunto de KPIs representativos de critérios diferentes. Permite também a realização de um processo iterativo com o objetivo de melhorar uma métrica específica e verificar o impacto dessa alteração nas outras variáveis.

Os principais objetivos e características da metodologia Lean DfX são:

- **Adotar os princípios essenciais das abordagens *lean***

Através da análise focada no valor e redução do desperdício, com a avaliação não só da eficiência de um sistema complexo (como é o caso de um produto do tipo bem de equipamento ou máquina-ferramenta) mas também na eficácia associada ao cumprimento integral dos requisitos e funções pretendidas para o novo produto.

- **Adotar as bases do Design Modular**

A utilização dos princípios da decomposição funcional de sistemas complexos com base no Design Modular (ou com base na Modularidade), tida como essencial para a estruturação adequada de um produto em desenvolvimento, permite desde logo

vantagens na flexibilidade e standardização do equipamento e a rápida reavaliação do equipamento para estudo de melhorias aplicadas em determinados módulos.

- **Análise descomplicada e sistemática**

Utilização de metodologias e métricas bem definidas e robustas para permitir uma reprodutibilidade de resultados transversal a todos os tipos de produtos, equipamentos e projetos. A criação de perspectivas de análise mais simples, mas capazes de reproduzir a complexidade de produtos com muitos componentes e funções, permite tornar a metodologia de mais fácil disseminação e utilização corrente em equipas de engenharia de empresas (grandes ou PME).

- **Forte componente de gestão visual:**

Dashboards de leitura e interpretação intuitivas, com a criação de “Cartões DfX” para cada um dos domínios de *design* de um produto (domínio estrutural, sustentabilidade, fabrico, manutenção, custo, modularidade, etc.).

- **Adoção de métricas próprias (KPI DfX):**

A avaliação do projeto integrado permite abordar várias vertentes de *design* como o ecodesign, custo, modularidade, etc. onde cada variável em análise tem como resultado um dado KPI, estando esse definidos numa metodologia de cálculo bem fundamentada e que permite maximizar os outputs da metodologia DfX.

- **Foco na melhoria contínua**

Os valores resultantes dos KPIs permitem mais facilmente definir planos de ação nas equipas de desenvolvimento e traçar melhorias no projeto (*design*), pois permite a aferição simultânea da eficácia e eficiência (ou a sua ausência), o que por sua vez facilita e estimula a melhoria contínua (endogeneização de cultura “*lean thinking*”). Na metodologia tanto se penaliza a eficácia pelo não alcançar das especificações traçadas (subdimensionamento), como se penaliza o sobredimensionamento quando as características do produto são superiores ao especificado a partir dos requisitos.

- **Benchmarking sistemático de produtos / conceito**

Permite a comparação direta de diferentes produtos e conceitos que partilhem a mesma base para os indicadores de referência do produto (KPI). Isto permite estudar gamas de equipamentos e cruzar e comparar eficácias/eficiências e melhorias.

Para atingir estes objetivos a metodologia DfX deve tocar vários critérios de desenvolvimento / dimensionamento de equipamentos. O “X” corresponde a um domínio ou dimensão de análise do produto, e contém um conjunto de características do produto relevantes para o cumprimento de necessidades/requisitos que são traduzidos em termos funcionais com as especificações produto. Assim, para cada “X” pode corresponder uma área de conhecimento, um conjunto de procedimentos, análises métricas e/ou recomendações de projeto que têm como objetivo melhorar o produto no âmbito da variável “X”, traduzido em indicadores quantitativos. Algumas das áreas de *Design* que foram mais estudadas no âmbito do projeto consistiram no Design

for Optimization; Design for Modularity; Design for LCA; Design for Design for Maintenance.

Cada um destes critérios deve possuir KPIs desenvolvidos propositadamente para a análise DfX do domínio X em análise, adotando a metodologia de cálculo aqui definida.

Como resultado da aplicação da metodologia Lean DfX é criado um apresentado um “cartão” ou *scorecard* original que fornece uma perspetiva conjunta sobre a eficácia e eficiência parcelar por Domínio “X” e por par de KPI de *design* / Módulo do produto.

3.3 Descrição da nova metodologia INEGI “Lean Design-for-eXcellence”

A análise de eficácia e eficiência do *design* de um dado produto, equipamento ou sistema complexo deve ter como ponto de partida a decomposição do mesmo em partes ou domínios funcionais. Para tal, a abordagem de modularização de sistemas corresponde a um pilar fundamental para a decomposição da complexidade e, assim, poder-se avaliar a eficácia funcional e a correspondente eficiência de *design* com uma perspetiva mais facilitada pela desagregação dos módulos funcionais.

