



COMBINANDO SIMULAÇÃO E SISTEMAS BASEADOS EM CONHECIMENTO PARA O PROJETO DE SISTEMAS AVANÇADOS DE MANUFATURA

Denis Borenstein

Programa de Pós-Graduação em Administração
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. João Pessoa, 52 – Sala II
90040-000 – Porto Alegre – RS
email: denisb@adm.ufrgs.br

Resumo

Este trabalho apresenta um sistema inteligente desenvolvido para verificar se uma determinada opção de projeto de um Sistema Avançado de Manufatura (SAM) respeita os objetivos de projeto fixados pelo time de projetistas. Se um problema é encontrado, o sistema começa um ciclo de análise-diagnóstico-recomendação no sentido de diagnosticar a causa do problema, bem como, sugerir possíveis ações no sentido de melhorar a alternativa de projeto em relação ao objetivo não respeitado. Para que este ciclo seja realizado com sucesso, o sistema desenvolvido combina simulação e sistemas baseados em conhecimento, utilizando a experiência e o conhecimento adquiridos por especialistas durante prévios projetos de SAM. Um exemplo ilustra a eficácia do sistema computacional.

Palavras-chave: *inteligência artificial, modelagem, projeto de sistemas, sistemas avançados de manufatura, simulação.*

1. Introdução

A pós a década de 60 a competição por mercados na área de manufatura cresceu exponencialmente. A aquisição ou a manutenção

de mecanismos competitivos (por exemplo, equipamentos mais produtivos, novas técnicas de gestão da produção) tornou-se uma questão fundamental para a sobrevivência de uma empresa industrial em mercados cada vez mais

globalizados. Sistemas Avançados de Manufatura (SAM) são considerados por muitas empresas como um destes mecanismos. SAM são sistemas automatizados e integrados de equipamentos e fluxo de informação, dispostos para a produção de pequenos e médios lotes de componentes complexos com baixo custo. Estes sistemas são basicamente compostos por estações de trabalho e sistemas automatizados de transferência de componentes, nos quais o controle das operações é realizado por um computador central.

O conceito de SAM oferece diversas vantagens, dentre as quais destacam-se: melhoria da qualidade, redução do *lead-time* e aumento de flexibilidade na manufatura. Estes atributos concedem à firma condições para competir em novos mercados, produzindo novos produtos, e a reagir rapidamente a mudanças no consumo, consolidando sua posição no mercado.

As potencialidades inerentes ao conceito de SAM levaram à sua implementação em diversos países da Europa, Estados Unidos e Japão. Contudo, os resultados, em geral, têm sido decepcionantes face aos investimentos realizados. Vários fracassos têm sido relatados na literatura (TCHIJOV & SHEININ, 1990). Uma das principais causas para estes fracassos é a dificuldade de se projetar adequadamente estes sistemas. A especificação e a integração dos vários elementos que compõem um SAM exigem uma grande parcela de comprometimento e habilidade pelo time de projetistas, raros de serem encontrados em um único ambiente. Ademais, altos investimentos iniciais e elevados riscos tecnológicos e de capital exercem elevada pressão sobre os projetistas, dificultando o processo mesmo onde existam recursos humanos e físicos condizentes com o projeto destes sistemas de manufatura.

É inevitável, dentro do processo de globalização da economia mundial, que as empresas de manufatura instaladas nos países da América Latina, em especial no Brasil, passem a considerar a adoção de SAM em um futuro próximo. Contudo, levando-se em conta os problemas ocorridos em prévias instalações e as

dificuldades inerentes, é essencial que se desenvolvam ferramentas capazes de analisar e avaliar, de forma objetiva, estes sistemas antes de sua implementação, evitando assim grandes fracassos financeiros.

O presente trabalho descreve um sistema computacional que, combinando simulação discreta e técnicas provenientes da inteligência artificial, verifica se um determinado SAM atende aos requisitos de projeto definidos pela empresa que o pretende implementar. Caso algum problema seja detectado, o sistema computacional analisa o modelo do sistema de manufatura para identificar a causa do mau desempenho em respeito aos objetivos fixados. Diagnosticado o(s) possível(is) problema(s), o sistema computacional oferece aos projetistas recomendações no sentido de melhorar o desempenho do sistema de manufatura a fim de que ele atenda às especificações de projeto. Este processo denominado de ciclo de *análise-diagnóstico-recomendação* é realizado baseado na experiência e conhecimento adquiridos por especialistas durante prévios projetos de SAM.

Este texto está organizado da seguinte forma: primeiramente, faz-se uma avaliação do estado da arte no projeto de SAM; a seguir, é apresentada a metodologia de projeto desenvolvida para a verificação de alternativas de projeto; em seguida, o sistema computacional desenvolvido é apresentado, concentrando-se em seu projeto conceptual; e, finalmente, apresenta-se um exemplo de utilização do sistema, cujo maior objetivo é oferecer ao leitor uma noção de sua eficácia e potencialidades.

2. Revisão Bibliográfica

Durante a fase de projeto de qualquer sistema complexo, o projetista sempre se depara com o problema de decidir se uma determinada alternativa atende aos requisitos (ou objetivos ou especificações) de projeto. BARROW (1984) prescreve três possíveis abordagens para a solução deste problema de verificação:

Desenvolver o sistema a partir de seus objetivos, usando uma metodologia que garanta sua efetividade;

Projetar o sistema e formalmente provar que ele satisfaz a todas especificações;

Construir o sistema, ou um modelo analítico ou de simulação do mesmo, e realizar experimentos que comprovem sua eficácia.

Embora as duas primeiras abordagens sejam extremamente atraentes, o atual estado da arte em termos de *hardware* e *software* impossibilita suas aplicações em problemas reais. Elas exigem uma grande quantidade de conhecimento sobre o sistema que se deseja projetar, o qual é impossível de capturar e codificar mesmo para os mais simples sistemas de Engenharia. Portanto, não passam de sonhos futuristas.

A terceira abordagem pode ser considerada como a prática usual. Porém, como é extremamente onerosa a construção de um modelo físico de um SAM para experimentação, a modelagem por simulação do sistema de manufatura aparece como uma opção ideal, apresentando vantagens em termos de custo e flexibilidade (MELLICHAMP & WAHAB, 1987).

