

COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS DE AR CONDICIONADO

Miguel Cavique - mcavique@est.ips.pt

Escola Superior de Tecnologia, Instituto Politécnico Setúbal- Departamento de Engenharia Mecânica- Campus do IPS, Estefanilha-2914-508 Setúbal, Portugal.

António Gonçalves Coelho – agc@fct.unl.pt

Universidade Nova de Lisboa – Departamento de Engenharia Mecânica – Quinta da Torre, 2829-516 Caparica, Portugal.

Abstract.

Design requires the knowledge of what is to be achieved and how is wanted to be achieved. The final definition of a product is usually the result of a cycle of definitions and redefinitions, depending of an interactive and iterative process where many participants take part. Axiomatic Design is one of the latest design theories, which allows a structured decision process. According to Axiomatic Design, two axioms govern good design: the Independence and the Information Axioms.

In the present paper, the Independence Axiom is used to appraise two distinct HVAC design solutions for a high quality office building in Lisbon. High-level functional requirements, as comfort and indoor air quality are considered, and two different kinds of systems where analysed: convective and radiative. In a broad view, both systems can accomplish these requirements, and probably the radiative system can provide a better comfort condition. However, the radiative system cannot handle all sensible internal loads alone, needing the use of an additional sub-system, fresh air or other, therefore creating an overall coupled system. This violates the Independence Axiom and may increase the information content. Therefore, care must be taken when using radiative systems in Lisbon-like climates, considering its use only if unchangeable and predictable loads are expected.

Keywords: HVAC, Radiative system, Convective system, Axiomatic Design

1. INTRODUÇÃO

Os ciclos clássicos de introdução de novos produtos consistem em fases sucessivas de Projecto, ensaios e modificações ao Projecto, por vezes com lançamentos consecutivos de versões diferentes do mesmo produto. Este método foi utilizado durante dezenas de anos após a revolução industrial e permite poupanças até cerca de 20% nos custos totais de produção. Contudo, é antes da produção, quando os custos de alteração são pequenos, que

se define mais de 80% dos custos de produção. Torna-se, assim, claro que esforço de optimização deve centrar-se, cada vez mais, na elaboração do Projecto. Durante os anos setenta foram introduzidas algumas metodologias de projecto com a intenção de diminuir, se não mesmo de eliminar, as sucessivas fases de tentativa e erro que costumam caracterizar a elaboração do projecto de engenharia. Métodos como o QFD, o TRIZ, a Análise do Valor ou o Projecto Sistemático de G. Pahl, deram um contributo apreciável para a redefinição do processo de elaboração dos projectos de engenharia. Recentemente, Suh (1990) propôs a Teoria Axiomática de Projecto que utilizaremos neste artigo.

Estes métodos têm sido aplicados com sucesso em diversos processos de projecto e de fabrico, embora raramente na indústria de construção civil. Muito embora os edifícios de escritórios projectados sejam normalmente únicos, raramente se tenta aplicar uma metodologia de projecto que conduza, de forma estruturada, a um resultado correcto à primeira vez. É normalmente após a concepção — e muitas vezes após a construção — que as alterações, quase sempre de custo elevado, são introduzidas. Incorre-se pois na situação paradoxal de não aplicação de qualquer metodologia formal a um projecto que será executado uma única vez. O caso dos sistemas de climatização de edifícios enquadra-se nesta realidade. É muitas vezes na fase de adjudicação que se tenta reduzir os custos. O resultado é quase sempre uma redução mais significativa da qualidade do produto do que dos respectivos custos.

Pretendemos dar com este artigo um pequeno contributo que permita avaliar da aplicabilidade da Teoria Axiomática do Projecto à decisão da escolha de sistemas de climatização.

2. SISTEMAS EM CLIMATIZAÇÃO DE ESCRITÓRIOS

Pretende-se comparar um sistema convectivo que utiliza unidades individuais terminais, com um sistema radiativo com painéis de tecto, quando aplicados a edifícios de escritórios. Estes edifícios têm cargas internas de arrefecimento típicas de 100 W/m^2 , podendo estas variar de 60 W/m^2 a 120 W/m^2 . Embora de concepções diferentes, os sistemas referidos têm algumas características semelhantes: o sistemas de ar novo é independente do sistema de arrefecimento; ambos têm limitações na capacidade de utilização do arrefecimento gratuito do ar exterior ("*free-cooling*"); a dimensão das condutas no interior do edifício é pequena, quando comparada com sistemas tudo ar; e procuram permitir o controlo local da temperatura.