Assim, na metodologia Lean DfX, o **primeiro pilar** ou passo consiste precisamente em utilizar **os princípios de modularidade para decompor o produto** em sistemas, módulos, sub-módulos, etc (Figura 18).

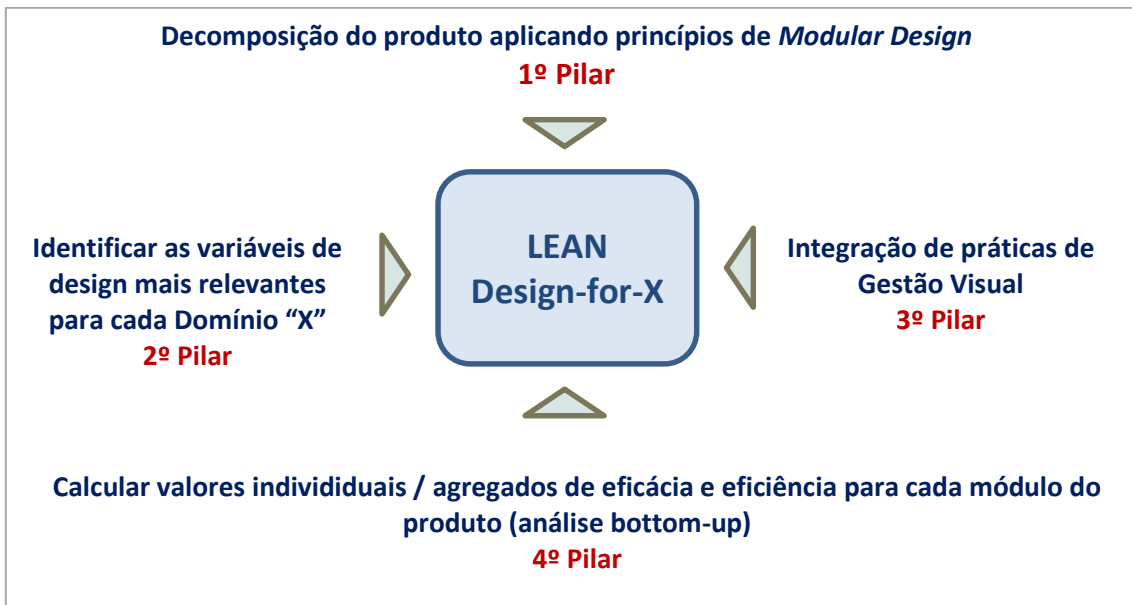


Figura 18 – Pilares da metodologia Lean DfX.

O **segundo pilar da metodologia** consiste em definir os domínios de *design* exigidos para o produto ou equipamento, dentro das diversas tipologias e temáticas que podem ser estudadas e avaliadas no âmbito do desenvolvimento (design for structural integrity, design for manufacturing, design for Ecodesign, design for maintenance, etc.).

Para cada um dos domínios “X”, devem ser identificadas as variáveis ou parâmetros de análise associados ao domínio, por exemplo, no caso da integridade estrutural, devem ser avaliadas variáveis de *design* (ou dimensionamento) como a tensão admissível, tensão limite de fadiga, deformações máximas admissíveis, etc. Ou seja, listar as variáveis de *design* do domínio em causa tendo por base as especificações completas a cumprir pelo produto, provenientes ou dos requisitos funcionais, normativos e diretivas aplicáveis, etc.

Para cada uma variável de *design* deve **ser estabelecido um conjunto de dados que permitem parametrizar a avaliação Lean DfX**, que estão orientados para a obtenção de índices elevados de qualidade no produto, e consequentemente do grau de satisfação do cliente/consumidor, e que são articulados quer em termos de **eficácia** (“effectiveness”, **cumprimento dos objetivos definidos para cada variável ou métrica, sem ter em conta o esforço associado para esse resultado**), quer em termos de **eficiência** (“efficiency”, **quantificação do esforço ou um qualquer tipo de recurso alocado para o alcançar de um resultado**).

