

O USO DA ENGENHARIA SIMULTÂNEA BASEADA EM CONJUNTOS DE POSSÍVEIS SOLUÇÕES (SBCE) PARA O PROJETO DE NOVOS PRODUTOS E DE PROCESSOS DE MANUFATURA

Henrique Martins Rocha, prof.henrique_rocha@yahoo.com.br¹

Maurício César Delamaro, delamaro@feg.unesp.br²

Ligia Maria Fonseca Affonso, ligia.affonso@yahoo.com.br³

Uálison Rébula de Oliveira, ualisonrebula@id.uff.br⁴

Valter Silva Ferreira Filho, valterfilho8@yahoo.com.br⁵

¹AEDB-FER e UERJ-DENP, Av. Darci Ribeiro no. 2535, Resende/RJ, 27.523-000,

²UNESP-FEG, Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá/SP, 12.516-410,

³UNIFOA, Av. General Affonseca, 1026/104, Resende/RJ, 27.520-173,

⁴UFF, Rua Desembargador Ellis Hermydio Figueira nº 783 Campus Aterrado, Volta Redonda/RJ, 27.215-350,

⁵UFRRJ, Rua Doutor Cunha Ferreira, 33 - Centro, Resende/RJ, 27.511-230.

Resumo: O artigo analisa as bases conceituais da engenharia simultânea baseada em conjuntos de possíveis soluções (SBCE) e sua aplicação no projeto de novos produtos e processos, conciliando as bases do Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) com o Projeto para Manufatura e Montagem (DFMA), de forma a aumentar a confiabilidade e chances de sucesso de tais áreas de conhecimento. O SBCE diferencia-se da Engenharia Simultânea “convencional”, pelo fato desta última buscar obter no menor tempo possível o consenso dos envolvidos sobre os conceitos de produtos e processos. O SBCE, ao contrário, se baseia no desenvolvimento paralelo de diversos conceitos de projeto, manufatura e montagem, com a quantidade de opções se reduzindo ao longo de um processo iterativo, com a aproximação do prazo limite. O esforço adicional do desenvolvimento paralelo é compensado pelo elevado potencial de ganhos para a organização desenvolvedora por prevenir o abandono prematuro de ideias, reduzir os riscos de desenvolvimento e retrabalhos e, em última instância, tempo e custo de desenvolvimento. A pesquisa desenvolveu-se, inicialmente, na forma bibliográfica exploratória, seguida de pesquisa de campo no centro de desenvolvimento de uma montadora instalada na região Sul Fluminense. Foram levantadas as bases matemáticas que justificam a prática da empresa de desenvolver três conceitos (três ideias) para cada mecanismo ou detalhe de projeto, identificando-se a redução substancial na probabilidade de se necessitar de redesenhos, ao serem desenvolvidos os múltiplos conceitos. Foi desenvolvido um modelo matemático que permite estabelecer por meio do Solver/Excel, a quantidade ótima de conceitos que devem ser desenvolvidos, bem como os limites de uso do SBCE, visando maximizar os ganhos nos processos de desenvolvimento de novos produtos e processos, tratando-se de um modelo que pode ser replicado em diversas organizações que busquem maximizar seus retornos sobre investimentos em desenvolvimento.

Palavras-chave: SBCE, desenvolvimento de produtos, processos de produção, DFMA, postergação.

1. INTRODUÇÃO

No atual ambiente de rápida mudança e severa competição (Alvan e Aydin, 2009), o processo de desenvolvimento de produtos (PDP) precisa ser eficiente e eficaz, de forma a garantir que a organização alcance e mantenha uma posição estratégica frente à pressão dos competidores e do Mercado (Quintella e Rocha, 2005; Rocha et al., 2010; Rocha e Delamaro, 2007, 2011; Varandas Jr. e Miguel, 2012). Para Cooper (1994), Calantone, Vickery e Droge (1995) e Shulman (2003), novos produtos são fator primordial nos resultados financeiros e de mercado das organizações.

Uma das ferramentas utilizadas para avaliar e aperfeiçoar os projetos é o DFMA (*Design for Manufacturing and Assembly*, ou Projeto para Manufatura e Montagem), por meio da qual se busca simplificar ao máximo o projeto, eliminando o que não for estritamente necessário às funções a serem desempenhadas pelo produto que está sendo desenvolvido, além de buscar melhorar a manufaturabilidade do produto em si e de seus componentes, influenciando diretamente os custos de produção. Trata-se, no entanto, de um desafio conciliar a crescente complexidade funcional dos produtos com a simplificação de seu conceito construtivo. Ideias e conceitos são constantemente criados, propostos e testados nessa busca constante pela qualidade no desenvolvimento de novos produtos, com eventuais ciclos de tentativa e erro que consomem valiosos recursos das organizações.

O presente artigo aborda o uso dos princípios do pensamento enxuto no desenvolvimento de produtos automotivos, em especial, a utilização do *Set-based Concurrent Engineering* (ou Engenharia Simultânea Baseada em Conjuntos de Possíveis Soluções - SBCE) para a escolha da concepção de produtos e processos, o qual “ênfatiza o desenvolvimento paralelo de opções de soluções” (Rozenfeld et al, 2006), levando à flexibilidade e robustez no desenvolvimento.

2. JUSTIFICATIVA E OBJETIVO

A fase de projeto representa somente 5% dos custos totais do desenvolvimento de um produto, mas fixa cerca de 70% a 80% dos custos operacionais (Miller, 1993; Muniz Jr., 2010). No entanto, segundo Hoolins e Pugh (1990), a mortalidade, desde a ideia básica até se chegar a um produto lucrativo, é de 95%. Duber-Smith e Black (2012) confirmam que a taxa de sucesso de novos produtos é de 10% ou menos, ao passo que pesquisa realizada junto a 500 empresas nos anos 90 pelo Design Council da Inglaterra, mostrou que de cada dez ideias sobre novos produtos, três serão desenvolvidas, 1,3 será lançada no mercado e apenas uma será lucrativa (Baxter, 2003). Tal pesquisa mostrou que somente 45% das empresas conseguiam manter os custos de produção dentro das previsões e que somente 49% conseguiam lançar seus produtos no tempo programado: em média, os produtos custavam 13% acima do orçado e eram lançados com seis meses de atraso. Já Van Kleef (2006) mostrou que as taxas de falha ou insucesso no desenvolvimento de novos produtos variaram entre 25 e 67%.

Justifica-se, desta forma, a pesquisa executada, a qual tem como objetivo a exploração das bases teórico-conceituais do SBCE e sua aplicação prática no PDP, permitindo estabelecer um modelo matemático para identificar a quantidade ótima de conceitos que devem ser desenvolvidos simultaneamente, bem como os limites de uso do SBCE, visando maximizar os ganhos nos processos de desenvolvimento de novos produtos.

