

# ELEMENTOS DE UM MÉTODO PARA ARQUITETURA DE PLATAFORMAS DE FAMÍLIA DE SATÉLITES

Otávio Luiz Bogossian

Geilson Loureiro

Instituto Nacional de pesquisas Espaciais (INPE)

São José dos Campos – SP, Brasil

[otavio.bogossian@gsr.inpe.br](mailto:otavio.bogossian@gsr.inpe.br)

[geilson@lit.inpe.br](mailto:geilson@lit.inpe.br)

**Resumo** - Este artigo tem por objetivo apresentar as oportunidades existentes na área de arquitetura de plataforma de família de satélites e apresentar os elementos necessários de um método que guie o processo de arquitetura de plataforma, levando em conta a avaliação dos resultados parciais ao longo de todo esse processo, desde as suas fases iniciais.

O método será desenvolvido a partir da maior experiência acumulada no desenvolvimento de famílias de produtos baseados em plataformas em aplicações não espaciais. Para o desenvolvimento do método, também serão analisadas experiências anteriores de plataformas na área espacial. O método deverá levar em conta fatores relacionados ao ambiente do satélite durante os seus processos do ciclo de vida, com destaque para os cenários operacionais da missão. O método será demonstrado em plataformas de famílias de satélites já desenvolvidas, tais como a PMM ou Proteus.

**Palavras-chaves** – família de produtos, plataformas, satélites, ciclo de vida, cenários operacionais, arquitetura, modularidade e escalabilidade.

## 1 Introdução

Este artigo é fruto da pesquisa realizada para a elaboração de uma proposta de tese de doutorado para o curso de Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE) na área de concentração de Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais (CSE) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A proposta foi submetida e aprovada pela banca constituída para este fim. A tese proposta tem por objetivo desenvolver e demonstrar um método de arquitetura de plataformas de famílias de satélites. Uma família de satélites contém um núcleo comum (a plataforma) e componentes específicos para cada missão. Este artigo tem por objetivo apresentar uma visão geral da experiência em plataforma de produtos na indústria não espacial, as oportunidades presentes na indústria espacial e apresentar os elementos que devem fazer parte de um método para guiar o processo de arquitetura de plataformas para famílias de produtos espaciais, notadamente, satélites.

Para atender a esse objetivo, este artigo está organizado como segue: na Seção 2 *Motivação* são apresentados os fatores que motivaram o desenvolvimento de um método para guiar o processo de arquitetura de plataforma de satélites. A Seção 3 *Revisão bibliográfica* apresenta o contexto das plataformas e da família de produtos. Nesta seção são também apresentadas as pesquisas realizadas em plataformas aplicadas a outras áreas

que não a espacial (JIAO et al., 2007) bem como o que foi realizado na área espacial. A Seção 4 antecipa alguns elementos potenciais que poderão estar presentes no método proposto. A Seção 5 apresenta a conclusão desse artigo.

## 2 Motivação

Höltkä-Otto e Otto (2006) proveram um método de avaliação de uma plataforma para aplicações gerais. Este trabalho reconheceu o potencial do método proposto por Höltkä-Otto e Otto (2006) e identificou a oportunidade de desenvolver um método semelhante, mas que possa ser aplicado não somente para avaliar o resultado do processo de arquitetura, mas também ao longo desse processo.

As famílias de produtos baseadas em plataformas têm tido um grande desenvolvimento nas aplicações gerais (não espaciais) e foi fruto de muita pesquisa na última década. A literatura destas aplicações está muito bem estruturada com artigos que cobrem as necessidades dos clientes, requisitos funcionais, parâmetros de projeto, parâmetros de processo e variáveis de logística, cobrindo várias etapas do ciclo de vida (JIAO et al., 2007). Este desenvolvimento foi motivado pela necessidade de se manter uma suficiente variedade de produtos no mercado enquanto se mantém uma economia de escala dentro dos limites das capacidades de fabricação (ROBERTSON & ULRICH, 1998). A geração de variedades pode ser produzida por características funcionais, equilíbrios de preços, posicionamento do produto no mercado, redução de custos entre outros (JIAO et al., 2007).