Contudo, embora um modelo de simulação seja uma poderosa ferramenta de análise para um sistema, falta-lhe a capacidade de oferecer recomendações explícitas ao projetista sobre o que fazer se algum objetivo de projeto não é atendido. Esta tarefa é altamente dependente da experiência do projetista em outros projetos de SAM. O potencial de sistemas baseados em conhecimento (KBS, do inglês *Knowledge-Based Systems*) para modelar conhecimento e experiência adquiridas e usadas por projetistas, coloca esta técnica como uma solução ideal para o problema de verificar uma determinada opção de projeto.

Formalmente, as seguintes razões justificam a aplicação de KBS para a verificação de várias configurações de SAM (MELLICHAMP & WAHAB, 1987): o problema é bem definido, especialistas existem e melhorias no desempenho em uma determinada opção de projeto dependem mais de uma abordagem heurística do que algorítmica.

Recentemente, alguns sistemas inteligentes têm sido desenvolvidos para o projeto de SAM, com destaque para FMS Designer (MELLICHAMP *et al.*, 1991) e COMMAND (TALAVAGE & SHONDHAN, 1990). Estes dois sistemas combinam modelos de simulação com a tecnologia de sistemas especialistas para a análise de possíveis alternativas de projeto. Contudo, ambos foram desenvolvidos baseados em uma perspectiva errônea para o projeto de SAM. Eles automatizam o projeto de SAM tentando substituir o projetista humano. Visam realizar um projeto sem a participação de um experiente time de projetistas. Conseqüentemente, é excluído do processo o potencial criativo e inovador do projetista humano, dificilmente igualado pela máquina. Adicionalmente, ambos os sistemas limitam o espaço de solução à primeira alternativa que respeita os objetivos de projeto, reduzindo o escopo de análise.

Neste trabalho, assume-se que não existe solução para o problema do projeto de SAM sem a participação efetiva do elemento humano (BORENSTEIN, 1998). A eficácia das várias decisões envolvidas no projeto de SAM depende de uma ativa cooperação entre o time de projetistas e a ferramenta de análise e avaliação. Esta cooperação ativa significa que enquanto o projetista humano define o problema a ser solucionado, a ferramenta de análise assume o papel de conselheiro e facilitador, sugerindo e estimulando ações ao projetista no sentido de ajudá-lo a entender e solucionar o problema como um todo.

A habilidade de modelar diferentes configurações, diferentes conjuntos de produtos e *apoiar* (e não substituir) o time de projetistas, dentro de um ambiente computacional integrado, são as principais contribuições do sistema desenvolvido, denominado ExpertFlex. Adicionalmente, uma base de conhecimento de domínio público, relacionada com o projeto de SAM, contendo a experiência e conhecimento de vários projetistas, está sendo construída. Esta base de conhecimento será colocada à disposição de todos aqueles envolvidos com o projeto de SAM, e, portanto,

poderá ser usada tanto para futuras aplicações industriais como para atividades de treinamento e instrução.

3. Metodologia de Projeto

A fim de desenvolvermos uma ferramenta de apoio à verificação de projetos de SAM, é necessário que entendamos a lógica pela qual este processo é realizado na prática. É fundamental que se identifique a maneira pela qual os requisitos de projeto são levados em consideração e o modo como afetam o processo de verificação. MELLICHAMP *et al.* (1990) consultaram diversos especialistas envolvidos com o projeto de SAM, com o objetivo de definir esta questão. Os mais importantes resultados obtidos podem ser resumidos da seguinte forma:

objetivo operacional mais importante é a produtividade. Ou seja, o número de peças produzidas em uma determinada unidade de tempo está de acordo com as especificações de projeto?

Uma meta operacional secundária é relacionada com a utilização dos equipamentos e tamanhos das filas de tarefas a serem processadas. Contudo, é importante salientar, que experimentados projetistas estão preparados a aceitar gargalos desde que a produtividade pretendida seja obtida.

objetivo financeiro mais importante é aquele relacionado ao orçamento disponível para a instalação do sistema de manufatura.

Existem outros aspectos importantes envolvidos com o projeto de SAM, tais como flexibilidade, qualidade e confiabilidade. Porém, são raros os especialistas capazes de avaliarem o efeito destes fatores sobre o projeto de um SAM, consequência da tradicional abordagem de projeto de sistemas de manufatura que relega importante aspectos estratégicos, limitando-se a considerar apenas aspectos financeiros e técnicos de fácil quantificação. Considerando-se que este trabalho apresenta um protótipo, a análise será limitada aos aspectos apresentados por

MELLICHAMP *et al.* (1991). Acredita-se que eles serão suficientes para demonstrar a potencialidade da aplicação de sistemas inteligentes ao projeto de SAM. Aspectos estratégicos serão incluídos no futuro, dentro de uma abordagem evolutiva de desenvolvimento do protótipo computacional.

A metodologia de verificação de uma alternativa de projeto de um SAM é baseada em três etapas (vide Figura 1). Cada estágio corresponde à análise dos seguintes objetivos de projeto: produtividade, investimento inicial e utilização dos equipamentos. A ordem na qual esta avaliação ocorre é baseada na recomendação de especialistas.

O primeiro estágio é relacionado com o objetivo produtividade. O sistema avalia a produtividade de cada peça a ser produzida e a compara com os objetivos definidos pelo projetista. Se uma peça não atinge seu objetivo, o sistema iniciará um processo de análise dos equipamentos presentes na alternativa de projeto com o objetivo de: aumentar a produtividade do sistema para todas as peças cujas produtividades não tenham sido alcançadas, mantendo a taxa de produção para aquelas em que este objetivo tenha sido obtido. A análise tenta isolar a causa de possíveis deficiências, considerando todos os equipamentos envolvidos com a produção da peça problemática, incluindo máquinas, sistemas de movimentação de componentes e *buffers*. Uma vez que o sistema tenha diagnosticado o problema, possíveis cursos de ação são sugeridos ao projetista.