O estudo tem relevância pelo fato de ter sido apontada por Ward et al (1995) a ausência de metodologia para aplicação do SBCE, bem como suas relações de causa e efeito com o desempenho das organizações: ainda que estudos quantitativos tenham sido desenvolvidos, incluindo o uso de opções reais (Ford e Sobek II, 2005; Shafer e Sorensen, 2010) e métodos Bayesianos (Shahan e Speepersad, 2009), não foi localizado estudo que apontasse a identificação de quantidade ótima de conceitos a serem desenvolvidos no SBCE, ainda que os estudos de Dahan (1998) e Shafer e Sorensen (2010) tenham se aproximado, ao focar na quantidade ótima de protótipos a serem desenvolvidos.

3. MÉTODO DE PESQUISA

A pesquisa ocorreu na forma bibliográfica e de campo, seguido de desenvolvimento de modelo computacional, de forma a identificar a sensibilidade das variáveis envolvidas no SBCE, com a contribuição esperada de identificar práticas, ferramentas, técnicas, métodos e mecanismos que permitam aumentar a chance de sucesso no PDP por meio do uso do SBCE.

Ao longo de um período de cinco meses, as atividades de desenvolvimento de produtos foram acompanhadas pelos autores, interagindo diretamente com desenhistas-projetistas, engenheiros de desenvolvimento e de manufatura, supervisores e com o Gerente de Conceito do Centro de Desenvolvimento de uma fábrica de veículos comerciais instalada na região Sul Fluminense. Houve o acompanhamento de reuniões técnicas do desenvolvimento de produtos e os achados foram comparados com a fundamentação teórica do SBCE.

A prática da empresa de desenvolver três diferentes conceitos para cada detalhe de projeto teve seu fundamento matemático explorado: utilizando uma planilha eletrônica (Excel) e seu complemento Solver, foi possível estabelecer a quantidade ótima de conceitos a serem desenvolvidos para uma situação real de desenvolvimento de produto. A partir do modelo desenvolvido, foram feitas 5.000 simulações, para análise de sensibilidade do ganho esperado, tendo por base as variáveis “quantidade de conceitos”, “taxa de acerto” e “quantidade de áreas desenvolvidas”.

4. INFORMAÇÕES SOBRE A EMPRESA ALVO DO ESTUDO

Com uma população de aproximadamente 4.500 pessoas e capacidade de produção de 300 unidades por dia, a unidade se transformou em uma referência mundial com a criação do Centro Mundial de Desenvolvimento dos Caminhões e Ônibus, um espaço de pesquisas e criação de novos modelos, e também de desenvolvimento de novas tecnologias embarcadas nos produtos. Os resultados do trabalho deste centro são compartilhados com engenheiros da Alemanha e aplicados em veículos produzidos pela empresa em outros lugares do planeta: nos últimos anos, o *know-how* adquirido no Brasil foi levado para plantas inauguradas no México e na África do Sul.

Justifica-se tal escolha, também, pela relevância da citada empresa, a qual é tema de estudo de diversos autores (Abreu, Beynon e Ramalho, 2000; Abreu et al., 1999; Baldwin e Clark, 1997; Beynon e Ramalho, 1999; Camuffo, 2002; Carrincazeaux e Lung, 1997; Carvalho, 1997; Collins, Bechler e Pires, 1997; Correa, 2001; Kubo, Silva e Lima, 2006; Marx, Zilbovicius e Salerno, 1997; Oliveira, Marins e Rocha, 2006; Oliveira e Rocha, 2005; Pires, 1998; Resende et al., 2002; Salerno, Dias e Zilbovicius, 1999; Salerno, Camargo e Lemos, 2008; Salerno e Zilbovicius, 1997; Doran e Hill, 2009), por conta de seu modelo de Consórcio Modular, no qual os parceiros da empresa mãe atuam diretamente na linha de montagem do produto final, dividindo não só o espaço físico, mas também responsabilidades.

5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Boothroyd, Dewhurst e Knight (1989) definem o DFMA como um guia para eliminar peças e processos desnecessários, estabelecendo uma abordagem de engenharia simultânea que reduz o tempo, custo e quantidade de mudanças no desenvolvimento de produtos. O DFMA é, de fato, separado em duas abordagens: o projeto para manufatura (DFM) e o projeto para montagem (DFA). A primeira, voltada a processos de conformação mecânica e a usinagem, propõe que sejam eliminados processos onerosos e desnecessários, em especial operações secundárias, optando por sequências de manufatura mais curtas e explorando as características de usinabilidade e uso de materiais mais facilmente processáveis. Alguns exemplos são espaçar perfurações, prever generosos ângulos de saída de ferramentas e raios em geral, usar filetes para facilitar preenchimentos aonde aplicável, evitar cantos vivos, etc.

O DFA, por outro lado, foca na simplicidade do produto, pela minimização da quantidade dos componentes, e na facilidade de manuseio e montagem. A teoria (Boothroyd, Dewhurst e Knight, 1989) prevê que componentes só devem existir pela: 1) Necessidade de movimento relativo com outros componentes; 2) Necessidade de material diferente; e/ou 3) Necessidade de acesso e/ou desmontagem. Componentes que não se enquadrarem em, ao menos, uma dessas características seriam candidatos à eliminação e uma das formas de se mensurar a eficiência do projeto e comparar a quantidade de componentes do produto com o número ideal destes componentes. Fixadores, como parafusos, porcas, rebites, etc., são usuais candidatos à eliminação.

Conforme Baxter (2003), quando se quer reduzir o custo de um produto, é possível pensar em reduzir o seu tamanho, eliminar alguns acessórios ou substituir alguns componentes por outros mais baratos; contudo, dificilmente ocorre a idéia de rearranjar os componentes para simplificar a montagem. Diminuir as dificuldades de transporte, manipulação e montagem dos componentes prevê ações como facilitar alinhamento, inserção e encaixe por meio de arredondamentos, chanfros ou guias, simetria (ou assimetria exagerada, se necessário) e adequação da geometria dos componentes para reduzir a possibilidade de enganchar peças, manusear componentes muito pequenos, permitir a montagem unidirecional, facilidade de visualização, etc., além de eliminar ajustes.

O DFMA prevê, desta forma, a melhoria do projeto pela melhoria do conceito dos componentes do produto. Cada componente, se não pode ser eliminado ao combinar-se com outros componentes, é redesenhado, buscando melhorar sua manufaturabilidade e montabilidade. Conceitos são constantemente substituídos por outros, na busca dessa melhoria, havendo, no entanto, a preocupação de garantir a funcionalidade do produto. A Engenharia Simultânea torna-se uma aliada no processo de desenvolvimento: busca-se obter o consenso dos envolvidos (como as Engenharias de Produto e Manufatura, Produção, Qualidade, Assistência Técnica, etc.) sobre os conceitos de produtos e processos, por meio da recriação e descarte de ideias, que são substituídas por “algo melhor”, até que se chegue a um único conceito para o produto, supostamente o melhor que poderia ser obtido em termos de funcionalidade e condições de produção.