Na parametrização dos dados são necessários:

Avaliação da Eficácia

- Definição do valor de referência absoluta ou referência relativa da variável para as diferentes alternativas de *design* do módulo em avaliação (“melhor alternativa em avaliação comparativa”), devendo ser dada preferência sempre à imposição de referência absoluta como uma meta/objetivo definido pelo gestor de produto;
- Definição de um valor mínimo a atingir para a variável caso se verifique mais adequado e suficiente para a aferição da eficácia, sobretudo nos casos em que a métrica associada à variável é do tipo qualitativo medido numa escala de avaliação por exemplo de 1 a 10. Este valor mínimo consiste na prática de um “threshold” para garantir o mínimo de cumprimento da variável / módulo em questão.
- Definir se o objetivo macro para a medição da eficácia associada aos pares variável / módulo consiste em tentar maximizar ou minimizar o valor corrente do conceito ou produto em análise (ex. minimizar a massa de material / peso, consumo de energia, maximizar tempo de vida de um componente, etc.)
- A avaliação da eficácia é puramente binária, isto é, ou se alcança o valor objetivo (seja referência absoluta ou mínima), alcançando o valor de 100%, ou caso não se alcance o valor, aloca-se o resultado 0%.

Avaliação da eficiência

Para a avaliação da eficiência definiu-se um modo muito robusto de **medir de forma direta ou indireta o esforço, consumo de um dado recurso (material, energia, etc.) ou**

simplesmente o desvio “positivo” (por excesso) ou “negativo” (por defeito) relativo ao valor estabelecido para a referência de aferição da eficácia (equação seguinte).

$$\eta = \frac{\min(\text{variável}_i, \text{módulo}_j)}{\max(\text{variável}_i, \text{módulo}_j)} \quad (30)$$

Para a avaliação da eficiência utiliza-se sempre o valor de referência que define o valor considerado como “ótimo”, ou seja, que garante a excelência de o design ser simultaneamente eficaz (100%) e eficiente no alcançar desse resultado (100), não falhando nem por defeito (subdimensionamento), ficar aquém do objetivo, ou por excesso (sobredimensionamento), superando o valor desejado. Assim, seguindo os princípios do *lean thinking* o foco deve ser colocado no valor, definido e a cumprir de acordo com os requisitos estabelecidos pelo cliente, mas reduzindo o mais possível os desperdícios, nomeadamente o que representa condições de sobredimensionamento e que tipicamente esconde custos mais elevados face ao previsto e ao acordado (a receber) do cliente.

Neste contexto, a nova metodologia Lean DfX consegue alcançar o objetivo de medir a interação entre a eficácia “*effectiveness*” e eficiência “*efficiency*” com o surgir de um novo termo a que a equipa INEGI denominou de “*efficientiveness*” representando um valor agregado entre 0-100% para o design.

O terceiro pilar da metodologia é em tudo análogo e partilhado com o MSM, adotando-se práticas de gestão visual de modo a criar mapas ou “cartões DfX” (*scorecards*) que facilitem a análise dos valores calculados quer para a eficácia quer para a eficiência. O sistema proposto pretende relacionar o nível de eficácia/eficiência/*efficientiveness*, com 4 cores tipo na análise de sistemas (vermelho, laranja, amarelo, verde) na direção do aumento [entre 0 a 100%].

O quarto pilar consiste em calcular valores agregados de eficácia e eficiência para cada de modo hierárquico e por integração quer em termos da decomposição de produto (... > sub-módulos > módulos > sistemas > produto), recorrendo a uma abordagem “*bottom-up*”, e também proceder ao cálculo dos valores agregados para os diferentes tipos de dimensão “X” em estudo, obtendo-se no final um valor agregado (KPI) do produto (ou conceito alternativo em análise) integrado para as diferentes dimensões “X”.

A abordagem para a agregação pode ser adaptada à realidade específica do produto / empresa, usando diferentes operadores matemáticos, porém, na metodologia base aqui descrita, recomenda-se numa primeira análise a aplicação de médias aritméticas simples.

No caso do cálculo dos valores agregados de eficácia, o cálculo é obtido pela quantificação do número de pares variável/módulo que satisfazem a condição de inequação em avaliação, sobre o número total de pares em avaliação.

Se a agregação for realizada por variável obtém-se o resultado médio da eficácia (efc) e eficiência (eff) pelos módulos em análise no “cartão DfX” em estudo, e se agregação for

realizada por módulo, obtêm-se o valor da eficácia e eficiência agregadas para o conjunto de variáveis em análise para a dimensão “X” em causa.

3.4 Descrição de variáveis e métricas para os vários critérios de design estudados

Os critérios de *design* (dimensionamento) considerados essenciais para a análise dos equipamentos da ADIRA MFS foram definidos com base naquilo que se considera crítico para que um equipamento possa vingar no mercado atual. Cada critério de desenvolvimento definido faz uso de, pelo menos, uma variável e respetiva métrica (KPI). O modo de cálculo de cada KPI é estruturado para se adaptar à tipologia de equipamentos desenvolvidos pela ADIRA MFS.