Nesta comparação usou-se como critério de conforto térmico a norma ISO 7730, aplicada a uma pessoa sentada em situação de equilíbrio térmico, à qual corresponde um valor de voto médio previsível (PMV- "*predicted mean vote*") de zero. A zona de grande conforto corresponde a valores de PMV entre -0,5 e +0,5. Consideraram-se constantes a actividade metabólica do indivíduo, a resistência térmica da sua roupa e uma humidade relativa de 50%. Utilizaram-se as unidades "met" para o metabolismo e "clo" para o isolamento térmico, conforme a norma acima referida. Para o metabolismo foi tomado o valor de 1,2 met, típico de ambientes de escritório, e de 0,5 clo para a resistência térmica típica de uma situação de Verão. Nestas condições, o conforto térmico é obtido do balanço entre a temperatura seca do ar, a temperatura radiante média e a velocidade residual do ar.

O nível de ruído é outro dos parâmetros considerados no conforto, pretendendo-se que esteja compreendido entre NC ("*noise criteria* ") 30 e 35. A avaliação da qualidade do ar pode ser medida indirectamente pela concentração de CO_2 (Ashrae 62, 2001). As concentrações interiores de CO_2 superiores em até 700 ppm à concentração exterior, caracterizam uma qualidade do ar interior aceitável. Este é um valor indicativo para controlo de odores, não devendo ser considerado um tecto. Aceitam-se facilmente concentrações interiores absolutas de 800 a 1300 ppm de CO_2 .

2.1. Sistema Convectivo com unidades terminais

Estes sistemas são usados preferencialmente em situações caracterizadas por elevadas cargas sensíveis, onde o controlo directo da humidade não seja requerido. É normal considerar como principais vantagens relativas deste tipo de sistemas a possibilidade de controlo de temperatura no local; a utilização separada de fontes de aquecimento e de arrefecimento; o reduzido espaço ocupado pelas condutas; a desumidificação e a filtração efectuadas prioritariamente em sistemas centrais remotos. Como ponto a desfavor aponta-se a dificuldade de arrefecimento gratuito. (Ashrae Research, 2004)

Num sistema típico, as unidades locais são ventiloconvectores e o sistema de ar novo é autónomo, privilegiando a filtração e a desumidificação. O filtro das unidades terminais é normalmente de média eficiência, preferencialmente EU3, necessitando de manutenção periódica. Se correctamente instalado, a desumidificação secundária nos ventiloconvectores é nula, com contributo positivo para a qualidade do ar interior. O controlo de capacidade é normalmente efectuado por variação do caudal de água.

A possibilidade de contaminação cruzada é reduzida, dado que a insuflação e a exaustão do ar são locais. O ar novo, normalmente 100% de ar exterior, proveniente do sistema central, pode ser introduzido no ventiloconvector ou directamente no espaço interior do edifício. A temperatura do ar novo é normalmente de cerca de 22^o C ao longo de todo o ano. Sistemas de controlo mais sofisticados podem ser utilizados para aproveitar a entalpia do ar novo nos dias frios, quando é necessário remover a carga interna.

Para a obtenção de valores de PMV entre -0,5 e +0,5 nas condições indicadas, a temperatura seca e a velocidade do ar deverão estar dentro de limites aceitáveis. O valor de PMV nulo, (com aproximação às centésimas), obtém-se por exemplo para uma velocidade residual de 0,2 m/s à temperatura do ar de 25,5^o C. A percentagem de insatisfeitos devido à velocidade residual ("*draught*") é de cerca de 9%.

2.2. Sistema Radiativo

Considera-se neste estudo o sistema radiativo por excelência, o qual é constituído por painéis arrefecidos ou aquecidos. Não são consideradas soluções que incluem vigas indutivas ou outros processos mistos, dado constituírem soluções intermédias onde a componente convectiva da transferência de calor tem uma contribuição que é próxima do sistema anteriormente descrito.

O sistema de painéis radiantes remove cerca de metade da carga por via radiativa. Como consequência, produz excelentes condições de conforto dado que funciona com uma velocidade residual inferior. Consideram-se ainda como vantagens deste sistema: o aumento da eficiência dos sistemas de produção de água refrigerada por incremento da temperatura da fonte fria; a qualidade do ar interior melhorada por não existirem superfícies molhadas; o nível de ruído reduzido (Ashrae Research, 2004). Como desvantagens consideram-se: a resposta deficiente às variações bruscas da carga interna; a remoção unicamente de cargas sensíveis; o sistema de controlo mais sofisticado para evitar possíveis condensações; a impossibilidade de introdução directa de ar novo ou, como corolário, a selagem do ambiente interior relativamente às condições exteriores (idem).