Ao contrário deste afinilamento de ideias, a abordagem de múltiplos conceitos durante o desenvolvimento é também utilizada: Krishnan e Bhattacharya (2002) estudaram o desenvolvimento de produtos na situação de incerteza tecnológica, quanto a decisão entre utilizar uma tecnologia robusta e comprovada ou optar pela seleção de uma tecnologia ainda incerta, porém com possibilidade de alavancagem competitiva do produto. Através do uso de fórmulas estocásticas, os autores desenvolveram modelos que permitem avaliar, com base nas margens esperadas pelo uso da nova tecnologia, impacto pelo atraso do desenvolvimento, demanda esperada, custo e tempo total esperado, estabelecer o ponto ótimo para decisão de tecnologia, permitindo minimizar os riscos e maximizar o valor esperado no processo de desenvolvimento do produto, prevenindo também a redundância no desenvolvimento (ambas as tecnologias simultaneamente), comparando o acréscimo de custo com o aumento de valor esperado e a redução de riscos. Modelos estocásticos para melhoria dos PDPs foram também desenvolvidos por Adler et al. (1995), Bhuiyan, Gerwin e Thomson (2004), Kleyner (2005) e Lee e Suh (2008).

Segundo MacCormack, Verganti e Iansiti (2001), a incerteza e o ambiente dinâmico representam desafios fundamentais para os modelos aceitos de desenvolvimento de novos produtos e propõem maiores investimentos no desenvolvimento da arquitetura, junto ao constante *feedback* durante as diversas fases de desenvolvimento (com possíveis alterações advindas destes) e constante flexibilidade no produto. Tais práticas são vantajosas em ambientes altamente mutáveis, desde que se utilizem conceitos de intercambialidade tecnológica em plataformas e arquiteturas robustas: segundo os autores, diversos excelentes projetos sofreram inúmeras alterações nas fases finais de desenvolvimento, por meio do uso de um modelo flexível em um ambiente que apresenta altos níveis de incerteza, conceito também defendido por Camargo Jr e Yu (2007) e Qudrat-Ullah, Seong e Mills (2012).

Conforme Ferreira e Alcântara (2008), “a remodelagem do produto e do processo, a fim de retardar o ponto de diferenciação do produto para mais próximo da demanda, aumentam a flexibilidade para lidar com as variações do mercado”, conceito também defendido por Chen e Iyigun (2004). Ward (2007) identificou, dentre as possíveis formas de perdas em PDP, a mentalidade otimista, caracterizada pela seleção prematura, experimentação e questionamentos inadequados, destacando que os processos tradicionais frequentemente tomam decisão sem base em dados. Tal preocupação dá a base fundamental para a denominada Engenharia Simultânea Baseada em Conjuntos de Possíveis Soluções (Set-based Concurrent Engineering – SBCE), abordada por Sobek II, Ward e Liker (1999), e que já se encontrava implícita nos estudos de Pugh (1991), no modelo de convergência controlada, em que diversos conceitos eram gerados, comparados e davam origem a adicionais conceitos, enquanto conceitos mais “fracos” eram eliminados. Tal processo de desenvolvimento, com postergação de decisões e na liberação de especificações, elevado número de protótipos e a ausência de preocupação em “fazer certo da primeira vez”, parece ser caro e altamente ineficiente (Ward et. al., 1995). No entanto, análogo a uma reunião em que cada membro que não possa participar na data e horário definido faz que surja nova proposta de dia/horário, a qual precisa ser novamente submetida aos demais, o conceito de

conjunto de possíveis soluções - cada membro informar suas disponibilidades -, torna-se mais rápido e eficiente, por meio da identificação das interseções entre as disponibilidades.

Sobek II, Ward e Liker (1999) relatam que o objetivo do SBCE é evitar o abandono prematuro de boas idéias, para garantir uma eficiência do planejamento e, também, reduzir os riscos e o retrabalho e a sensação de “correr atrás do planejamento”, reduzindo, na prática, o tempo de desenvolvimento. Morgan e Liker (2006) relatam que a abordagem SBCE é “baseada no Diagrama de Venn, na qual a faixa aceitável da solução do projeto situa-se na intersecção entre a capacidade do produto, alternativas de processo e alternativas de solução”, num processo iterativo que envolve as diversas funções de engenharia, manufatura e marketing (Sobek II, Liker e Ward, 1998): as comunicações cobrem conjuntos de alternativas, tanto no nível conceitual quanto paramétrico (Ward et al., 1995).

Costa e Sobek II (2003), Eisto et al. (2010), Khan et al. (2011), Rekuc et al. (2006) e Ward et al. (1995) descrevem a base do SBCE: considerar alternativas de conceito desenvolvidas em paralelo, eliminando as mais fracas somente com a aproximação do prazo limite, de tal forma que decisões são propositalmente postergadas, sobrepondo atividades de desenvolvimento, em contraste com o modelo tradicional de desenvolvimento que “afunila” as opções por meio das tomadas de decisão no desenvolvimento, determinando (e “congelando”) o conceito nas fases iniciais de desenvolvimento. Ainda que pareça contraintuitivo (Liker e Morgan, 2006; Liker et al., 1996) e ineficiente (Ward et al., 1995), o SBCE previne o abandono prematuro de ideias, de tal forma que os riscos de desenvolvimento são reduzidos devido à redundância, robustez e absorção do conhecimento (Kennedy, 2003), reduzindo retrabalhos, *loopings* e tempo de desenvolvimento.

Abordando o desenvolvimento de produtos na Toyota, May (2007) defende que a definição da melhor opção nunca deveria ocorrer antes de todas as possibilidades terem sido identificadas: informações incompletas, não definitivas, são passadas aos fornecedores, que apresentam uma gama de soluções e, junto com a montadora, vão descartando as alternativas que se mostram menos viáveis. A lógica é a de trabalhar com um portfólio de ideias, ao invés de arriscar-se com somente uma. Ward et al. (1995) e Souza e Borsato (2011) identificaram que o PDP da Toyota requer uma menor quantidade de homens-ano de trabalho que o PDP tradicional.