A partir das referências bibliográficas deste artigo, observa-se que as plataformas de famílias de produtos também foram aplicadas ao contexto aeroespacial. A motivação, possivelmente foi a redução dos orçamentos das agências espaciais ocorrida na década passada e a entrada de países do terceiro mundo, com menores recursos, na área espacial. Os artigos da área espacial (vide as referências ao final deste artigo), na sua grande maioria, abordam a abrangência da plataforma em termos de parâmetros de missão e a definição do núcleo comum da plataforma, sem, no entanto, apresentar critérios para esta definição. Com base nesses artigos, pode-se concluir que essas aplicações foram desenvolvidas de forma não sistemática, procurando dar flexibilidade para atender missões futuras, difíceis de serem previstas, uma vez que os métodos citados anteriormente de geração de variedades, não se aplicam ao contexto espacial. Outro aspecto relevante é o impacto que o ambiente operacional acarreta nas características da solução (vide Seção 4), o que traz dificuldades em definir um núcleo comum da plataforma que sofra um limitado impacto a cada satélite desenvolvido.

Como consequência as plataformas de famílias de satélites podem ser concebidas: 1) abrangentes demais, exigindo um tempo grande de estudo e qualificação para os diversos cenários ou, 2) se limitando ao primeiro membro da família, deixando os estudos e a qualificação para cada futuro membro, alongando o tempo de desenvolvimento destes. As soluções abrangentes vão contra o princípio de que a plataforma deve ser concebida para família de produtos similares (MEYER & LEHNERD, 1997), o que os torna produtos ineficientes quando comparados com os obtidos de um desenvolvimento específico. É neste quadro que o método a ser desenvolvido deverá atuar contribuindo para balancear os principais parâmetros de projeto e a abrangência de missões espaciais, usando, dentro do possível, todo o conhecimento obtido na área de família de produtos baseadas em plataformas para aplicações gerais (não espaciais).

### **3 Revisão bibliográfica**

Esta seção apresenta a revisão bibliográfica realizada para identificar as oportunidades oferecidas pelo tema e o seu potencial de desenvolvimento. Esta seção apresenta a contextualização do tema 'plataforma de família de produtos', os conceitos básicos iniciais necessários para o desenvolvimento posterior do tema e o que tem sido feito dentro desse assunto na indústria aeroespacial.

#### **3.1 Contextualização**

A produção industrial em massa permitiu o barateamento dos produtos pela fabricação em grande escala. Com o passar do tempo as empresas adotaram a customização em massa objetivando atender as particulares necessidades dos seus clientes, levando em conta a eficiência da produção em massa (PINE, 1993).

A customização em massa passou a produzir variantes dos produtos. Estas variantes poderiam ser desenvolvidas dentro do ciclo de vida dos produtos existentes ou em sucessivas gerações (ULRICH 1995), caracterizando os tipos de projeto em: independentes, projetos em série, projetos de melhoria e projetos de produto melhorável. Para competir no mercado, fabricantes têm buscado expandir as suas linhas de produção e diferenciação de produtos com a crença de que a grande variedade de produtos poderia estimular as vendas e gerar lucro adicional (HO & TANG, 1998).

Com o surgimento do conceito de família de produtos foi possível alavancar o custo de produção das variedades, reusando os elementos validados (SAWHNEY, 1998). Trouxe benefícios como a redução de risco de desenvolvimento e da complexidade. Muitas empresas estão investindo em práticas de desenvolvimento de famílias de produtos de forma a fornecer variedades, enquanto se mantém uma economia de escala e volume de produção dentro das capacidades de sua manufatura (ROBERTSON & ULRICH, 1998).

O conceito de família de produtos vinculado a uma plataforma foi definido como sendo um conjunto de produtos similares que são derivados de uma plataforma comum e que possui características/funcionalidades específicas que atendem os particulares requisitos dos clientes (MEYERr & LEHNERD, 1997). Também foi caracterizada a plataforma como sendo um conjunto de subsistemas e interfaces, desenvolvidas para formar uma estrutura comum a partir da qual são derivados produtos que podem ser eficientemente desenvolvidos e fabricados.