O sistema de controlo deve garantir que a humidade relativa interior seja mantida dentro de limites que impeçam a condensação nas placas. Um sensor de humidade origina o corte do abastecimento de água aos painéis se a temperatura húmida for próxima da temperatura de orvalho. É recomendável que a água entre nos painéis a uma temperatura superior em cerca de 1^o C à temperatura de orvalho da sala e que o retorno se faça a 3^o C acima das condições de entrada (ibidem). Estas condições determinam normalmente uma temperatura média do painel de 18^o C ou superior. As trocas de calor com o ambiente são realizadas por processos de convecção e por radiação.

O fluxo de calor por radiação (q_r), em Watts, depende da temperatura do painel (t_p) e da temperatura média ponderada à área das superfícies interiores não arrefecidas (t_w). Esta é

muito próxima da temperatura seca do ar (ibidem), desde que não existam grandes superfícies de envidraçados.

$$q_r = 5 \times 10^{-8} [(t_p + 273,15)^4 - (t_w + 273,15)^4], \quad (1)$$

com t_p e t_w em grau Celsius.

A carga por convecção natural pode ser expressa por (ibidem):

$$q_c = 2,13 \times |t_p - t_a|^{0,31} (t_p - t_a), \quad (2)$$

sendo t_a a temperatura interior seca em graus Celsius.

A temperatura radiante média para uma pessoa sentada, dado que as temperaturas das restantes superfícies são sensivelmente iguais à temperatura seca do ar, pode então ser dada pela expressão:

$$t_{rm} = \frac{0,18t_p + 1,22t_a}{1,4} \quad (3)$$

O valor de PMV nulo (com aproximação às centésimas), pode ser obtido para uma velocidade residual de 0,1 m/s, temperatura do tecto de 18°C, ar a 25°C e temperatura radiante média de 24,1°C obtida da Eq. (3). A percentagem de insatisfeitos devido à velocidade residual (“*draught*”) é de cerca de 4%.

Nestas condições, a carga removida por radiação será de 36 W/m² e a carga de convecção de 27 W/m². A carga removida por um painel, nas componentes de radiação e de convecção, é inferior a 60 W/m² de área de tecto arrefecido. Dado que raramente se consegue uma ocupação dos tectos com painéis radiantes superior a 80%, a carga removível pelos painéis será de cerca de 50 W/m² de área da zona climatizada. A carga remanescente deverá ser removida por sistemas auxiliares e nomeadamente pelo sistema de ar novo.

3. TEORIA AXIOMÁTICA DE PROJECTO

A Teoria Axiomática de Projecto (A.D.) foi desenvolvida por Suh no MIT, durante os anos 70, para permitir uma abordagem sistemática ao projecto de engenharia. Esta teoria pretende estabelecer as bases científicas para o Projecto, desenvolver a criatividade eliminando as ideias contrárias aos objectivos do Projecto, criar as bases para um sistema computacional capaz da realização de Projecto, transformar o Projecto numa actividade mais apreendida pela aplicação de bases científicas que pela experiência e aplicá-la às mais diferentes áreas do saber (Suh 2001). A Teoria Axiomática de Projecto tem por base dois axiomas: o Axioma da Independência e o Axioma da Informação. Estes não necessitam de demonstração, sendo verdades evidentes, as quais não derivam de outras verdades e das quais não se conhecem excepções ou contradições (*idem*).

3.1. Domínios de Projecto

A Teoria Axiomática de Projecto considera a existência de Requisitos Funcionais (FR) a desempenhar, que existem num domínio funcional, e de Parâmetros de Projecto (DP) num domínio físico. Poderão ser ainda considerados domínios a montante referentes às necessidades dos clientes, e domínios a jusante referentes ao processo de fabrico. Qualquer decomposição de Requisitos Funcionais de um sistema composto, só pode ser realizada após a escolha dos Parâmetros de Projecto que se pretendem utilizar, criando um processo de zigzague entre os domínios funcional e físico. Em qualquer das etapas de decomposição dos Requisitos Funcionais os axiomas referidos devem ser satisfeitos.