Nahm e Ishikawa (2005a; 2005b) aprofundaram o uso do conceito do SBCE, integrando ao mesmo técnicas de *meta-modelling*, lógica fuzzy, *design of experiments* (DoE), técnicas de *robust design* e análise de incerteza. Inoue, Nahm e Ishikawa (2011) propuseram a incorporação das preferências do desenvolvedor para gerar os múltiplos conceitos. Schäfer e Sorensen (2010), estudando o PDP na área automotiva, identificaram que, sob determinadas circunstâncias, o uso de múltiplos conceitos em paralelo trás grande retorno sobre os investimentos feitos. Spahi e Hosni (2009) identificaram um nível ótimo de customização do projeto, estabelecendo uma solução ótima quanto ao balance entre customização de projetos e objetivos estratégicos das empresas.

6. ABORDAGEM EMPÍRICA: USO DO SBCE EM UMA FÁBRICA DE VEÍCULOS COMERCIAIS

A área de Conceituação da empresa estudada adota como prática de trabalho o desenvolvimento de três conceitos (três ideias) para cada mecanismo ou detalhe de projeto. Tal conceito, que, a princípio poderia indicar o uso maior de recursos do que o necessário e, conseqüentemente, um tempo maior de desenvolvimento (ou seja, por que desenhar três vezes a mesma coisa?), apresenta, ao contrário, uma lógica robusta e que permite o ganho substancial no tempo e na utilização de recursos, conforme exemplo apontado por Rocha, Delamaro e Affonso (2011): na hipotética situação de haver 90% de acerto nas ideias em um produto que contasse com 50 variáveis (ou seja, 50 itens que precisassem de um conceito próprio), a probabilidade de ter-se o desenvolvimento do produto sem erros, visto que todas as ideias teriam de funcionar a contento para que o conceito do produto não tivesse qualquer falha, seria de $0,9^{50} = 0,5145\%$, ou seja, há uma probabilidade de aproximadamente 99,5% do projeto precisar ser redesenhado em algum(ns) ponto(s).

Nesta mesma situação, caso fossem elaborados três conceitos diferentes para cada uma das variáveis, a probabilidade de que as três ideias viessem a falhar (com a premissa de 90% de acerto) seria de $0,1^3 = 0,1\%$. Isso significa, portanto, que haveria uma probabilidade de 99,9% de que pelo menos uma das ideias funcionasse a contento (escolher-se-ia, então, a melhor delas: mais robusta, mais fácil de implementar, mais barata, etc.), havendo, a princípio, um pequeno incremento sobre os 90% iniciais.

No entanto, consideradas as diversas áreas de desenvolvimento, há um ganho substancial em termos de confiabilidade no resultado esperado do desenvolvimento: considerando-se as mesmas 50 áreas que necessitassem de um novo conceito, a probabilidade de ter-se o desenvolvimento do produto sem erros passa a ser de $0,999^{50} = 95,1206\%$, ou seja, há uma probabilidade de menos de 5% do projeto precisar sofrer correções e redesenho, nesta situação hipotética, aumentando em 185 vezes as chances de sucesso (ou seja, passando de 0,51% para 95,1%).

No entanto, é razoável considerar o esforço adicional (ainda que justificável) de gerar três diferentes conceitos para cada área, com base na afirmação de Baxter (2003) de que “deve-se estabelecer um compromisso entre os fatores que adicionam valor ao produto e aqueles que provocam aumento de custo”. Isso poderia ser feito dividindo-se tal valor por três, caracterizando um “ganho por unidade de esforço de criação e desenvolvimento”. Rocha, Delamaro e Affonso (2011) deduziram a equação para cálculo do ganho, tendo por base tal esforço adicional (por limitações de espaço, a equação não será discutida no presente artigo):

$$G = 10 \log \frac{(1 - (1 - T_a)^c)^n}{T_a^n c} \quad (1)$$

Sendo:

G → ganho pelo uso de múltiplos conceitos (por unidade de esforço);

Ta → Taxa de acerto, ou seja, de sucesso, das ideias;

c → Quantidade de ideias geradas para cada conceito;

n → Quantidade de conceitos do projeto.

Substituindo-se os valores hipotéticos apresentados, tem-se:

$$G = 10 \log \frac{(1 - (1 - 0,9)^3)^{50}}{0,9^{50} 3} = 17,89$$

Analisando o uso de múltiplos conceitos na empresa estudada, tomar-se-á uma situação de real desenvolvimento, utilizando para tal o exemplo apresentado por Silva, Servilheira e Valim (2010), no qual o novo produto a ser desenvolvido baseia-se em plataforma existente e, visando atender necessidades específicas de determinado nicho de mercado, se mostram necessárias mudanças no motor, sua alimentação e sistema de transmissão de força (cardan, eixo, etc.), nova posição de freio, bem como novo chassi, etc. Estimou-se inicialmente um total de doze novos conceitos a serem desenvolvidos, quantidade compatível com as faixas estimadas pelos líderes de desenvolvimento, quais sejam: Baixa complexidade (2 a 4 conceitos); Média complexidade (10 a 20 conceitos); e Alta complexidade (20 a 60 conceitos). Observa-se que tais estimativas referem-se a conceitos e não número (quantidade) de componentes.

No exemplo tem-se: $c = 3$; e $n = 12$. Para Ta, pode-se, como aproximação inicial, utilizar as estatísticas de Baxter (2003) anteriormente citadas: “De cada dez ideias sobre novos produtos, três serão desenvolvidas, 1,3 será lançada no mercado e apenas uma será lucrativa”. A proporção de 1,3 em cada três representa uma taxa de acerto de 43,3%.

Calculando o ganho com os valores em questão, encontra-se $G = 28,34$, resultado bastante significativo e que respalda, dentro das premissas estabelecidas, a vantagem do desenvolvimento de múltiplos conceitos. Sendo a quantidade de ideias a serem geradas para determinado conceito, uma decisão da empresa ou do gerente responsável pelo desenvolvimento, verificou-se por meio do Solver do Excel qual seria a quantidade ótima de conceitos na situação estudada: constatou-se que sete conceitos seria a quantidade ótima, com $G = 34,14$. Tal resultado deve ser analisado sob uma perspectiva conservadora, já que o senso comum indica que a tarefa de desenvolver sete ideias diferentes para cada área de conceito parece ser excessiva. A variação do ganho, com base na quantidade conceito, como pode ser visto na Fig. (1), permite uma melhor compreensão desse cenário.

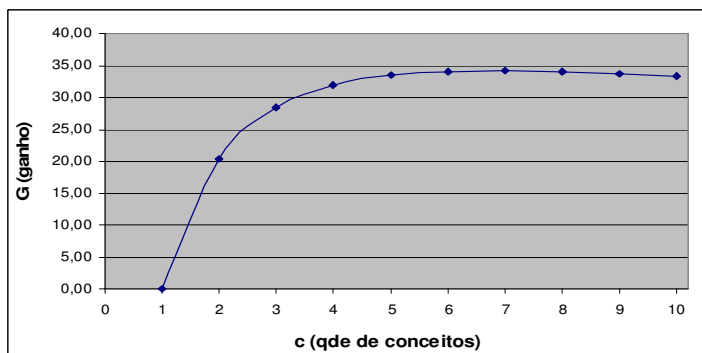


Figura 1. Ganho em função da quantidade de conceitos.