A segunda etapa avalia a conformidade da alternativa ao orçamento designado ao projeto. Se uma alternativa de projeto possui um capital de investimento superior ao orçamento disponível, o sistema inicia uma análise com dois objetivos: identificar e substituir equipamentos com alto custo de aquisição; e identificar e eliminar, se tecnologicamente possível, equipamentos subutilizados, ou seja, desnecessários. Caso a análise seja capaz de identificar equipamentos que se encaixem neste contexto, recomendações são feitas no sentido de diminuir

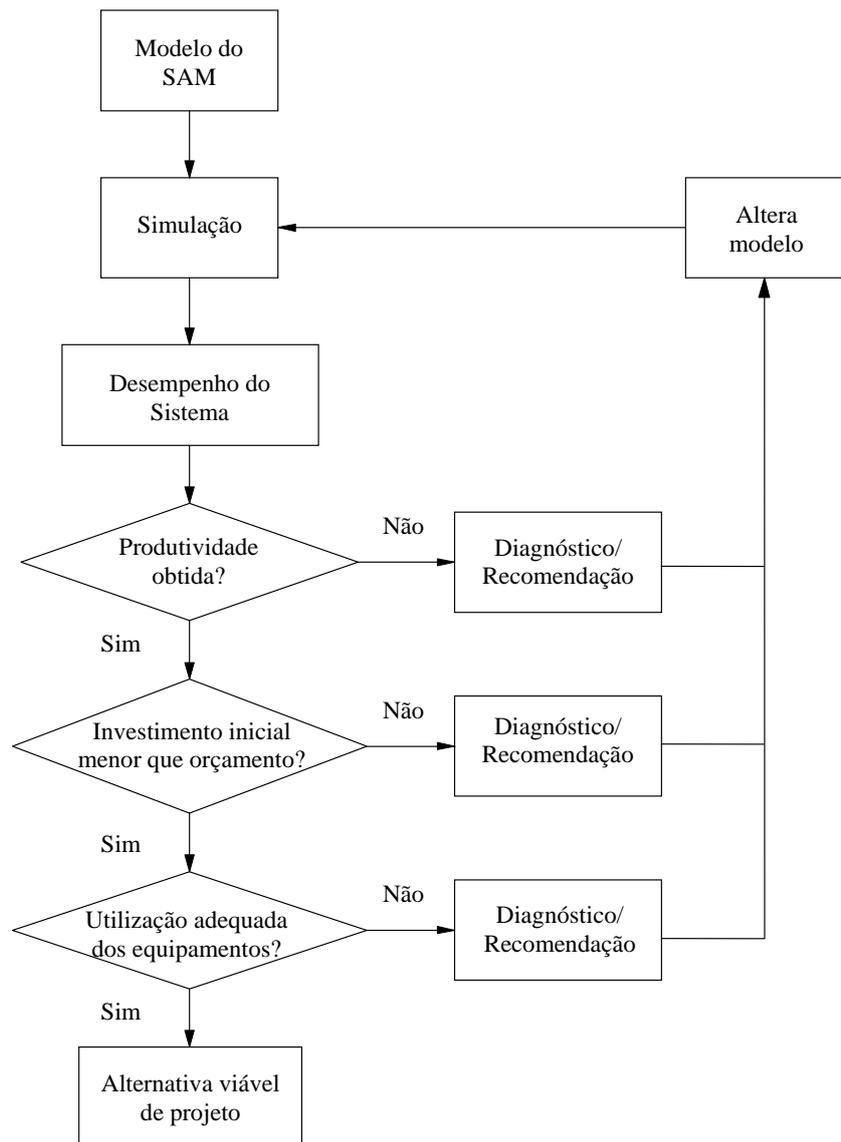


Figura 1 – Metodologia de verificação de projetos de SAM

o investimento inicial, sem interferir com a produtividade global do sistema de manufatura.

A terceira etapa pode ser considerada como uma análise complementar. Seu objetivo é identificar deficiências adicionais mesmo quando os dois objetivos de projeto, produtividade e investimento inicial, são atingidos. No atual estágio de desenvolvimento do sistema, a ênfase tem recaído sobre a utilização dos equipamentos, identificando possíveis gargalos e equipamentos subutilizados.

Uma recomendação oferecida pelo sistema computacional especifica tanto o parâmetro a ser mudado como a razão de sua mudança. Aumentar ou diminuir o número de máquinas em uma célula, alterar o sistema de controle de uma célula, alterar o “lay-out” do sistema produtivo, aumentar ou diminuir o número de equipamentos no sistema de transferência e incluir *buffers* em células são exemplos de recomendações oferecidas pelo sistema.



Figura 2 – Diagrama de influência representando uma típica regra ‘SE-ENTÃO’

Para diagnosticar o problema e propor recomendações, o sistema computacional utiliza um processo de raciocínio heurístico similar àquele usado por especialistas humanos para resolverem problemas similares. A próxima seção discutirá com detalhes as heurísticas envolvidas e o processo de sua obtenção e codificação.

4. Obtenção do Conhecimento

O processo de aquisição do conhecimento para a construção do sistema computacional foi dividido em duas etapas. Inicialmente, uma extensa revisão bibliográfica sobre o projeto de SAM foi realizada, incluindo, entre outras, as seguintes fontes bibliográficas: ALY & SUBRAMANIAM (1993), FLOSS & TALAVAGE (1990), GREWOOD (1989), KUSIAK (1988), MITAL & ANAND (1994) e RUSH *et al.* (1992). O resultado final desta etapa foi a compilação de um conjunto de regras *SE-ENTÃO*, agrupadas de acordo com os objetivos de projeto, quais sejam produtividade, financeiro e utilização de equipamentos. A seguir, as regras foram modeladas usando-se diagramas de influência, em que os nós representam condições e conclusões e os arcos representam a conjunção *ENTÃO*. Por exemplo, a regra genérica *se (condição 1) ou (condição 2) e (condição 3) então conclusão* é representada pelo diagrama de influência apresentado na Figura 2.

A modelagem das regras foi realizada em um sistema especializado na construção de diagramas de influência, GRAPHICS COPE (ACKERMANN & SWEENEY, 1995), o qual oferece facilidades gráficas e interativas para a sua construção. A modelagem e o agrupamento das regras tiveram como principal finalidade facilitar a execução da segunda etapa.