O processo de Projecto pode ser esquematizado pela figura seguinte:

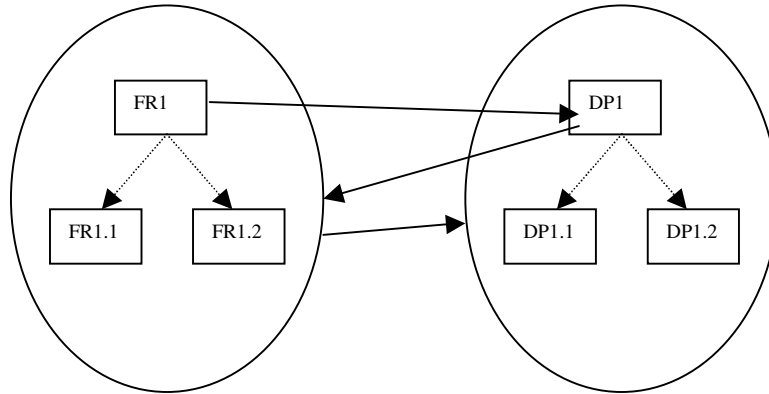


Figura 1- Processo de Projecto por decomposição em ziguezague dos Requisitos Funcionais e dos Parâmetros de Projecto.

3.2. O Axioma de Independência

O Axioma de Independência estabelece que um “bom projecto” se caracteriza pela independência entre os seus Requisitos Funcionais ou, de outra forma, que as variações de um “DP” específico não deve afectar mais que um “FR”. A relação expressa na Fig. 1 pode ser entendida como:

$$\{FR\} = [A] \{DP\}, \quad (4)$$

sendo $[A]$ a matriz de Projecto, cujos elementos são da forma

$$A_{ij} = \partial FR_i / \partial DP_j, \quad (5)$$

a qual expressa um facto interessante: os elementos da matriz de Projecto descrevem variações paramétricas.

Idealmente, o número de Parâmetros de Projecto deve ser igual ao número de Requisitos Funcionais, caso em que $[A]$ é uma matriz quadrada correspondendo ao Projecto ideal (*ibidem*). Neste caso, poderá acontecer que a matriz $[A]$ tenha apenas elementos significativos (não nulos) na sua diagonal principal. Por exemplo, num projecto com dois Requisitos Funcionais a matriz de Projecto tomará então a forma:

$$\begin{bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & \\ & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Nesta situação, qualquer variação de um FR pode ser obtida independentemente por variação do DP correspondente. Diz-se então que o projecto é desacoplado.

Se $[A]$ for triangular superior ou inferior o sistema diz-se desacoplável. A escolha dos valores a atribuir aos parâmetros deve seguir uma ordem precisa, de forma a alterar de um só requisito cada vez. A matriz tomará a forma:

$$\begin{bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Neste caso, FR_2 deverá ser cumprido por ajuste de DP_2 , após o que se pode ajustar DP_1 para cumprir FR_1 , com DP_2 fixo.

Finalmente se [A] tem elementos significativos em ambos os lados da diagonal, o sistema é acoplado, sendo de difícil controlo e muito sensível a variações dos Parâmetros ou a alterações dos Requisitos Funcionais.

$$\begin{bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

A escolha da solução deve, sempre que possível, recair num Projecto desacoplado.

Se o número dos Parâmetros de Projecto for superior ao dos Requisitos Funcionais, então os Requisitos Funcionais podem ser cumpridos por variações de apenas um subconjunto de Parâmetros de Projecto. Diz-se então que o sistema é redundante e o processo de Projecto deve começar pela fixação de alguns dos Parâmetros de Projecto, por forma a que seja possível obter uma submatriz quadrada que seja diagonal ou triangular. Caso isto não seja possível, então o projecto é acoplado.

Se o número dos Parâmetros de Projecto for inferior ao dos Requisitos Funcionais, então o sistema é acoplado e deverá ser modificado, dado ser impossível afectar de forma independente cada um dos Requisitos Funcionais.

3.3. O Axioma de Informação

O segundo axioma estabelece que a informação contida num Projecto deve ser minimizada, isto é, entre todas as hipóteses de solução desacopladas, a escolha deve recair na solução com menos informação. A informação contida será tanto maior quanto menor a probabilidade de sucesso da solução. A informação pode ser definida a partir do inverso da probabilidade de sucesso do sistema, tendo em conta os limites aceitáveis para os Requisitos Funcionais (Intervalo de Projecto) e a função de densidade de probabilidade (Área do sistema). A figura seguinte ilustra este caso, onde a probabilidade de sucesso p é dada pela área da zona comum.