Percebe-se um forte crescimento do ganho quando a quantidade de conceitos passa a dois e três, desacelerando rapidamente após isso. Tais achados ressaltam a importância de realizar a análise de sensibilidade do ganho às variáveis “Ta”, “c” e “n”. Uma simulação com 5.000 “rodadas” foi realizada, adotando os seguintes limites:

- $20\% \leq Ta \leq 90\%$, uma vez que valores fora desses limites seriam bastante improváveis;
- $2 \leq c \leq 10$, justificada pelo fato de que deve haver pelo menos dois conceitos diferentes (ideias) para cada área, enquanto 10, a princípio, parece ser excessivo. Note-se que Sobek II, Ward e Liker (1999) relatam o uso pela Toyota de até 20 conceitos diferentes para estilo de carroceria, sendo, no entanto, apontado pelos autores como uma situação extrema e não um valor médio;
- $2 \leq n \leq 30$, com base nos valores apontados anteriormente, conforme o nível de complexidade dos projetos da área automotiva, ou seja, 2 a 4 sendo baixa; 10 a 20, média, e, de 20 a 60, alta complexidade.

Os resultados das rodadas de simulação são discutidos a seguir.

Como pode ser visto na Fig. (2), o ganho potencial (G) é reduzido com o aumento da taxa de acerto “Ta”, podendo, em casos extremos, até mesmo apresentar um resultado negativo. Tal constatação está alinhada com a afirmação de Sobek II, Ward e Liker (1999) de que os custos de eliminação dos *loopings* de desenvolvimento possam não se justificar em determinadas situações. Calculado o coeficiente de correlação entre “Ta” e “G”, com base nos resultados

da simulação, obtém-se o valor de -0,66, reforçando a ideia que a utilização de múltiplos conceitos não é vantajosa quando a taxa de acerto é elevada.

A análise de sensibilidade “G” para “c” na Fig. (3) mostrou resultados bastante semelhantes aos da Fig. (1): com o aumento de “c”, “G” inicialmente aumenta rapidamente, declinando a partir da faixa de 4 - 6 conceitos, ao passo que é perceptível na Fig. (4) que o aumento da complexidade do projeto, ou seja, da quantidade de áreas que requerem o desenvolvimento de novos conceitos, torna cada vez mais vantajoso o desenvolvimento de múltiplos conceitos. Calculado o coeficiente de correlação entre as variáveis “n” e “G”, com base nos resultados da simulação, encontra-se o valor de +0,64, bastante significativo se levado em consideração o fato de “n” ser uma variável discreta.

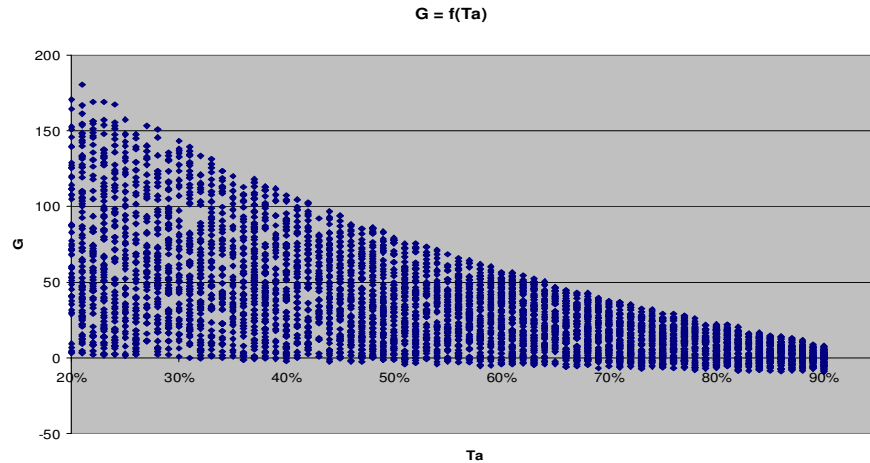


Figura 2. Ganho em função da taxa de acerto.

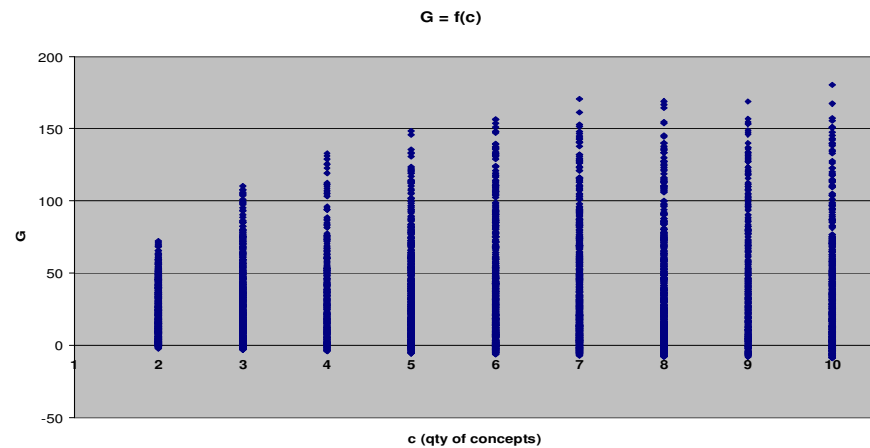


Figura 3. Ganho em função da quantidade de conceitos.

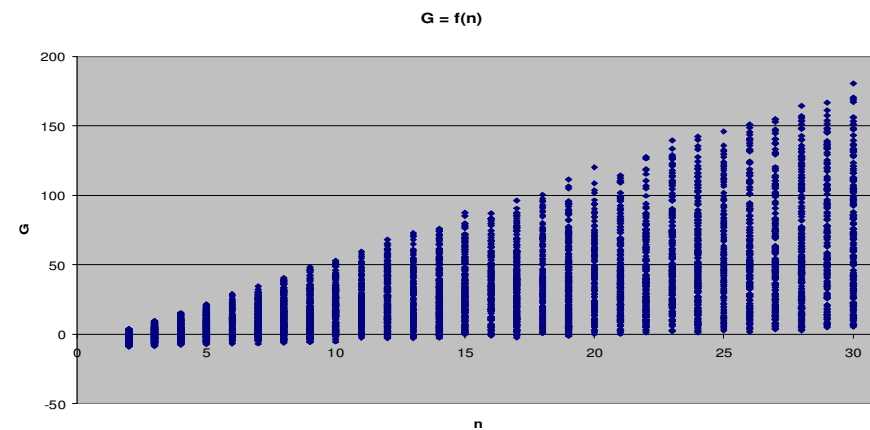


Figura 4. Ganho em função da complexidade do projeto (quantidade de áreas de desenvolvimento).