A segunda etapa consistiu na verificação, modificação e ampliação do conjunto de regras definidas no passo anterior em colaboração com experimentados projetistas de SAM, provenientes de instituições acadêmicas e/ou da indústria. A modelagem das regras facilitou e agilizou o processo de aquisição de conhecimento, pois foi criado um ambiente propício para a explicitação de raciocínio não formal, bem como para a troca de informações entre diferentes especialistas, sem a necessidade de agrupá-los em um mesmo ambiente.

O atual conjunto de heurísticas pode ser descrito, de forma sucinta, como se segue:

Heurísticas relacionadas à produtividade

O principal objetivo deste grupo é o de aumentar a eficiência do sistema de manufatura, aumentando sua taxa de produção. Basicamente, isto é obtido empregando-se uma estratégia “local-global” de identificar gargalos no sistema. A análise começa com uma avaliação individual das máquinas pelas quais uma peça é processada. Gargalos são indicados por elevadas taxas de ocupação e/ou por longas filas. Se as estatísticas para uma determinada máquina indicam a existência de problemas, o sistema realiza uma análise global, em um processo que considera a máquina em questão, todas as máquinas que a precedem e os manipuladores e sistemas automáticos que servem a ela. Desta forma, analisa-se o sistema de manufatura sob um ponto de vista integrado, pois problemas que se evidenciam em um determinado equipamento podem, na realidade, ter como causa uma má integração dos vários recursos no sistema.

Heurísticas relacionadas a objetivos financeiros

A verificação do objetivo financeiro é baseada na análise e substituição de equipamentos subutilizados e com elevado custo inicial, e

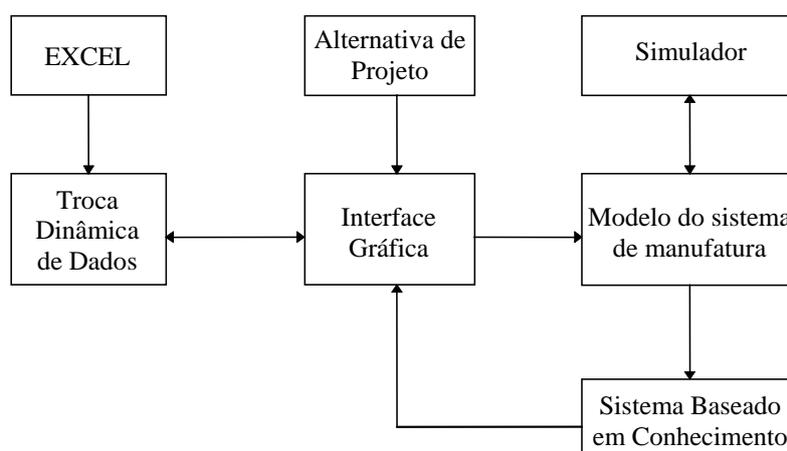


Figura 3 – Arquitetura do sistema

que possam ser substituídos sem prejuízo da produtividade do sistema. A mesma estratégia “local-global” definida para o prévio grupo de heurísticas é adotada.

Heurísticas relacionadas a utilização de equipamentos Estas heurísticas identificam recursos físicos com utilização inadequada (com taxas de ocupação extremamente baixas ou altas) e que não foram identificados previamente como recursos problemáticos. Neste subgrupo, a estratégia é local. Se um problema é identificado em um determinado equipamento, a análise limita-se ao mesmo.

5. Sistema Computacional

ExpertFlex é um sistema híbrido que utiliza um modelo de simulação e um sistema baseado em conhecimento para a verificação de possíveis configurações para o projeto de um SAM. O sistema além de verificar a configuração, recomenda alterações no sentido de superar as deficiências encontradas. Para que este objetivo seja alcançado, um modelo simbólico de SAM, descrevendo a estrutura e o comportamento de seus componentes, foi construído. A estrutura do sistema de manufatura é modelada utilizando-se uma representação orientada a objetos, que captura os atributos de cada componente do sistema e suas relações. O compor-

tamento do sistema de manufatura é definido pela utilização de um conjunto de regras de produção (regras *SE-ENTÃO*), as quais podem atingir conclusões acerca do desempenho do sistema baseando-se no estado de seus componentes.

Os dois principais módulos, o simulador e o sistema baseado em conhecimento, compartilham a mesma interface. Esta é responsável pela definição interativa com o usuário das diferentes alternativas de projeto para um determinado SAM. A Figura 3 apresenta a arquitetura do sistema computacional, enfatizando a troca de informações entre os diversos módulos que o compõem. A interface possui facilidades gráficas que oferecem um ambiente amigável para a definição de uma configuração de projeto, bem como para a apresentação gráfica dos resultados. Adicionalmente, a análise estatística dos resultados da simulação pode ser executada pelo EXCEL, que troca informações automaticamente com a interface, utilizando um dos recursos oferecidos pelo MS-Windows, a Troca Dinâmica de Dados (DDE, do inglês “Dynamic Data Exchange”). A Figura 4 mostra a tela principal do sistema com um modelo de SAM criado pelo autor.