3.4.1 Design for Manufacturing / Cost

O projeto para fabrico / custo é um aspeto essencial na competitividade de um produto. Engloba princípios como a standardização, a complexidade dos processos de fabrico (como soldadura ou maquinagem), da correlação processo de fabrico/passos de fabrico/custo, entre outros. Uma correta análise de fabrico deve resultar em custos mais baixos de produção sem sacrificar a qualidade do produto.

Para este critério descreve-se uma metodologia de cálculo inovadora baseado numa metodologia desenvolvida pelo INEGI e designada por “**Abordagem 0-3D**”.

A abordagem 0-3D

A abordagem 0-3D permite categorizar os diferentes tipos de peças e respetivos processos de fabrico (Figura 19).

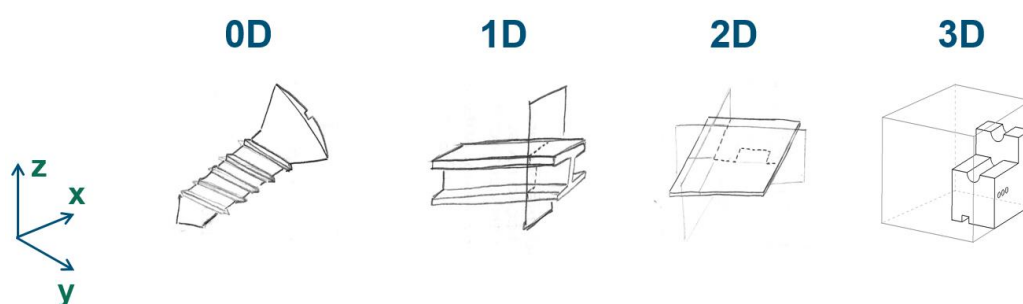


Figura 19 – Categorização de tipos de peças e respetivos processos de fabrico.

Esta abordagem permite categorizar tipologias standardizadas de peças em função dos graus de liberdade utilizados para trabalhar a matéria-prima base do seu fabrico (adição ou subtração), correlacionar o tipo de peça desenhada com os processos de fabrico (pelo projetista) e ainda correlacionar de forma simplificada o processo de fabrico com o custo de produção.

TIPO 3D:

- A matéria-prima base para criar o componente é trabalhada e modificada nas 3 dimensões (X,Y,Z);
- Processos típicos de processamento no Tipo 3D: Fundição, Maquinagem, Electro-erosão, Fabrico Aditivo, etc;
- O fabrico de componentes associados ao Tipo 3D são normalmente de custo elevado e na maioria dos casos relativos a séries pequenas de produção.

Subtipos 3.X

- Por tipo ou nº de operações e complexidade;
- Por tipo de tecnologias fabrico.

TIPO 2D:

- A matéria-prima base para criar o componente é trabalhada (modificada) essencialmente em 2 dimensões (X,Y) ou, numa conformação tridimensional, mantém-se constante a dimensão Z (espessura);
- Processos típicos de processamento no Tipo 2D: Puncionamento, Corte em prensa, Corte jato de água, Corte Laser, Estampagem, Quinagem, etc;
- O fabrico de componentes associados ao Tipo 2D são normalmente de menor custo relativamente aos processos Tipo 3D e usados em médias ou grandes séries.

Subtipos 2.X

- Por tipo ou nº de operações;
- Por tipo de tecnologias fabrico.

TIPO 1D:

- A matéria-prima base para criar o componente é trabalhada (modificada) essencialmente apenas numa direção (X) ou, em caso de conformação, há duas direções base que se mantêm constantes (Y,Z);
- Processos típicos de processamento no Tipo 1D: Corte de perfis, Dobragem de perfis, Dobragem de tubos, etc;
- O fabrico de componentes associados ao Tipo 1D é normalmente de custo mais reduzido quando comparados com os Tipo 2 ou Tipo 3.

Subtipos 1.X

- Por tipo ou nº de operações;
- Por tipo de tecnologias fabrico.

TIPO 0D:

- Nos componentes de Tipo 0D todas as direções são prescritas (não são modificadas) pelo que estes componentes são considerados como “Standardizados” ou Normalizados;
- Mesmo no caso dos componentes Tipo 0D, deve ser procurado reduzir o número de variantes e referências de compra, de modo a obterem-se ganhos na redução de custos gestão de referências, compras, etc.

Subtipos 0.X

- Por tipo de função do normalizado (fixação, guiamento, suporte, acionamento, etc.).