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente artigo explorou-se o conceito do SBCE no projeto de produtos e processos de manufatura: ao contrário da prática usual de definir o mais cedo possível o conceito, constatou-se que o desenvolvimento de múltiplos conceitos e a postergação na decisão de escolha dentre as opções, ainda que não intuitivo, mostra ganhos consideráveis por meio do aumento substancial da chance de acerto e permite reduções no tempo e custo de projeto do produto e dos processos, reduzindo retrabalhos e *loopings* no desenvolvimento.

Foi desenvolvido um modelo matemático que permitiu, por meio de cálculos de otimização, estabelecer a quantidade ótima de conceitos a serem desenvolvidos para cada mecanismo ou detalhe de projeto, tendo por base a complexidade do produto a ser desenvolvido (quantidade de áreas/sistemas que requerem desenvolvimento) e a taxa de acerto do time de projeto. A obtenção de tal informação, no entanto, pode ser complexa, visto que as empresas registram, tão somente, as taxas de sucesso (ou fracasso) de projetos, ou seja, consideram em conjunto inúmeras variáveis (internas e externas) de forma global, ao invés de mensurar uma taxa média de acerto (ou sucesso) para cada área do projeto/produto que requeira desenvolvimento. Adotando-se uma taxa de acerto baseada em estudos generalistas (Baxter, 2003), constatou-se, numa situação real de desenvolvimento de um veículo comercial, que a quantidade de três a cinco conceitos desenvolvidos simultaneamente seria a ideal.

Constatou-se que o SBCE permite ganhos de custo, tempo e confiabilidade no desenvolvimento de produtos e processos, ainda que seu uso apresente alguns limites: para um time de desenvolvimento que apresente um histórico de altas taxas de acerto, os ganhos podem desaparecer, uma vez que o esforço adicional para desenvolver mais do que um conceito não se justifique, corroborando com os estudos de Camargo Jr. e Yu (2007).

Identificou-se, também, não ser vantajoso o uso do SBCE para projetos simples: quanto maior a quantidade de áreas que exigem novos conceitos em um projeto de produto, maior é o ganho potencial pelo uso de múltiplos conceitos. Desta forma, simples aperfeiçoamentos e/ou projetos sobre os quais se tenha pleno domínio tecnológico devem ser desenvolvidos na forma tradicional. O SBCE oferece grandes vantagens no desenvolvimento de projetos de média e alta complexidade.

Como trabalhos futuros, o incremento no esforço para elaboração de conceitos adicionais deveria ser estudado, visto que no presente estudo utilizou-se a premissa de que o esforço para desenvolvimento de um conceito é uma variável independente da quantidade de conceitos já desenvolvidos, ou seja, que o desenvolvimento de mais um conceito requer o mesmo nível de esforço necessário para o desenvolvimento do conceito anterior.

Os achados do presente artigo poderão ser utilizados por qualquer organização que busque maximizar os retornos sobre investimentos feitos em desenvolvimento de novos produtos e processos. No entanto, deverão ser levantadas as taxas históricas de acerto/erro em indústrias específicas, tornando mais robusta a análise e a definição da quantidade ótima de conceitos a serem desenvolvidos. Recomenda-se, também, aprofundar as análises de custo-benefício no que tange o efeito do tempo (atrasos) no *time-to-market* dos produtos e eventuais perdas de oportunidades.

8. REFERÊNCIAS

- Abreu, A., Beynon, H. e Ramalho, J.R., 2000, "The dream factory – VW's modular production system in Resende, Brazil", *Work, Employment and Society*, Vol. 14, No 2, Cambridge, UK.
- Abreu, A., Gitahy, L., Ramalho, J.R. e Ruas, R., 1999, "Industrial restructuring and inter-firm relations in the auto-parts industry in Brazil", *Occasional Papers 20*. Institute of Latin American Studies, University of London.
- Adler, P.S., Mandelbaum, A., Nguyen, V. e Scherer, E., 1995, "From project to process management: an empirically-based framework for analyzing product development time", *Management Science*, v.41, n.3, pp.458-484.
- Alvan, A. e Aydin, A. O., 2009, "The effects of mass customisation on productivity", *International Journal of Mass Customisation*, Vol. 3, No. 1, pp.58–81.
- Baldwin, C.Y. e Clark, K.B., 1997, "Managing in the age of modularity", *Harvard Business Review*, v.75, n.5, pp.84-93.
- Baxter, M., 2003, "Projeto de produto: guia prático para o design de novos produtos", 2. ed, Edgard Blücher, São Paulo, Brazil, 272 p.
- Beynon, H. e Ramalho, J.R., 1999, "The transformation of the automobile sector in Brazil - a new way of producing cars?", *Conference Approaches to Varieties of Capitalism*. CRIC, ESRC, University of Manchester.
- Bhuiyan, N., Gerwin, D. e Thomson, V., 2004, "Simulation of the new product development process for performance improvement", *Management Science*, v.50, n.12, pp.1690-1703.
- Boothroyd, G., Dewhurst, P. e Knight, P., 1989, "Product Design for Manufacture and Assembly", CRC Press, Boca Raton, USA, 670p
- Calantone, R., Vickery, S. e Droge, C., 1995, "Business performance and strategic new product development activities: an empirical investigation", *Journal of Product Innovation Management*, Vol.12, pp.214-223.
- Camargo Jr., A.S. e Yu, A.S.O., 2007, "Engenharia simultânea: uma comparação entre as estratégias set-based e point-based", *Revista de Administração (FEA-USP)*, Vol.42, No.3, pp. 326-337.
- Camuffo, A., 1997, "Rolling out a 'world car': globalization, outsourcing, and modularity in the auto industry", *Department of Business Economics and Management*, Ca'Foscari University of Venice, Italy.