5.1 Modelo de Simulação

Este módulo é um modelo de simulação discreta orientado a eventos e implementado

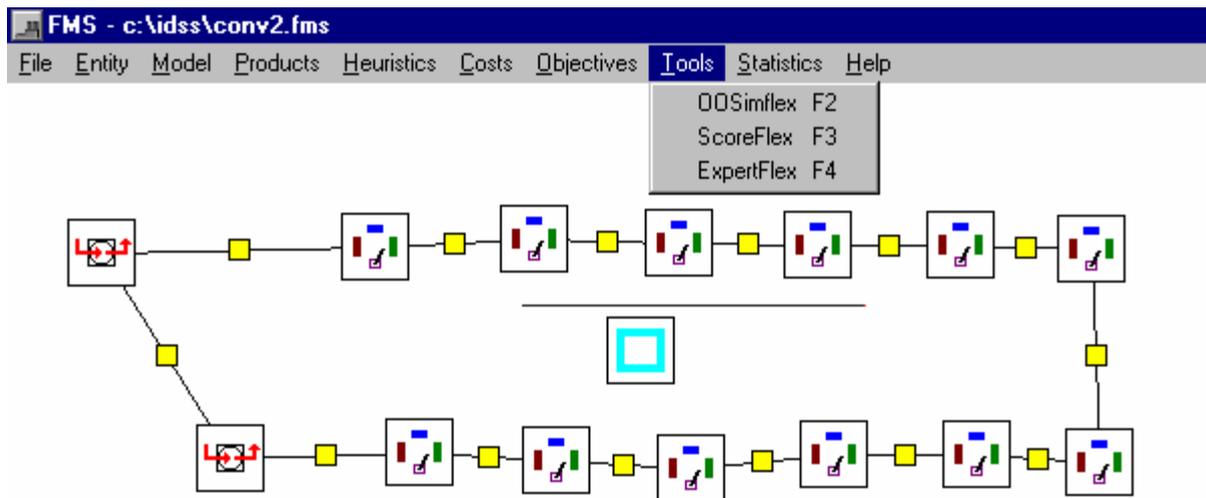


Figura 4 – Tela principal do sistema computacional

computacionalmente segundo os conceitos provenientes da Programação Orientada a Objetos (POO).

A principal função do modelo de simulação é a de possibilitar a análise de possíveis configurações de SAM a fim de obter importantes parâmetros de desempenho tais como produtividade, utilização dos recursos, tamanhos de fila no sistema, etc. Este modelo não pretende ser um modelo genérico de simulação nem uma nova linguagem para a simulação de sistemas de manufatura, mas um ambiente flexível e amigável para a modelagem de SAM. POO foi utilizada pelos seguintes fatores: (i) a natural correspondência entre o objeto conceptual e o físico, existente no âmbito de POO; (ii) a POO facilita a construção de modelos com múltiplos níveis de abstração; e (iii) a POO estimula a utilização de dois importantes conceitos na área de engenharia de “software”: reusabilidade e encapsulamento. BORENSTEIN (1993) apresenta uma descrição completa do modelo de simulação, com ênfase nos objetos definidos e sua hierarquia.

5.2 Sistema Baseado em Conhecimento

O sistema baseado em conhecimento é estruturado segundo dois componentes: uma base de

conhecimentos que contém tanto o conhecimento descritivo como o procedural acerca de um SAM e um mecanismo de inferência que aplica o conhecimento. A seguir estes componentes serão discutidos em detalhe.

5.2.1 Base de Conhecimento

Duas categorias de conhecimento são representadas: o *Conhecimento Descritivo ou Declarativo* e o *Conhecimento Procedural*.

O Conhecimento Descritivo ou Declarativo representa os objetos (físicos e abstratos) existentes no sistema de manufatura e suas relações. Este conhecimento contém os aspectos fatuais de uma configuração de projeto, tais como composição da célula, peças a serem produzidas e operações a serem executadas. Este conhecimento é representado utilizando-se uma modelagem orientada a objetos, compartilhada pelo modelo de simulação.

O Conhecimento Procedural representa as heurísticas presentes na base de conhecimento. Este conhecimento é criado usando-se regras de produção. Existem quatro tipos de regras no sistema como se segue:

Avaliação – regras que manipulam diretamente com objetivos de projeto.

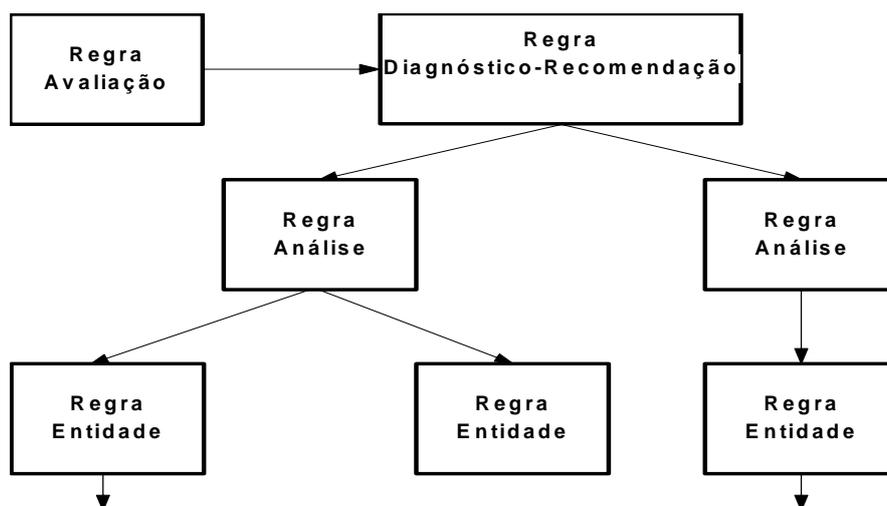


Figura 5 – Estrutura lógica e de controle das regras

Exemplo: *se produção da peça x é menor que a produtividade definida*
então objetivo de produtividade da peça x não é atingida

Entidade – regras que analisam as condições de operação de um e somente um recurso físico.

Exemplo: *se a ocupação da máquina y é maior que a permitida*
então máquina y está sobrecarregada

Análise – regras que estabelecem diagnósticos sobre o desempenho do sistema de manufatura baseadas em condições operacionais de uma ou mais entidades.

Exemplo: *se máquina y está sobrecarregada e máquina y está saturada*
então situação operacional de máquina y: gargalo

Diagnóstico-Recomendação – regras, que a partir das condições operacionais das entidades envolvidas e dos objetivos de projeto, apresentam um diagnóstico para as deficiências constatadas. Adicionalmente, estas regras fornecem recomendações no sentido de melhorar o desempenho da configuração para as deficiências constatadas.

Exemplo: *se máquina y é um gargalo e produtividade peça x não foi obtida*

então Diagnóstico produtividade peça x é perturbada pelo gargalo y
 Recomendação: Adicione máquina tipo y no sistema

Estas regras são organizadas segundo uma hierarquia. Regras tipo *Diagnóstico-Recomendação* estão no topo das diversas hierarquias existentes na base de conhecimento, enquanto regras de *Avaliação* e *Entidade* estão sempre posicionadas nas folhas, não sendo influenciadas por nenhuma outra regra na hierarquia.