Esse conceito de plataforma de produtos foi levado para a área espacial, onde várias plataformas foram desenvolvidas objetivando atender diversas missões espaciais. Destacam-se duas plataformas da agência espacial francesa (CNES), uma para satélites de médio porte denominada Proteus (AEROSPATIALE, 1995; LANDIECH & DOUILLET, 2004) e uma segunda para satélites de pequeno porte (micro satélites) denominada Myriade (ALARY & LAMBERT, 2007).

O Brasil também seguiu esta linha de desenvolvimento através do Programa de Plataforma Multimissão (PMM) (INPE, 2001).

#### **3.2 Conceitos gerais de plataformas**

Conceitos como arquitetura e modularidade foram tratados por diversos autores. A arquitetura pode ser definida como o meio empregado para associar elementos funcionais a unidades físicas e a forma como estas unidades interagem (ULRICH & EPPINGER, 1995). Outro autor definiu a arquitetura em termos de arranjos funcionais (YU et al., 1999). Quanto

à modularidade, um dos autores classificou a modularidade do sistema de acordo com o tipo de interface (ULRICH 1995). Propôs três tipos de interface: slot – interfaces distintas entre os módulos; seccional – mesma interface entre os módulos e barramento - uma interface comum a todos. Enquanto a modularidade trata do mapeamento entre funções e componentes, a integralidade envolve a padronização e desacoplamento de interfaces entre os componentes (ULRICH & EPPINGER, 1995).

Sosa et al. (2003) destacam a importância da integralidade e da modularidade nas interações da equipe de projeto e introduz um método de identificar se o sistema é modular ou integral, baseado na análise das interações entre componentes usando uma matriz de estrutura de projeto (DSM).

Zamirwsky e Otto (1999) salientam a necessidade de se obterem múltiplas vistas da arquitetura do produto e da plataforma tais como necessidades dos clientes, estrutura funcional, estrutura física etc. Muffatto e Roveda (2002) destacam outros aspectos para a arquitetura do produto como funções, requisitos, soluções tecnológicas, concepções de produto, estratégia de produto e plataforma, bem como fabricação e montagem.

Um dos aspectos estudados é o de definição da carteira de produtos e o posicionamento da família de produtos. Esses estudos objetivam planejar a carteira de produtos com base nas possíveis expectativas dos clientes. Uma das técnicas introduziu as grades de segmentação do mercado para alavancar famílias de produtos entre os múltiplos segmentos de mercado (MEYER & LEHNERD, 1997).

Outro aspecto importante é o projeto da família de produtos baseada em plataformas. Duas abordagens estruturam a pesquisa, a escalável (ou paramétrica) na qual os parâmetros escaláveis esticam ou encolhem a plataforma de forma a atender a necessidade dos clientes (SIMPSON et al., 2001). A outra caracterizada como configuracional, a qual é composta de itens adicionados, substituídos ou retirados de um ou mais módulos funcionais (DU et al., 2001). Na abordagem escalável, destaca-se um estudo que aplica otimização multidisciplinar para determinar o efeito de uma variável de projeto escalável em múltiplos aviões que objetivam missões distintas e compartilham partes comuns (WILLCOX & WAKAYAMA, 2003). Na abordagem configuracional destacou-se uma ferramenta para identificar os grupos de elementos que tinham alta interação de forma a agrupá-los em módulos (YU et al., 2003). Outro destaque é o de uma proposta de estudo amplo (framework) para a arquitetura de uma família de produtos que compartilha módulos intercambiáveis. Define-se uma matriz de modularidade de uma família de produtos onde os itens comuns são facilmente identificáveis (OTTO et al., 2000).

Vários artigos tratam das interfaces, Martin e Ishii (2002) introduzem um índice de acoplamento para avaliar o nível de acoplamento entre as interfaces dos módulos de forma a facilitar o planejamento das múltiplas gerações de produtos de uma família.

Foram propostas diversas métricas abrangendo aspectos de modularidade, itens comuns, variedade/distinguibilidade, custo, lucro/valorização e relacionadas com a plataforma (vide Jiao et al., 2007 Metrics for product family design citando diversos autores).

No contexto da modelagem, destaca-se um estudo conceitual de modelagem de família de produtos, com particular ênfase nos problemas relacionados com a evolução das famílias de produto (MÄNNISTÖ, 2000).