- Carrincazeaux, C. e Lung, Y., 1997, "La proximité dans l'organisation de la conception des produits de l'automobile", Actes du GERPISA, n. 19, Paris, France.
- Carvalho, R.Q., 1997, "Restructuring and globalization in the Brazilian automobile industry", GERPISA Conference, Paris, France, Anais...
- Chen, M. e Iyigun, M., 2004, "Generating market power via strategic product development delays", Econometrics Society Summer Meeting, Providence, Rhode Island, USA.
- Collins, R., Bechler, K. e Pires, S., 1997, "Outsourcing in the Automotive Industry: from just in time to modular consortia", European Management Journal, v. 15, n. 5, pp. 498-508.
- Cooper, R.G., 1994, "Debunking the myths of new product development", Research Technology Management, Vol.37, i.4, pp.40-50.
- Correa, H.L., 2001, "The VW Resende (Brazil) plant modular consortium SCM model after 5 years of operation", Proceedings of the International Conference of the Operations Management Society, Orlando, USA. Disponível em <http://www.correa.com.br/biblioteca/artigos/A06_Correa_The_VW_Resende_etc_POMS2001.pdf>. Acesso em 25 dez 2008.
- Costa, R. e Sobek II, D.K., 2003, "Iteration in engineering design: inherent and unavoidable or product of choices made?", Proceedings of DETC'03, ASME 2003 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Chicago, Illinois USA.
- Dahan, E., 1998, "Reducing technical uncertainty in product and process development through parallel design of prototypes", Working Paper, Stanford University, Stanford, USA.
- Doran, D. e Hill, A., 2009, "A review of modular strategies and architecture within manufacturing operations", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering. Professional Engineering Publishing, Vol. 223, No. 1, pp.65-75.
- Duber-Smith, D.C. e Black, G., 2012, "The Process of Product Development", GCI - Beauty Business, Brand Impact, i. Apr 2012.
- Eisto, T., Hölttä, V., Mahlamäki, K., Kollanus, J. e Nieminen, M., 2010, "Early supplier involvement in new product development: a casting-network collaboration model", World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 62, pp. 856-866.
- Ferreira, K.A. e Alcantara, R.L.C., 2008, "Postponement: uma estrutura conceitual para sua aplicação", XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção - ENEGEPP, Rio de Janeiro, Brasil, Anais...
- Ford, D.N. e Sobek II, D.K., 2005, "Adapting real options to new product development by modeling the second Toyota paradox", IEEE Transactions on Engineering Management, Vol.52, No. 2, pp. 175-185.
- Hollins, B. e Pugh, S., 1990, "Successful product design: what to do and when", Butterworth & Co. Ltd, London, UK.
- Inoue, M., Nahm, Y. e Ishikawa, H., 2011, "Application of preference set-based design method to multilayer porous materials for sound absorbency and insulation", International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2011/09.
- Kennedy, M.N., 2003, "Product development for the lean enterprise", The Oaklea Press, Richmond, USA.
- Khan, M.S., Al-Ashaab, A., Shehab, E., Haque, B., Ewers, P., Sorli, M. e Sopelana, A., 2011, "Towards lean product and process development", International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 25(12), pp. 825-844.
- Kleyner, A.V., 2005, "Determining optimal reliability targets through analysis of product validation cost and field warranty data, Ph.D. thesis, Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park.
- Krishnan, V. e Bhattacharya, S., 2002, "Technology selection and commitment in new product development: the role of uncertainty and design flexibility", Management Science, Vol.48, i3, pp.313-349.
- Kubo, P.Y.Y., Silva, C.C. e Lima, R.P., 2006, "Consórcio modular Volkswagen Caminhões e Ônibus: decisão estratégica de sucesso", III Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia - SEGeT, Resende, Brasil.
- Lee, H. e Suh, H., 2008, "Estimating the duration of stochastic workflow for product development process", International Journal of Production Economics, Vol.111, i1, pp.105-117.
- Liker, J.K. e Morgan, J. M., 2006, "The Toyota way in services: the case of lean product development", Academy of Management Perspectives, pp.5-20.
- Liker, J.K., Sobek, D.K. II, Ward, A.C. e Cristiano, J.J., 1996, "Involving suppliers in product development in the United States and Japan: Evidence for set-based concurrent engineering", IEEE Transactions on Engineering Management, v.43, pp.165-178.
- MacCormack, A., Verganti, R. e Iansiti, M., 2001, "Developing products on 'Internet time': the anatomy of a flexible development process", Management Science, Vol.47, i1, pp.133-152.
- Marx, R., Zilbovicius, M. e Salerno, M. S., 1997, "The 'modular consortium' in a new VW truck plant in Brazil: new forms of assembler and suppliers relationship", Integrated Manufacturing Systems, Vol.8, n.5, pp.292-298.
- May, M.E., 2007, "Toyota – a fórmula da inovação", 5. ed., Ed. Elsevier, Rio de Janeiro, Brasil, 242p.
- Miller, L., 1993, "Concurrent engineering design – integrating the best practices for process improvement", Society of Manufacturing Engineers, Michigan, USA.
- Morgan, J. e Liker, J.K., 2006, "The Toyota Product Development System: integrating people, process, and technology", Taylor & Francis, New York, USA, 400p.
- Muniz Júnior, J., 2010, "Qualidade", In: Muniz Junior, J. (Org.). Administração da Produção, IESDE, Curitiba, Brasil.
- Nahm, Y.E. e Ishikawa, H., 2005a, "Novel space-based design methodology for preliminary engineering design", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.28, No.11-12, pp.1056-1070.