Figura 2. Probabilidade de sucesso de sistema com um FR e um DP

A informação contida num sistema com apenas dois estados de probabilidades de ocorrência iguais pode ser representada por um bit. Por analogia define-se informação em bits como:

$$I = \log_2(1/p) = -\log_2(p), \quad (9)$$

Em referência à Fig.2, a probabilidade de sucesso é dada pela relação entre as áreas de funcionamento do sistema (Área do sistema) e a área comum ao sistema e ao Intervalo de Projecto, sendo a informação:

$$I = \log_2(\text{Área do sistema} / \text{Área comum}) \quad (10)$$

Num projecto com i requisitos funcionais independentes, a probabilidade conjunta de sucesso, P , será o produto das probabilidades de sucesso p_i de cada requisito, pelo que a informação de todo o sistema será a soma das informações de cada função:

$$I = -\log_2(P) = -\log_2(\prod p_i) = \sum -\log_2(p_i) = \sum I_i \quad (11)$$

Se os Requisitos Funcionais forem acoplados a probabilidade de sucesso de cada FR depende do estado de satisfação dos outros. Normalmente, mas nem sempre, a informação de um sistema acoplado é superior à de um sistema não acoplado.

4. COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS

Pretende-se comparar dois sistemas com as características indicadas no ponto 2, utilizando os axiomas referidos. O Requisito Funcional de nível mais elevado será o “Bem-Estar” e o Parâmetro de Projecto: “Sistema de Climatização”. Pretende-se que o Requisito referido, satisfaça o utilizador e o investidor. Face ao DP respectivo, será decomposto em “Conforto Térmico e Acústico” e “Salubridade”, como FR’s do utilizador, e “Flexibilidade” e “Custo”, como FR’s do investidor. A estes FR’s corresponderão os DP’s de “Sistema Activo”, “Sistema de Ar Novo”, “ Alterações” e “Custo de Obra”. Para facilidade de representação utilizaram-se siglas para os FR e DP do terceiro nível de decomposição.

Tabela 1. Siglas usadas para a representação dos Requisitos Funcionais e Parâmetros de Projecto do terceiro nível de decomposição

Sigla	Requisito Funcional	Sigla	Parâmetro de Projecto
Ts	Temperatura Seca	Ti	Temperatura de Insuflação
Vr	Velocidade Residual	Vi	Velocidade de Insuflação
Tr	Temperatura Radiante Média	Tt	Temperatura média do tecto
R	Ruído	IA	Isolamento Acústico
CO ₂	Controlo de CO ₂	QAN	Caudal de Ar novo
Cm	Custo de modificação	CA	Custo das Alterações
M	Modularidade	PI	Potência Individual

4.1. Decomposição dos Requisitos Funcionais e Parâmetros de Projecto

O processo de decomposição dos Requisitos Funcionais e Parâmetros de Projecto, para um sistema convectivo, são esquematizados na figura seguinte, onde se considerou pouco relevante o controlo da humidade relativa. Dado que neste sistema a temperatura radiante média é igual à temperatura seca, a qualidade do ar pode ser avaliada função da concentração de CO₂, o controlo da temperatura faz-se por variação da temperatura de insuflação a caudal constante e a temperatura do ar novo é normalmente constante, o processo pode ser expresso na seguinte figura:

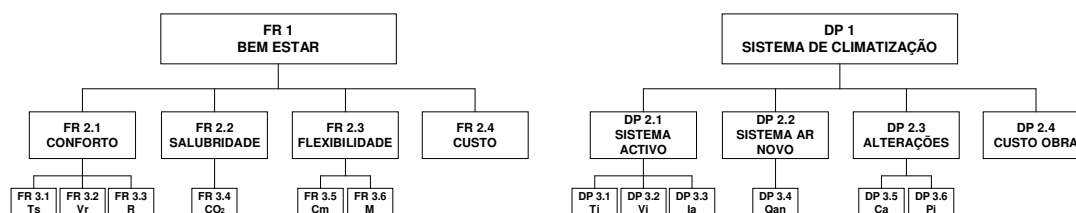


Figura 3. Processo de decomposição de Requisitos Funcionais e Parâmetros de Projecto de um Sistema Convectivo.