Dentro do contexto de fabricação e produção de famílias de produtos, a bibliografia abrange o gerenciamento da variedade, os processos de desenvolvimento e a configuração de produção. Destaca-se a expansão do conceito de plataforma para o processo e produção de forma que os processos comuns da família sejam claramente identificados e, a fabricação e montagem, tenham itens comuns nas ferramentas de produção, máquinas e linhas de montagem (MEYER & LEHNERD, 1997). Um outro destaque neste mesmo contexto é o que

estabelece uma coordenação entre variedade de produto e do processo, adotando uma regra de variedade para identificar a inter-relação entre variações de produto e as do processo (JIAO et al., 2005).

Finalmente um conjunto de artigos trata da questão do suprimento e logística (ver Jiao et al., 2007 *Supply Chain Configuration e Manufacturing and Logistic Issues* citando diversos autores).

### 3.3 Plataformas de famílias de satélites e aeronaves

Foram realizadas pesquisas bibliográficas em CDs vinculados a eventos como IAF e INCOSE e nos bancos de dados de artigos assinados pela Capes. As palavras chaves utilizadas dentro do contexto de aplicações espaciais foram: plataformas, família de produtos, família de satélites etc. Alguns poucos artigos foram encontrados e os mais relevantes têm resumos de seus conteúdos descritos nos parágrafos que seguem.

Um dos artigos encontrados foi o do projeto PRIMA (Piattaforma Riconfigurabile Italiana Multi-Applicativa) que propôs uma arquitetura que incorporou alguns conceitos relevantes (GALEAZZI, 2000). O projeto considerou uma taxa de duas missões a cada três anos e missões de categorias diferentes tais como Telecomunicações, Observação da Terra, Navegação e Pesquisa Científica, todas em órbitas baixas. A arquitetura da plataforma deve ser atualizada e deve considerar o suporte às cargas úteis através de serviços flexíveis e significativos. O projeto considerou o reuso pelos diversos satélites, do Centro Italiano de Controle de Pequenos Satélites. Considerou também o máximo de reuso dos equipamentos, software e know how desenvolvido, a redução de custo e a entrega de produtos recorrentes em um prazo de um ano. O conceito de plataforma fica claramente estabelecido uma vez que possui um núcleo comum onde cada particular projeto de satélite é derivado com a correspondente adaptação para a particular missão, minimização dos recursos (massa, potência etc.), uso de sistemas e tecnologias qualificadas, os componentes eletrônicos a serem utilizados são os disponíveis (MIL-STD) e o reuso de HW/SW de missões anteriores. Um ponto a destacar é o uso da Engenharia Concorrente (EC) e a filosofia bottom-up que objetiva maximizar o uso de componentes existentes, nas análises iniciais da EC. Alguns equipamentos são tratados como sim ou não (abordagem configuracional), fazem parte ou não da solução, sendo o caso do mecanismo de rotação dos painéis solares, memória de massa, propulsão, entre outros. Alguns componentes são paramétricos (abordagem escalável) tais como os atuadores do AOCS, a capacidade da bateria, entre outros, havendo algumas capacidades disponíveis que devem ser escolhidas conforme a necessidade. A vida útil da plataforma é de 5 anos, cobrindo órbitas de 500 a 1500 km de altitude e qualquer inclinação, podendo a carga útil chegar a 600 kg. Um ponto a destacar é que consideraram na concepção um centro de integração e testes de satélites capaz de trabalhar com 12 satélites simultaneamente, sem, no entanto, duplicar os meios de teste que são caros.

Gonzalez-Zugasti e Otto (2000) destacam uma das peculiaridades relevantes da área espacial para projetos baseados em plataforma quando comparada com a geração de variedades no contexto terrestre. A área espacial tem o objetivo da redução do custo de desenvolvimento, fabricação e operação através do reuso e da economia de escala e não a geração de variedades. Apresenta também como benefício a redução do risco durante o desenvolvimento e operação.

Tratando especificamente de arquiteturas satélites de comunicação, Hassan et al. (2004) analisaram o mercado de satélites de comunicação com o objetivo de tratar de estratégias de alavancagem em diversos segmentos. Os autores apresentam uma ferramenta para

desenvolver uma arquitetura de uma linha de produtos de satélites com uma abordagem de otimização multiobjetivo com algoritmo genético.