5.2.2 Mecanismo de Inferência

A função do mecanismo de inferência é a de gerar de forma eficiente caminhos na estrutura hierárquica de regras. Em síntese, o mecanismo de inferência tem o controle sobre o conhecimento procedural, determinando a seqüência de regras a serem disparadas durante um ciclo *análise-diagnóstico-recomendação*. Para tal, ExpertFlex utiliza o mecanismo de inferência *raciocinando para trás* ou *raciocínio por objetivos*. Neste raciocínio, os lados direitos das regras (resultados) são associados com o estado atual, enquanto os lados esquerdos das regras (as precondições) são usados para gerar novos subobjetivos, até ser alcançado o objetivo principal.

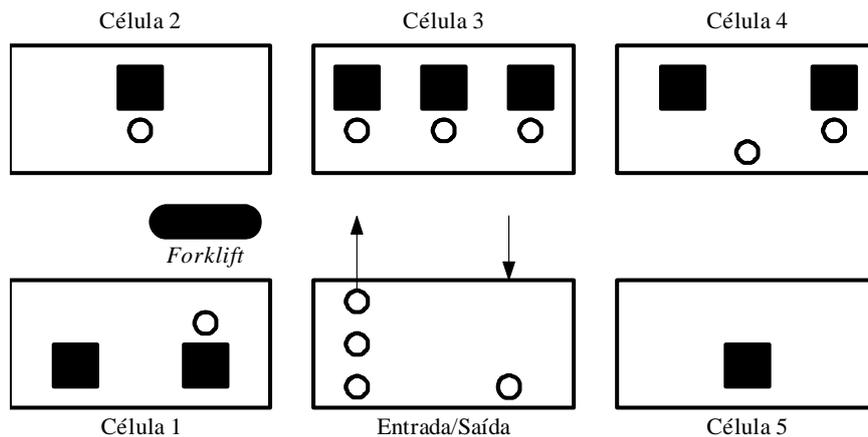


Figura 6 – Configuração do sistema de manufatura (adaptado de LAW & KELTON, 1991)

Este mecanismo é incorporado às várias estruturas hierárquicas de regras para realizar múltiplos ciclos *análise-diagnóstico-recomendação*, sendo um ciclo para cada estrutura. O ciclo começa na análise de regras tipo *Avaliação*. Se a condição de uma determinada regra *Avaliação* é verdadeira, o processo de diagnose e recomendação tem seu início. A próxima regra a ser analisada é uma regra tipo *Diagnóstico-Recomendação*, que se encontram no topo de uma estrutura composta por várias regras tipo *Análise* e *Entidade*. A Figura 5 apresenta como ocorre o controle do fluxo de análise em uma determinada hierarquia. Se todas as regras analisadas em um determinado caminho são verdadeiras, o ciclo termina com um diagnóstico e um conjunto de recomendações. Se qualquer condição de uma regra é falsa, a análise é interrompida e um novo ciclo tem início. Estes ciclos continuam até que todas as árvores de regras tenham sido exaustivamente avaliadas.

5.3 Detalhes da Implementação Computacional

ExpertFlex foi desenvolvido utilizando-se diferentes paradigmas de programação, tais como procedural, POO e regras de produção. Estes paradigmas exigiram, em nome da eficiência e facilidade de programação, diferentes linguagens de programação. O modelo

de simulação e a interface foram implementados em Borland C++, versão 4.0. O sistema baseado em conhecimento foi implementado em LPA-Prolog para Windows 2.0, um ambiente de programação compatível com a sintaxe do interpretador Edinburgh-Prolog.

O sistema é totalmente integrado. Tanto a simulação como o sistema baseado em conhecimentos são executados sob a mesma plataforma computacional, MS-Windows. A comunicação entre o simulador e o sistema baseado em conhecimento pode ser estabelecida pela seleção de opções em *menus*, reduzindo a possibilidade de erros.

Os resultados obtidos em uma avaliação completa do sistema são simultaneamente apresentados na tela e salvos em um arquivo texto. As recomendações sugeridas por ExpertFlex precisam ser implementadas pelo usuário, a fim de evitar a perda de controle do processo pelo time de projetistas. A análise e a implementação das recomendações constituem um importante processo de aprendizagem dos fenômenos relacionados ao projeto de SAM.

6. Exemplo de Utilização

Um estudo de caso, envolvendo um exemplo modificado do modelo JOB SHOP descrito por LAW & KELTON (1991), ilustrará a efetividade do sistema. A Figura 6 apresenta o sistema de manufatura analisado. Tabela 1

Tabela 1 – Roteamento para cada peça

Peça	Seqüência de operações
Produto 1	3(0.25)-1(0.15)-2(0.10)-5(0.30)
Produto 2	4(0.15)-1(0.20)-3(0.30)
Produto 3	2(0.15)-5(0.10)-1(0.35)-4(0.20)-3(0.20)

Tabela 2 – Lista dos equipamentos no sistema

Equipamento	Custo(US\$)/capacidade	Número médio em fila
Célula 1	200,000	5
Célula 2	400,000	5
Célula 3	200,000	5
Célula 4	500,000	5
Célula 5	450,000	10
Forklift	500,000	n/a

Tabela 3 – Configurações analisadas

Projeto	Máquinas nas Células					Número Forklifts
	1	2	3	4	5	
1	4	1	4	2	2	1
2	4	2	5	2	2	1
3	4	2	5	3	2	2
4	4	2	5	2	2	2
5	4	2	5	3	1	2
6	5	2	5	3	1	2

apresenta a seqüência de operações e o tempo médio (em horas) para executar a operação na referida máquina, o qual é uma variável aleatória distribuída segundo uma distribuição gama com parâmetro de forma 2.