A abordagem 0-3D é aplicada da forma que se apresenta de seguida:

- Criar definição das sub-tipologias na empresa;
- Instruir os projetistas sobre a catalogação de peças nas tipologias 0-3D (formação em processos de fabrico);
- Inserir um campo extra nas BOM (*Bill of Materials*) para os projetistas procederem à catalogação das peças;
- Avaliar com estatística simples a dispersão das peças pelas tipologias (radares, histogramas);
- Correlacionar as tipologias das peças do equipamento com os custos de fabrico associados;
- Estabelecer KPI e metas para cada uma tipologia para um novo projeto equipamento;
- Avaliar os ganhos e disseminar a metodologia noutros projetos.

3.4.2 Design for LCA

A análise LCA dos equipamentos industriais é bastante complexa e pode abordar diferentes aspetos do ciclo de vida, assim sendo, foi estudado à parte da integração da metodologia Lean DfX (anexo da tarefa 4.2), o estudo aprofundado relativo aos dois produtos em estudo.

As variáveis de *design* e respetivas métricas considerados como fundamentais a incorporar no cartão “Design-for-LCA” foram:

- Impacte Ambiental (Pt) [MP & Energia]
- Impacte nos recursos (Pt) minerais e combustíveis fósseis
- Energia elétrica durante o uso [kWh]
- Massa [kg]

3.4.3 Design for Optimization

O aspeto de *design* associado à redução de material (e consequentemente peso) foi um dos aspetos fundamentais do projeto TopMat com vista ao aligeirar das estruturas das máquinas-ferramentas sem prejudicar o seu desempenho funcional ou características de robustez e durabilidade.

Apresentam-se aqui a listagem das variáveis fundamentais estudadas as quais estão intrinsecamente ligadas a critérios de dimensionamento estrutural.

- Peso [kg]
- Resistência Mecânica - σ_{adm}
- Resistência Fadiga - σ_f
- Erro máximo de quinagem (no caso do produto quinadoras)

3.4.4 Design for Modularity

Este aspeto tem como objetivo melhorar a modularidade do equipamento, levando à introdução dos princípios de modularidade e standardização desde uma fase muito inicial do desenvolvimento. As métricas associadas a este tipo de projeto foram apresentadas anteriormente. Assim os KPIs que se consideram mais adequados e relevantes para o tipo de equipamentos em causa são os seguintes:

- M_D – Parâmetro de Modularidade desenvolvido pelo INEGI;
- SMI - *Singular Value Modularity Index*;
- NZF - *Non-Zero Fraction*.

A nova metodologia Lean DfX incorpora na sua base, e pilares (1º), a abordagem de modular design, pelo que o aspeto Design for Modularity fica imediatamente abarcado na metodologia.

Tendo em conta a complexidade da análise, apresenta-se em anexo os resultados obtidos para os dois tipos de produto estudados.

3.4.5 Design for Maintenance

Após análise e estudo da natureza das variáveis ou parâmetros que devem ser tidos em conta para o *Design for Maintenance*, optou-se por definir as métricas de modo mais qualitativo, ainda que quantificados numa escala de 0 a 10, sendo zero a pior situação e dez a melhor. Após alguma pesquisa bibliográfica, concluiu-se que seria interessante agregar no mesmo parâmetro diversos pontos que causassem consequências de origem semelhantes. Neste caso em particular interessa medir de que forma um componente

ou grupo de peças afeta a manutenção da máquina aquando do seu projeto. As implicações da alteração de um conceito ou projeto com vista a futuras manutenções, poderão minimizar tempos e custos que seriam, em condições não controladas, sustentadas pela própria empresa.

Para além dos custos associados à manutenção, existe ainda o custo do tempo que a máquina não está a produzir. Portanto, a otimização duma peça ou o projeto de uma máquina tendo em conta as manutenções resume-se a diminuir o tempo da reparação.

No âmbito de avaliar o projeto de componentes sendo tido em conta a sua inclinação em cenários de manutenções, foram criado os seguintes parâmetros de avaliação:

- **Acessibilidade de módulos/componentes:** O mau atravancamento de componentes é um dos motivos principais de desperdício de tempo, isto é, perde-se mais tempo a desmontar diversos componentes para “abrir caminho”, do que a reparação da peça danificada. Este problema é consequência de um planeamento defeituoso ou descuidado na fase de projeto, onde a sua deteção ocorre apenas numa fase tardia de montagem ou até mesmo já numa fase de reparação.
- **Uso de peças e ferramentas standard:** Por vezes a complexidade de alguns componentes torna extremamente difícil a reparação ou substituição dos mesmos. Neste campo pretende avaliar-se a possibilidade de simplificação de peças tendo em vista reparações ou substituições por outros fabricantes ou pelos próprios reparadores em locais onde a aquisição ou fabrico é limitado.
- **Movimentações e Instalação:** Complementando o ponto anterior, o parâmetro da instalação tem como objetivo perceber o grau de dificuldade de instalação e troca de componentes. Peças de grandes dimensões tornam complicado a sua manobrabilidade, o que implica transportes e carregadores específicos aumentando o tempo de manobra.
- **Tempo de vida esperado:** Este parâmetro visa a avaliar o projeto dos componentes dum ponto de vista mais técnico. Dentro do dimensionamento de peças, a possibilidade de incorporar critérios mais exigentes de fratura e fadiga ou se a seleção de equipamento que garanta maior número de horas em serviço foi tida em conta.

4. ALGUNS RESULTADOS DOS CASOS DE ESTUDO

4.1 Quinadora HD-Greenbender

A metodologia Lean-DfX foi aplicada ao caso de estudo HD-Greenbender para a comparação dos diferentes conceitos que foram criados e estudados em profundidade. Apresenta-se abaixo os resultados obtidos nomeadamente para a dimensão “Design for Structural Optimization” (Figura 20).

Lean Design-for-eXcellence		Decomposição Modular do Produto			Efficientiveness	
Módulos Produto → ↓ Variáveis Design		Montante	Avental superior	Avental inferior	89%	
Design for Structural Optimization	Eficácia	100%	100%	100%	efc 100,0%	
	Eficiência	93%	68%	72%	eff 77,8%	
EFICÁCIA	efc	Peso	100%	100%	100%	100%
	efc	Resistência Mecânica - σ_{adm}	100%	100%	100%	100%
	efc	Resistência Fadiga - σ_f	100%	100%	100%	100%
	efc	Erro Máx. Quinagem	-	100%	100%	100%
EFICIÊNCIA	eff	Peso	100%	88%	98%	96%
	eff	Resistência Mecânica - σ_{adm}	79%	58%	61%	66%
	eff	Resistência Fadiga - σ_f	100%	73%	77%	83%
	eff	Erro Máx. Quinagem	-	54%	53%	54%

100 - 80%30 - 49%50 - 79%< 29%

Figura 20 – Resultados da aplicação da metodologia Lean DfX, para o cartão “Design for Structural Optimization”, do conceito que materializou a solução final da nova Quinadora HD.

Na Figura 21 e Figura 22 apresentam-se os resultados obtidos para os conceitos A e B alternativos estudados para a quinadora, onde se observam as diferenças de resultados quer de eficácia, quer de eficiência de dimensionamento (os valores apresentados para as escalas de cores são os mesmos nos 3 cartões).

Lean Design-for-eXcellence		Decomposição Modular do Produto			Efficientiveness
Módulos Produto → ↓ Variáveis Design		Montante	Avental superior	Avental inferior	83%
Design for Structural Optimization	Eficácia	67%	100%	100%	efc 88,9%
	Eficiência	92%	68%	72%	eff 77,7%
EFICÁCIA	efc	Peso	100%	100%	100%
	efc	Resistência Mecânica - σ_{adm}	100%	100%	100%
	efc	Resistência Fadiga - σ_F	0%	100%	67%
	efc	Erro Máx. Quinagem	-	100%	100%
EFICIÊNCIA	eff	Peso	99%	88%	95%
	eff	Resistência Mecânica - σ_{adm}	95%	58%	71%
	eff	Resistência Fadiga - σ_F	83%	73%	78%
	eff	Erro Máx. Quinagem	-	54%	54%

Figura 21 – Resultados da aplicação da metodologia Lean DfX, para o cartão “Design for Structural Optimization”, do **conceito A** estudado para a nova Quinadora HD.

Lean Design-for-eXcellence		Decomposição Modular do Produto			Efficientiveness
Módulos Produto → ↓ Variáveis Design		Montante	Avental superior	Avental inferior	78%
Design for Structural Optimization	Eficácia	33%	100%	100%	efc 77,8%
	Eficiência	92%	68%	72%	eff 77,4%
EFICÁCIA	efc	Peso	0%	100%	67%
	efc	Resistência Mecânica - σ_{adm}	100%	100%	100%
	efc	Resistência Fadiga - σ_F	0%	100%	67%
	efc	Erro Máx. Quinagem	-	100%	100%
EFICIÊNCIA	eff	Peso	97%	88%	95%
	eff	Resistência Mecânica - σ_{adm}	89%	58%	69%
	eff	Resistência Fadiga - σ_F	88%	73%	79%
	eff	Erro Máx. Quinagem	-	54%	54%

Figura 22 – Resultados da aplicação da metodologia Lean DfX, para o cartão “Design for Structural Optimization”, do **conceito B** estudado para a nova Quinadora HD.