- Nahm, Y.E. e Ishikawa, H., 2005b, "Representing and aggregating engineering quantities with preference structure for set-based concurrent engineering", *Concurrent Engineering*, Vol. 13 No. 2, pp.123-133.
- Oliveira, U.R., Marins, F.A.S. e Rocha, H.M., 2006, "Estratégia de coopetição versus competências essenciais e prioridades competitivas em gestão de operações: análise do consórcio modular da Volkswagen Caminhões e Ônibus do Brasil", XXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção - ENEGEP, Fortaleza, Brasil.
- Oliveira, U.R. e Rocha, H.M., 2005, "O Consórcio modular versus competências essenciais na gestão de operações: um estudo comparativo na Volkswagen Caminhões do Brasil", II Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia - SEGeT, Resende, Brasil.
- Pires, S., 1998, "Managerial implications of the modular consortium model in a Brazilian automotive plant", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol.18, i.3, pp 221-232.
- Pugh, S., 1991, "Total Design; Integrated Methods for Successful Product Engineering", Ed. Addison-Wesley, Massachusetts, USA, 312p.
- Qudrat-Ullah, H., Seong, B.S. e Mills, B.L., 2011, "Improving high variable-low volume operations: an exploration into the lean product development", *International Journal of Technology Management*, Vol. 57, No. 1-3/2012, pp.49-70.
- Quintella, H.L.M.M. e Rocha, H.M., 2005, "Análise dos fatores críticos de sucesso no lançamento de veículos automotivos na Indústria Sul Fluminense", II Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia - SEGeT, Resende, Brasil.
- Rekuc, S.J., Aughenbaugh, J.M., Bruns, M. e Paredis, C.J.J., 2006, "Eliminating design alternatives based on imprecise information", Georgia Institute of Technology, SAE International.
- Resende, A.P., Costa, F.W.A., Rutkowski, J., Carvalho, L.J.L., Almeida, R.J.S. e Silva, W., 2002, "Consórcio Modular: o novo paradigma do modelo de produção", XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção - ENEGEP, Curitiba, Brasil.
- Rocha, H.M. e Delamaro, M.C., 2007, "Product development process: using real options for assessment and to support the decision-making at decision gates", In: Geilson Loureiro; Richard Curran. (Org.). *Complex Systems Concurrent Engineering - collaboration, technology innovation and sustainability*. Springer-Verlag, London, UK, pp. 96-103.
- Rocha, H.M. e Delamaro, M.C., 2011, "Project/Product development process critical success factors: literature compilation and analysis", XIV Simpósio de Administração da Produção, Logística e Operações Internacionais - SIMPOI, São Paulo, Brasil.
- Rocha, H.M., Delamaro, M.C. e Affonso, L.M.F., 2011, "O uso da engenharia simultânea baseada em conjuntos de possíveis soluções (SBCE) no projeto de veículos automotivos", *Proceedings of the VIII Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia - SEGeT*, Resende, Brasil.
- Rocha, H.M., Delamaro, M.C., Quintella, H.L.M.M. e Affonso, L.M.F., 2010, "Fatores críticos de sucesso no processo de desenvolvimento de produtos na indústria automotiva Sul-Fluminense", VII Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia - SEGeT, Resende, Brasil.
- Rozenfeld, H., Forcellini, F.A., Amaral, D.C., Toledo, J.C., Silva, S.L., Alliprandini, D.H. e Scalice, R.C., 2006, "Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo", Ed. Saraiva, São Paulo, Brasil, 542 p.
- Salerno M.S., Dias A.V.C. e Zilbovicius, M., 1999, "Industrial Condominiums and Modular Consortiums: criteria for global sourcing or suppliers proximity in the new auto plants in Brazil", *Proceedings of VI International European Operations Management Association Conference - EUROMA*, Venice, Italy.
- Salerno, M.S., Camargo, O.S. e Lemos, M.B., 2008, "Modularity ten years after: an evaluation of the Brazilian experience", *International Journal of Automotive Technology and Management*, Vol. 8, n.4, pp.373-381.
- Salerno, M. e Zilbovicius, M., 1997, "L'usine VW à Resende a été inauguré / VW plant at Resende inaugurated", *La Lettre du GERPISA*, Paris, n.109, p.13-14.
- Schäfer, H. e Sorensen, D.J., 2010, "Creating options while designing prototypes: value management in the automobile industry", *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 21 Iss. 6, pp.721-742.
- Shulman, R., 2003, "Recovery and the new product paradox", *Brandweek*, Vol.44, i25, p.20.
- Silva, L.R., Servilheira, L.G.G.D. e Valim, R.L., 2010, "Identificação de melhorias no processo de desenvolvimento do produto da empresa MAN Latin America com foco no desenvolvimento de ônibus", Trabalho de conclusão de curso (Engenharia de Produção), Faculdade de Engenharia de Resende, Resende, Brasil.
- Shahan, D. e Seepersad, C.C., 2009, "Bayesian networks for set-based collaborative design", *Proceedings of International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, San Diego, USA, pp. 303-313.
- Sobek II, D.K., Ward, A.C. e Liker, J.K., 1999, "Toyota's principles of set-based concurrent engineering", *Sloan Management Review*, Vol. 76, No. 4, pp.67-83.
- Sobek II, D.K., Liker, J.K. e Ward, A.C., 1998, "Another Look at How Toyota Integrates Product Development", *Harvard Business Review*, Jul-Aug 1998, pp.36-49.
- Souza, V.M. e Borsato, M., 2011, "Set-based engineering: trabalhos publicados, suas relações e tendências futuras", *Anais do XVIII Simpósio de Engenharia de Produção - SIMPEP*, Bauru, Brasil.
- Spahi, S. e Hosni, Y., 2009, "Optimising the degree of customisation for products in mass customisation systems", *International Journal of Mass Customisation*, Vol. 3, No.1, pp.82-114.
- Van Kleef, E., 2006, "Consumer research in the early stages of the new product development – issues and applications in the food domain", Ph.D. thesis, Wageningen Universiteit, Netherlands.

- Varandas Jr., A. e Miguel, P.A.C., 2012, “Análise do processo de preparação da produção no desenvolvimento de novos produtos por meio de um estudo de caso em uma empresa do setor siderúrgico”, *Produção*, Vol.22, no.2, pp.185-200.
- Ward, A.C, 2007, “Lean product and process development”, Lean Enterprise Institute, Cambridge, USA, 208p.
- Ward, A.C; Liker, J.K., Cristiano, J.J. e Sobek II, D.K., 1995, “The second Toyota paradox: how delaying decisions can make better cars faster”, *Sloan Management Review*, Vol.36, No.3, PP.43-61.

9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores Henrique Martins Rocha, Maurício César Delamaro, Ligia Maria Fonseca Affonso, Uálison Rébula de Oliveira e Valter Silva Ferreira Filho são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

USING THE SET-BASED CONCURRENT ENGINEERING (SBCE) TO DEVELOP NEW PRODUCTS AND PROCESSES

Henrique Martins Rocha, AEDB-FER and UERJ-DENP
Maurício César Delamaro, UNESP-FEG
Ligia Maria Fonseca Affonso, UNIFOA
Uálison Rébula de Oliveira, UFF
Valter Silva Ferreira Filho, UFFRJ

Abstract: *The article purported to discuss the set-based concurrent engineering (SBCE) concept and application to new product and process development, combining the Product Development Process (PDP) with Design for Manufacture and Assembly (DFMA) to increase the reliability and odds of success on such areas of knowledge. The SBCE differs from the conventional concurrent engineering due to the fact that the conventional process seeks to obtain stakeholders consensus about product and process concepts as soon as possible, while the SBCE pursues the parallel development of various design, manufacturing, and assembly concepts, with the amount of options decreasing through iterative processes along the development time, postponing decisions. The additional effort required to the multiple concept development is compensated by potential gains to the organization, due to concepts premature abandonment avoidance, reducing development risks and reworks, development time and cost. The research initial steps of literature exploratory prospection have been followed by a field research in a Development Center of an automotive company located in southern Rio de Janeiro state, Brazil. A mathematical model has been used to analyze the company practice to develop three concepts (three ideas) for each feature or design detail, proving that the development of multiple concepts reduces the risk of needing fixes and redesigns. Running the Solver / Excel model, it is possible to identify the optimum amount of concepts that must be developed to maximize gains in the process of developing new products and processes, as well as identifying the limits of SBCE use. The paper findings may be used by any organization that seeks to maximize returns on investments in new product development, fulfilling customer needs faster and more reliably.*

Keywords: *SBCE, product development, production processes, DFMA, postponement.*