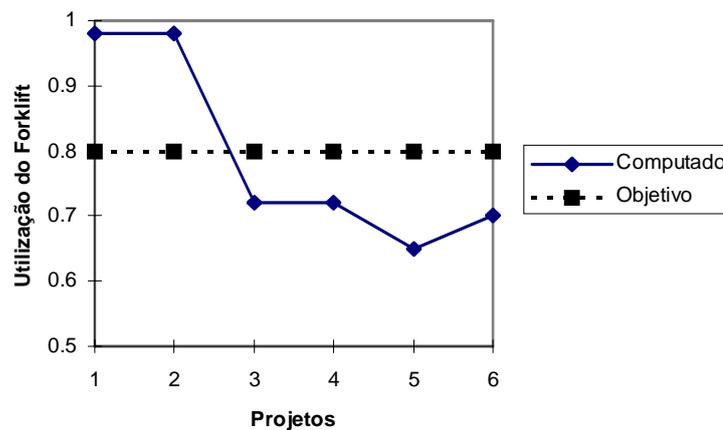
O objetivo da análise é o de determinar a configuração do sistema em termos do número de máquinas em cada estação de trabalho e o número de *forklifts*, que melhor atende os seguintes requisitos de projeto: (a) máxima utilização das máquinas (incluindo a proporção em que se encontram ocupadas ou bloqueadas) de 90%; (b) máxima utilização do *forklift* (incluindo movimentação carregado e vazio) de 80%; (c) produção diária de 115 unidades; e (d) o capital disponível para a aquisição das máquinas e *forklifts* é de R\$5.500.000,00.

A Tabela 2 mostra o investimento para cada máquina no sistema bem como o comprimento recomendável de tarefas em fila para cada célula.

Para cada configuração, 10 replicações de tamanho 320 horas (40 dias de oito horas) foram realizadas. As primeiras 64 horas de cada replicação foram definidas como um período de aquecimento. Este valor foi determinado aplicando-se o procedimento seqüencial desenvolvido por LAW & CARSON (1979). A configuração definida por LAW & KELTON (1991) como ponto de partida é usada como cenário inicial para nossa análise. Este sistema é definido como Projeto 1. Todas as configurações analisadas são apresentadas na Tabela 3. A Tabela 4 e as Figuras 7 a 9 apresentam os resultados médios da simulação para as 10 replicações. É importan-

Tabela 4 – Resultados da simulação

Cel	Projeto 1		Projeto 2		Projeto 3		Projeto 4		Projeto 5		Projeto 6	
	Util	Fila	Util	Fila	Util	Fila	Util	Fila	Util	Fila	Util	Fila
1	0.90	2.71	0.76	13.86	0.83	3.49	0.81	3.05	0.82	1.10	0.82	2.50
2	0.99	161.46	0.67	3.55	0.86	2.70	0.86	1.97	0.87	2.53	0.85	7.00
3	0.98	208.85	0.87	2.12	0.84	2.37	0.77	5.39	0.92	5.00	0.80	2.40
4	0.95	150.10	0.98	250.00	0.71	0.47	0.86	19.03	0.68	0.21	0.69	0.40
5	1.00	1.45	0.62	0.80	0.57	0.25	0.57	0.26	0.57	0.24	0.85	35.50

Figura 7 – Taxa de utilização do *forklift* nas configurações analisadas

te ressaltar que não foram consideradas condições de quebra de recursos físicos.

Analisando-se os resultados do Projeto 1 (colunas 2 e 3 da Tabela 4), ExpertFlex determina que nenhum dos objetivos de projeto foi alcançado, com exceção do financeiro. ExpertFlex, em sua avaliação desta configuração, define uma série de recomendações no sentido de aumentar a capacidade de todas as células e do *forklift*. Contudo, decidiu-se pela aplicação de um procedimento sistêmico e evolutivo para a implementação das alterações sugeridas, no qual as máquinas sobrecarregadas foram priorizadas. Assim, o número de máquinas nas células 2 e 3 foi aumentado em uma unidade, criando-se o Projeto 2. O número de *forklifts* permaneceu o mesmo a fim de avaliar sua influência no desempenho do sistema. O Projeto 2 também não conseguiu atingir os

objetivos propostos, embora os resultados da simulação tenham apresentado uma melhora significativa. ExpertFlex determinou, após uma completa avaliação da configuração, que a célula 4 e o *forklift* constituem gargalos. ExpertFlex recomenda o aumento de suas capacidades, dando origem ao Projeto 3.

Os resultados da simulação para o Projeto 3 evidenciam que todos os objetivos técnicos e de produtividade foram obtidos. Contudo, o investimento inicial (US\$ 6.000.000,00) é maior do que o orçamento disponível. ExpertFlex recomenda a diminuição da capacidade da célula 4, cujo custo/capacidade é o mais alto. É definido assim o Projeto 4.

O Projeto 4 respeita todos os objetivos de projeto. Contudo, ExpertFlex determina que a célula 4 tem um tamanho de fila superior ao recomendado (19, para um valor recomendado