4.2 Máquina Laser LF

Apresentam-se abaixo os resultados que corresponderam à análise mais diferenciada no estudo das máquinas-laser com recurso à abordagem Lean-DfX, nomeadamente no que diz respeito ao importante aspeto de “Design-for-Maintenance”, o qual foi estudado pela equipa INEGI-ADIRA pela primeira vez neste contexto de *lean product development* e se traduz com resultados valiosos para a ADIRA no sentido de ter uma forma estruturada e sistemática de avaliar os critérios para garantir aos seus clientes e agentes uma manutibilidade facilitada das suas máquinas.



Figura 23 – Resultados da aplicação da metodologia Lean DfX, para o cartão “Design for Maintenance”, do conceito final estudado para a nova Laser LF.

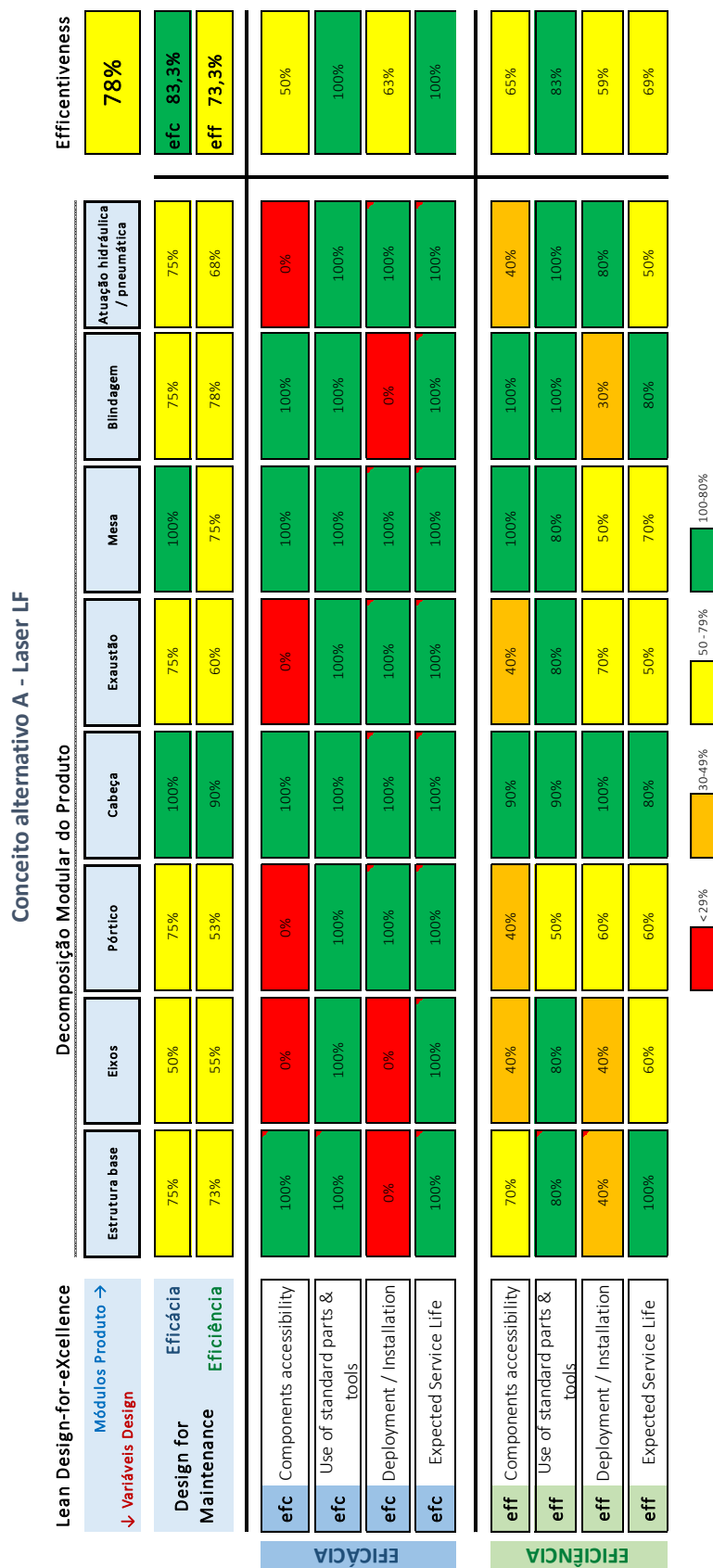


Figura 24 – Resultados da aplicação da metodologia Lean DfX, para o cartão “Design for Maintenance”, do **conceito alternativo A** estudado para a nova Laser LF.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os trabalhos desenvolvidos no âmbito do projeto TopMat permitiram aprofundar os conhecimentos e capacidades da Equipa ADIRA em temas fundamentais e de grande importância para a diferenciação contínua da ADIRA no panorama internacional como fabricante de bens-de-equipamento preparado e capacitado para a aplicação de ferramentas avançadas e inovadoras de desenvolvimento avançado de produtos.

Além dos progressos e aumento de maturidade na utilização das abordagens em torno do Modular Design e Standardização, a nova metodologia Lean Design-for-eXcellence desenvolvida pela Equipa INEGI, alicerçada em princípios lean, nomeadamente ao embeber parte do *framework* da também ela inovadora metodologia MSM-Multi-Layer Stream Mapping, e nos fundamentos de Modular Design, apresenta-se como um avanço técnico-científico de alto nível e com grande potencial de aplicação futura em múltiplos projetos ADIRA e da comunidade económica portuguesa que se relaciona com o desenvolvimento de novos equipamentos ou de novos produtos no sentido lato dos mesmos.

6. BIBLIOGRAFIA

Whitney, Daniel E.(2004), *Mechanical Assemblies – Their Design, Manufacture, and Role in Product Development*, MIT, 2004

Baldwin, C. Y. and K. B. Clark (2004). Modularity in the Design of Complex Engineering Systems.

Gumasta, K., S. Kumar Gupta, et al. (2011). "Developing a Reconfigurability Index Using Multi-Attribute Utility Theory." International Journal of Production Research **49**(6): 1669-1683.