Surrey Satellite Technology Limited junto com a Universidade de Surrey e o Surrey Space Center apresentaram um artigo que descreve a plataforma denominada Costella que objetiva responder rapidamente às missões propostas (MEERMAN & SWEETING, 2006). São componentes intercambiáveis tais como sensores de atitude, unidades de propulsão, equipamentos de comunicação, cargas úteis, entre outros componentes. Não apresenta conceitos relevantes e basicamente descreve os itens da plataforma (núcleo comum) e as flexibilidades de mudança.

A PMM é um projeto do INPE (PMM-SRR, 2001) previsto à época de seu início para atender as missões (família de satélites) SSR-1, SCD-3, SSR-2 e Sabiá, sendo o primeiro o SSR-1, em órbita equatorial. A arquitetura deve considerar a adaptabilidade para atender as necessidades específicas das missões dentro da faixa operacional de parâmetros estabelecidos, entre esses destacam-se a órbita equatorial (até 15° de inclinação) entre 600 e 1200 km e órbitas Heliossíncronas para horários de cruzamento do equador de 6-8:00, 10:00 e 16-18:00. Os apontamentos podem ser para a Terra, o Sol ou inercial para qualquer outro astro. A plataforma se constitui de um paralelepípedo de 1000x1000x1000 mm, estabilizado em três eixos, com massa seca de 250 kg e com asas fotovoltaicas em duas faces opostas com dois a três painéis em cada. Não apresenta conceitos relevantes e basicamente descreve os itens da plataforma (núcleo comum), as flexibilidades de mudança, os limites operacionais e os limites da carga útil.

Como exemplos de desenvolvimento de sistemas complexos dentro do contexto aeronáutico, o conjunto de três aviões denominado Joint Strike Fighter (JSF) e a família de aviões Boeing 777. No primeiro caso um desenvolvimento em que toda a família está definida e deve-se conceber a plataforma e os três produtos baseados nesse (desenvolvimento simultâneo). No segundo caso, que é comum na aviação comercial, o desenvolvimento de aviões baseados em uma mesma plataforma é basicamente seqüencial (BOAS; CRAWLEY 2006). Um ponto importante a destacar é que nos sistemas complexos desenvolvidos sequencialmente, a plataforma e a primeira variante são geralmente desenvolvidas simultaneamente.

Um conceito introduzido no contexto espacial é o da auto-similaridade, na qual uma grande parte ou todos os componentes possuem módulos comuns com funcionalidades distintas, dando condições de se reconfigurar o sistema (SIDDIQII & DE WECK 2006).

#### **4 Elementos potenciais do método a ser desenvolvido**

Em geral, as plataformas de produtos consideram um desenvolvimento seqüencial sendo mais longo no primeiro produto (que inclui o desenvolvimento da plataforma) para depois reduzir o desenvolvimento de cada variante (BOAS & CRAWLEY 2006). Isso exige que o processo de desenvolvimento e verificação da plataforma seja avaliado em relação a alguns potenciais produtos (variantes aplicáveis aos nichos de mercado para produtos terrestres) de forma que o desenvolvimento dos outros produtos da família, tenha seu tempo e custo de desenvolvimento reduzido, recuperando o investimento inicial maior na plataforma.

No caso das aplicações espaciais, considera-se como fator determinante na recuperação do investimento, a redução do tempo de desenvolvimento uma vez que o custo significativo está na utilização de engenheiros e técnicos altamente qualificados e não no custo de produção ou dos insumos, uma vez que normalmente se produz uma ou duas unidades operacionais (de vôo). Portanto, é importante que os produtos da família de satélites sejam

desenvolvidos, fabricados e testados em tempos significativamente menores do que o de um desenvolvimento independente e bem menor que o da plataforma.