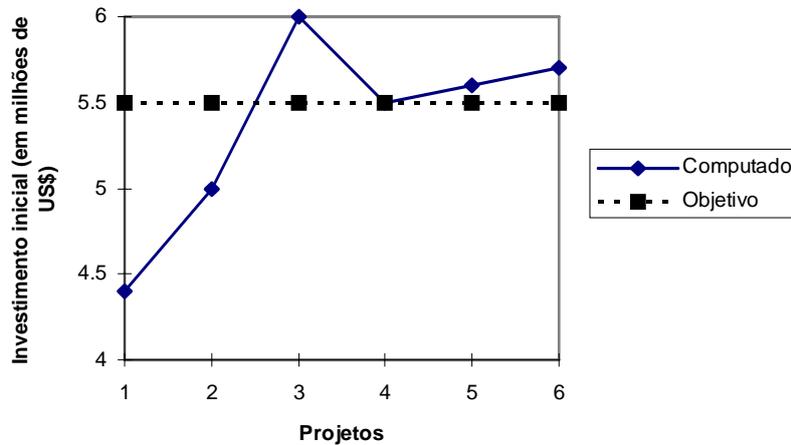


Figura 8 – Investimento inicial das configurações analisadas

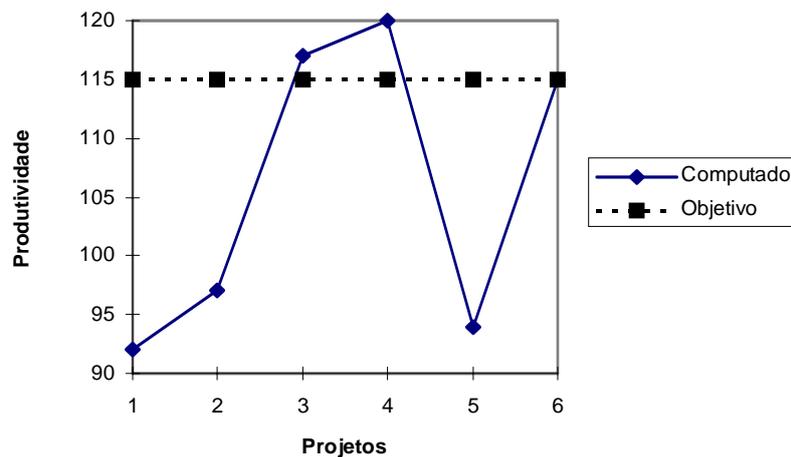


Figura 9 – Produção diária das configurações analisadas

de 5). Os Projetos 5 e 6 são tentativas de melhorar este aspecto em particular. Contudo, os resultados são decepcionantes. As mudanças diminuíram a produtividade do sistema. Portanto, o Projeto 4 pode ser considerado como a melhor opção de projeto para as condições definidas.

7. Conclusões

Uma abordagem inteligente para o problema de verificar possíveis configurações de SAM foi apresentada e um protótipo computacional,

chamado ExpertFlex, foi discutido. Observando-se os resultados obtidos, esta abordagem evidencia um enorme potencial de utilização. O protótipo desenvolvido, como se apresenta, é um sistema robusto e confiável. Levando-se em conta o limitado número de objetivos de projeto aptos a serem analisados, o sistema apresenta um nível de especialização compatível com experimentados projetistas de SAM.

Uma contribuição adicional do sistema é o seu potencial como uma ferramenta de instrução

e treinamento para engenheiros e administradores na difícil tarefa de se familiarizar com os conceitos e peculiaridades introduzidas por SAM. O protótipo já está sendo utilizado pelo autor em cursos de graduação e pós-graduação relacionados com a aplicação da informática na manufatura.

Este trabalho de pesquisa avança no sentido de expandir a base de conhecimento do protótipo, a fim de analisar os efeitos de

diferentes estratégias de controle sobre o desempenho do sistema de manufatura.

Agradecimentos

O autor gostaria de agradecer o apoio do CNPq e da FAPERGS para a realização deste trabalho, bem como aos avaliadores por suas sugestões, que melhoraram de forma significativa a versão final deste artigo.

Referências Bibliográficas

- ACKERMANN, F. & SWEENEY, M.:** *Graphics COPE User Guide, for Version 2*. University of Strathclyde, Glasgow, 1995.
- ALY, A.A. & SUBRAMANIAM, M.:** “Design of an FMS design decision support system”. *Int. J. Prod. Res.*, 31, 2252-2273, 1993.
- BARROW, H.G.:** “Verify: A program for proving correctness of digital hardware designs”. *Artificial Intelligence*, 24, 437-491, 1984.
- BORENSTEIN, D.:** “OOSIMFlex: An object oriented simulator for flexible manufacturing systems”. Working paper 93/14, Department of Management Science, University of Strathclyde, 1993.
- BORENSTEIN, D.:** “Intelligent decision support system for flexible manufacturing system design”. *Annals of Oper. Res.*, 77, 129-156, 1998.
- FLOSS, P. & TALAVAGE, J.:** “A Knowledge-based design assistant for intelligent manufacturing systems”. *Journal of Manufacturing Systems*, 9, 87-102, 1990.
- GREENWOOD, N.:** *Implementing Flexible Manufacturing Systems*. Wiley, London, 1989.
- KUSIAK, A. (Ed.):** *Artificial Intelligence: Implications for CIM*. IFS (Publications) Ltd., UK, 1988.
- LAW, A.M. & KELTON, D.W.:** *Simulation Modeling and Analysis*. 2nd.ed., McGraw-Hill, New York, 1991.
- LAW, A.M. & CARSON, J.S.:** “A sequential procedure for determining the length of a steady-state simulation”. *Oper. Res.*, 27, 1011-1025, 1979.
- MELlichAMP, J.M. & WAHAB, A.F.A.:** “An expert system for FMS design”. *Simulation*, 48, 201-208, 1987.
- MELlichAMP, J.M.; KWON, O.-J.; WAHAB, A.F.A.:** “FMS Designer: An expert system for flexible manufacturing system design”. *Int. J. Prod. Res.*, 28, 2013-2024, 1990.
- MITAL, A. & ANAND, S. (Eds.):** *Handbook of Expert Systems Applications in Manufacturing Structures and Rules*. Chapman & Hall, London, 1994.
- RUSH, H.; HOFFMAN, K.; BESSANT, J.:** “Evaluation of flexible manufacturing systems scheme”. HMSO, London, 1992.
- SON, Y.K. & PARK, C.S.:** “Economic measure of productivity, quality and flexibility in advanced manufacturing systems”. *Journal of Manufacturing Systems*, 6, 193-207, 1987.
- TALAVAGE, J.J. & SHODHAN, R.:** “Automated development of design and control strategy for FMS”. *Int. J. of Computer-Integrated Manufacturing*, 5, 355-348, 1992.
- TCHIJOV, I. & SHEININ, R.:** “Flexible manufacturing systems (FMS): Current diffusion and main advantages”. *Technological Forecasting and Social Changes*, 35, 28-32, 1989.

COMBINING SIMULATION AND KNOWLEDGE-BASED SYSTEMS FOR ADVANCED MANUFACTURING SYSTEM DESIGN

Abstract

This article describes a tandem knowledge-based system developed to verify whether a specific advanced manufacturing system (AMS) scenario meets the design requirements defined by the design team. If a problem is found, the system starts an analysis-diagnosis-recommendation cycle in order to identify the possible cause(s) of the design deficiency as well as to propose changes to improve the performance of the AMS scenario. For this cycle to be successful, the developed system combines simulation and knowledge-based systems, using the experience and knowledge acquired by specialists during previous AMS projects. A case study illustrates the effectiveness of the system.

Key words: artificial intelligence, design and modelling, advanced manufacturing systems, simulation.