Holttä-Otto, K. and O. de Weck (2007). "Degree of Modularity in Engineering Systems and Products with Technical and Business Constraints." Concurrent Engineering **15**(2): 113-126.

Höltkä, K., E. S. Suh, et al. (2005). Trade-off Between Modularity and Performance for Engineered Systems and Products. Proc of International Conference on Engineering Design, Melbourne, DESIGN SOCIETY.

Luke, E. A. (1993). Defining and measuring scalability. Scalable Parallel Libraries Conference, 1993., Proceedings of the.

Maier-Sperdelozzi, V., Y. Koren, et al. (2003). "Convertibility Measures for Manufacturing Systems." CIRP Annals - Manufacturing Technology **52**(1): 367–370.

Mikkola, J. H. (2006). "Capturing the Degree of Modularity Embedded in Product Architectures." Journal of Product Management **23**.

Mikkola, J. H. (2007). "Management of Product Architecture Modularity for Mass Customization." IEEE TRANSACTIONS ON ENGINEERING MANAGEMENT **54**(1).

Mikkola, J. H. and O. Gassmann (2003). "Managing Modularity of Product Architectures." IEEE TRANSACTIONS ON ENGINEERING MANAGEMENT **50**(2).

Pinto, J. P. (2009). Gestão de Operações na Indústria e nos Serviços

Poledrini, S. (2008). From Modular Innovation to Systems Integration: the Main Experiences from some Italian Machine Tool Builders. 8th Global Conference on Business & Economics. Florence, Italy.

R., C. R., R. P. R., et al. (2006). "Metrics for Evaluating Design of Reconfigurable Machine Tools." Lecture Notes in Computer Science: 234 – 241.

Spicer, P., Y. Koren, et al. (2002). "Design Principles for Machining System Configurations." CIRP Annals - Manufacturing Technology **51**(1): 275-280.

Stryker, A. C. and D. R. Jacques (2009). Modularity Versus Functionality - a Survey and Application. 7th Annual Conference on Systems Engineering Research.

Vaughn, A., P. Fernandes, et al. (2002). Manufacturing System Design Framework Manual.

Aboufazeli, Nasser (2011), Reconfigurable Machine Tools Design Methodologies and Measuring Reconfigurability for Design Evaluation, Master Thesis, Royal Institute of Technology, Sweden

**INEGI**

Campus da FEUP
Rua Dr. Roberto Frias, 400
4200-465 Porto
PORTUGAL

✉ inegi@inegi.up.pt
☎ + 351 229578710
📠 + 351 229537352



driving innovation *since 1986*

www.inegi.up.pt

U.PORTO