O método a ser desenvolvido na tese deve considerar a possibilidade de incorporar os aspectos descritos a seguir, de acordo com a sua influência:

- a) **Restrições do meio ambiente, classificando-as em grupos e sub-grupos** (como exemplo desses grupos há um grupo para órbitas equatoriais com uma faixa de altitude estabelecida e outro grupo para órbitas Heliossíncronas com uma faixa de horários de cruzamento do equador). Para cada grupo deve ser estabelecida uma missão de referência que será considerada como um desenvolvimento independente. A referência poderá ser considerada como fator 1 (ou 100%), considerando-se o ponto intermediário da faixa. Os subgrupos são estabelecidos por conseqüências que as órbitas acarretam. Como exemplo de subgrupo, tem-se o efeito de radiação nas órbitas equatoriais. Se a faixa de órbitas previstas pela plataforma vai de 400 a 1800 km, e a órbita de referência é 1100 km, a órbita de 1800 km está sujeita a mais radiação que a órbita de referência. A métrica, portanto, deverá dar um índice pior para uma plataforma que tivesse uma faixa grande de cobertura em relação a outra que tivesse uma faixa menor. Um outro subgrupo da órbita é o arrasto atmosférico que tem como impacto a manutenção da órbita com mais freqüência, o que implica mais propelente para uma mesma vida útil. Os pesos atribuídos a cada subgrupo devem ser considerados de acordo com o impacto que causam na configuração.
- b) **Fatores que beneficiam e prejudicam uma plataforma.** Se por um lado as faixas maiores pioram o dimensionamento eficiente da plataforma, por outra, beneficiam a abrangência de missões, devendo, portanto, serem incorporados como fatores positivos que acarretam o aumento das possibilidades de missões (faixas de órbita, apontamento, etc.).
- c) **Fatores paramétricos** (escaláveis) permitem melhorar a eficiência da plataforma e devem ser considerados na métrica, de forma que a referência não mais é um ponto central da faixa, mas um ponto central da sub-faixa.
- d) **Fatores como desacoplamento** e robustez entre os componentes comuns acarretando um mínimo de impacto provenientes dos componentes específicos. Esses fatores devem ser relacionados com o processo de desenvolvimento de forma que acoplamentos tenham um impacto no desenvolvimento e verificação.

Os fatores anteriormente listados são exemplos de possíveis fatores e como eles poderiam influenciar no método proposto. Para o desenvolvimento do método, deverá ser analisado de forma detalhada quais os fatores que devem ser realmente considerados, seu peso e como influenciam o resultado.

## 5 Conclusão

Este artigo apresentou uma visão geral da experiência em plataforma de produtos na indústria não espacial, as oportunidades presentes na indústria espacial e os elementos que devem fazer parte de um método para guiar o processo de arquitetura de plataformas para famílias de produtos espaciais, notadamente, satélites.

O método a ser desenvolvido permitirá:

- a) avaliar concepções alternativas na fase inicial do projeto, ao longo do processo de arquitetura e não ao final do mesmo;

b) comparar plataformas espaciais existentes;

c) ajustar parâmetros de abrangência e de eficiência.

Desta forma espera-se que o desenvolvimento de plataformas possa balancear, continuamente ao longo do processo de arquitetura, entre a abrangência de cobertura de missões e a sua eficiência frente a um desenvolvimento dedicado.