Neste sistema existem 11 FR a serem cumpridos por 11 DP, pelo que a matriz de Projecto será quadrada. A cada Requisito Funcional corresponderá um Parâmetro de Projecto. Esta correspondência não implica um controlo exacto dos limites aceitáveis para os Requisitos. Por exemplo a temperatura seca do local, controlada pela temperatura de insuflação, poderá variar para além desses limites, em função do local, dos difusores de insuflação, do termostato ou do tipo de válvula utilizada. Situações similares ocorrem com a velocidade do ar, o nível de ruído ou a concentração de CO₂.

Os custos do sistema situam-se entre 125 e 150 k€/m² de área climatizada. Numa escala vaga de { muito fácil, fácil, aceitável, difícil e muito difícil } os custos de modificação e a modularidade são fácil ou aceitável.

O processo do sistema radiativo deve considerar a temperatura radiante e as variações de temperatura no caudal de insuflação, de forma a retirar a carga interna. A velocidade residual depende, para além das correntes de convecção, da velocidade de insuflação do ar novo. A figura seguinte espelha a decomposição proposta:

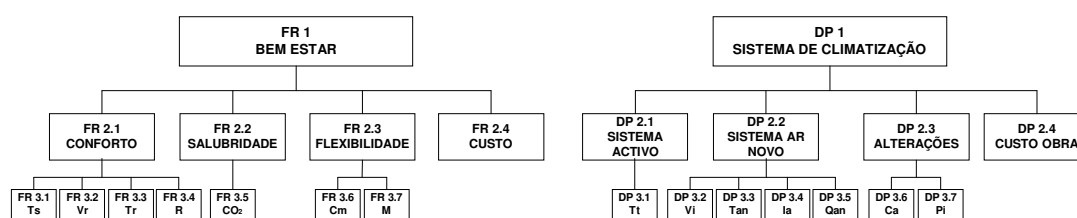


Figura 4. Processo de decomposição dos Requisitos Funcionais e dos Parâmetros de Projecto de um Sistema Radiativo.

Neste sistema existem 12 FR a serem cumpridos por 12 DP. Esta situação dificulta o controlo e pode fazer variar os Requisitos para além dos limites aceitáveis.

Os custos do sistema situam-se entre 150 e 200 k€/m² de área climatizada. Na escala vaga referida, os custos de modificação são difícil e a modularidade aceitável.

4.2. Resultados do Axioma da Independência

Com base na descrição do processo efectuada no capítulo 2, é possível estabelecer as principais relações entre os Requisitos Funcionais e os Parâmetros de Projecto. A matriz de um sistema convectivo é expressa pela Eq. (12), onde os elementos significativos relevantes para o processo são representados por um "x".

$$\begin{bmatrix}
 FR1.BemEstar \\
 FR2.1.Conf \\
 FR2.2.Salub. \\
 FR2.3.Flex. \\
 FR2.4.Custo \\
 FR3.1.Ts \\
 FR3.2.Vr \\
 FR3.3.R \\
 FR3.4.CO_2 \\
 FR3.5.Cm \\
 FR3.6.M
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 x & & & & & & & & & & & \\
 & x & & & & & & & & & & \\
 & & x & & & & & & & & & \\
 & & & x & & & & & & & & \\
 & & & & x & & & & & & & \\
 & & & & & x & & & & & & \\
 & & & & & & x & & & & & \\
 & & & & & & & x & & & & \\
 & & & & & & & & x & & & \\
 & & & & & & & & & x & & \\
 & & & & & & & & & & x & \\
 & & & & & & & & & & & x
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 DP1.Sist.Climatz. \\
 DP2.1.Sist.Act. \\
 DP2.2.Sist.Ar.Novo \\
 DP2.3.Alterações \\
 DP2.4.CustoObra \\
 DP3.1.Ti \\
 DP3.2.Vi \\
 DP3.3.Ia \\
 DP3.4.Qan \\
 DP3.5.Ca \\
 DP3.6.Pi
 \end{bmatrix}
 \quad (12)$$

BIBLIOGRAFIA

- António Gonçalves Coelho, António Mourão, Helena Guitiss Navas, 2004, A Rational Way to Select a Measuring System for Mechanical Parts Inspection, ICAD2004 The third International Conference on Axiomatic Design.
- Ashrae Research, 2004, HVAC Systems and Equipment, chapter 3 and 6.
- Ashrae Standard 62,2001, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality (ANSI Approved).
- ISO 7730, 1994, Moderate thermal environment – Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort.
- Nam Pyo Suh, 2001, Axiomatic Design Advances and Applications, Oxford University Press.