## Referencias

- Aerospaziale (1995).** *Filière Proteus. Octobre 1995.*
- Alary, D.; Lambert, H. (2007).** The Myriade product line, a real success story. *ACTA Astronautica* 61 223-227.
- Boas, R. C.; Crawley, E. F. (2006).** Extending Platforming to the Sequential Development of System Families. *INCOSE 2006 – 16<sup>th</sup> Annual International Symposium Proceedings.*
- Du, X.; Jiao, J.; Tseng, M. M. (2001).** Architecture of product family : Fundamentals and methodology. *Concurrent Engineering: Research and Application*, 9(4), 309-325.
- Galeazzi, C. (2000).** Prima: A new, competitive small satellite platform. *Acta Astronautica* Vol. 46, Nos. 2-6, 379-388.
- Gonzalez-Zugasti, J. P.; Otto K. N. (2000).** Platform-based spacecraft design: A formulation and Implementation procedure. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, v 1, p 455-463, 2000.
- Hassan, R.; Weck, O.; Springmann P. (2004).** Architecting a communication satellite product line. *22<sup>nd</sup> AIAA International Communications Satellite Systems Conference & Exhibit*, AIAA 2004-3150.
- Ho, T.; Tang, C. S. (1998).** *Product variety management: Research Advances.* Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Höittä-Otto, K.; Otto, K. (2006).** Platform Concept Evaluation: Making the Case for Product Platforms. *Product Platform and Product Family Design: Methods and Applications.* Springer (2006).
- INPE (2001).** Multimission Platform: Data Package for System Requirement Review.
- Jiao, J.; Pokharel, S.; Zhang, L.; Zhang, Y. (2005).** Coordination of product and process variety in mass customization with data mining approach. In *The 10<sup>th</sup> annual international conference on industrial engineering theory, applications & practice*, Clearwater Beach, FL.
- Jiao, J.; Simpson, T. W.; Siddique, Z. (2007).** Product family design and platform-based product development: a state-of-the-art review. *Journal of intelligent Manufacturing* 18:5-29.
- Landiech, P.; Douillet, F. (2004).** Proteus platform and application satellites. *Proceedings of the 4S Symposium: Small satellites, systems and Services*, September 20, 2004.
- Männistö, T. (2000).** A conceptual modeling approach to product families and their evolution. Ph.D thesis, Helsinki University of Technology, *Acta Polytechnica Scandinavica, Mathematics and Computing Series*, No. 106, Espoo.
- Martin, M. V.; Ishii, K. (2002).** Design for variety: Developing standardized and modularized product platform architectures. *Research in Engineering Design*, 13(4), 213-235.
- Meerman, M.; Sweeting, M. (2006).** Constella, a quick configuration platform for rapid response missions. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, v 2006.
- Meyer, M.; Lehnerd, A. P. (1997).** *The power of product platform – building value and cost leadership.* New York: Free Press.
- Muffatto, M.; Roveda, M. (2002).** Product architecture and platforms: A conceptual framework, *International Journal of Technology Management*, 24(1), 1-16.
- Otto, K.; Gonzalez-zugasti, J.; Dahmus, J. (2000).** Modular product architecture. In *ASME design engineering technical conferences*, Baltimore, MD.

**Pine, B. J. (1993).** Mass customization: *The new frontier in business competition*. Boston: Harvard Business School Press.

**Robertson, D.; Ulrich, K. (1998).** Planning product platforms. *Sloan Management Review*, 39(4), 19-31.

**Sawhney, M. S. (1998).** Leveraged high-variety strategies: From portfolio thinking to platform thinking. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 26(1), 54-61.

**Siddiqi, A.; Weck, O. (2006).** Self-similar modular architecture for reconfigurable space systems. 57<sup>th</sup> International Astronautical Congress, Space System Symposium.

**Simpson, T. W. ; Maier, J. R. A. ; Mistree, F. (2001).** Product platform design : Method and application. *Research in Engineering Design*, 13(1), 2-22.

**Sosa, M. E.; Eppinger, S. D.; Rowles, C. J. (2003).** The misalignment of product architecture and organizational structure in complex product development, INSEAD Working Paper, 2003/68/TM.

**Ulrich, K. (1995).** The role of product architecture in the manufacturing firm. *Research Policy*, 24(3),419-440.

**Ulrich, k.; Eppinger, S. D. (1995).** *Product design and development*. New York: McGraw-Hill.

**Ulrich, K. (1995).** The role of product architecture in manufacturing firm. *Research Policy*, 24(3), 419-440.

**Ulrich, K.; Eppinger, S. D. (1995).** *Product design and development*. New York: McGraw-Hill.

**Willcox, K.; Wakayama, S. (2003).** Simultaneous optimization of a multiple-aircraft family. *Journal of Aircraft*, 40(4), 616-622.

**Yu, J. S., Gonzalez-zugasti, J. P.; Otto, K. N. (1999).** Product architecture definition based upon customer demands. *ASME Journal of Mechanical Design*, 121(3), 329-335.

**Yu, T. -L.; Yassine, A. A.; Goldberg, D. E. (2003).** A genetic algorithm for developing modular product architectures. In *ASME design engineering technical conferences*, Chicago, Illinois.

**Zamirowsky, E. J.; Otto, K. N. (1999).** Identifying product portfolio architecture modularity using function and variety heuristics. In *ASME design engineering technical conferences*, DETC99/DTM-876, Las Vegas, NV.