



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Aline Cristina Maciel

**AVALIAÇÃO DA SIMULAÇÃO A EVENTOS
DISCRETOS, PROJETO DE EXPERIMENTOS E
FUNÇÃO DESEJABILIDADE PARA VERIFICAR A
VIABILIDADE DE METAS ESTABELECIDAS PARA
UMA CÉLULA DE MANUFATURA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos à obtenção do título de **Mestre em Ciências em Engenharia de Produção**.

Área de Concentração: Engenharia de Produção

Orientador: Prof. José Arnaldo Barra Montevechi, Dr.

Co-orientador: Prof. Fabiano Leal, Dr.

Itajubá

2013



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Aline Cristina Maciel

**AVALIAÇÃO DA SIMULAÇÃO A EVENTOS
DISCRETOS, PROJETO DE EXPERIMENTOS E
FUNÇÃO DESEJABILIDADE PARA VERIFICAR A
VIABILIDADE DE METAS ESTABELECIDAS PARA
UMA CÉLULA DE MANUFATURA**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 29 de julho de 2013, conferindo à autora o título de **Mestre em Ciências em Engenharia de Produção**.

Banca Examinadora:

Prof. José Arnaldo Barra Montevechi, Dr. (Orientador)

Prof. Fabiano Leal, Dr. (Co-orientador)

Prof. João José de Assis Rangel, Dr.

Prof. Alexandre Ferreira de Pinho, Dr.

Itajubá

2013

DEDICATÓRIA

À Deus, por mais este degrau conquistado.

À minha mãe, Zélia, pela paciência e amor.

Ao meu pai, João, exemplo de trabalho e dedicação.

Ao meu irmão, Jonas, pela ajuda e incentivo.

*Ao meu esposo, Kleber, pelo amor, paciência e companheirismo, que me
fizeram chegar aqui.*

Aos meus amigos pelo apoio e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. José Arnaldo Barra Montevechi, pelos seus ensinamentos, conselhos, incentivo, paciência, compreensão, amizade e atenção. Muito obrigada!

Ao meu coorientador, Prof. Fabiano Leal, pelo auxílio, paciência e sugestões. Minha sincera gratidão!

Ao Instituto de Engenharia de Produção e Gestão da UNIFEI, na figura de seus grandes professores e colaboradores, pela oportunidade que me foi concedida, bem como aos colegas do Instituto com os quais a troca de experiências e o convívio fizeram nascer grandes amizades.

Ao Rafael Miranda pela grande ajuda na elaboração de artigos e ensinamentos sobre DOE e otimização. Muito obrigada!

Ao amigo Igor Oshiro, por me instigar a cursar o mestrado.

As amigas Tábata, Bárbara e Danielle Campos pelos conselhos, auxílio e companhia, mas acima de tudo pelas boas e longas conversas!

Aos colegas do NEAAD, pelo companheirismo e por tornarem a jornada mais leve.

À CAPES e à FAPEMIG, pelo apoio financeiro concedido para realização deste trabalho por meio do programa de bolsas de estudo.

*“Não receies a adversidade: lembra-te de que os papagaios de papel
sobem contra o vento e não a favor dele.”*

(Mabie, H.)

RESUMO

Este trabalho integra técnicas como Simulação a Eventos Discretos (SED), o Projeto de Experimentos e a Função Desejabilidade para apoio à tomada de decisão. Para isto, foi analisado um objeto de estudo em uma empresa multinacional de autopeças, na qual está inserida uma área de corte com oito máquinas idênticas, que produzem o componente de maior valor agregado do produto final da empresa. Atualmente, essas máquinas possuem uma Disponibilidade Operacional (DO) e produtividade relativamente baixas devido às inúmeras paradas não programadas que ocorrem durante o turno de produção. Nesse contexto, o trabalho utiliza a SED para modelar a área de corte estudada e, em conjunto com ferramentas como o Projeto de Experimentos e a Função Desejabilidade, verifica se as metas para o indicador DO e para a produtividade, estabelecidas pela gerência da organização, podem ser alcançadas simultaneamente. Através do uso da SED e o Projeto de Experimentos, notou-se que com todos os fatores no estado de melhoria (nível -) é possível um aumento médio do Total Produzido e da DO de 18,3 % e 38,3%, respectivamente. Constatou-se também que se apenas o fator A (tempo de *setup*) atingir o estado de melhoria, é possível um aumento médio de 11,9% e 21,3%, no Total Produzido e na DO, respectivamente. Já com a integração destas duas técnicas com a Função Desejabilidade foi possível notar que a meta de DO estabelecida pela gerência não pode ser atingida simultaneamente à meta do Total Produzido por turno. A explicação para tal fato é que não é necessário atingir 60% para a DO para que se alcançar a meta estabelecida para o Total Produzido de 170000 peças por turno. Esses resultados obtidos auxiliam a gerência da empresa a direcionar corretamente os investimentos na redução da duração das paradas não programadas das máquinas de corte, de forma a encontrar resultados desejados.

Palavras-chave: Simulação a Eventos Discretos, Disponibilidade Operacional, DOE, Otimização.

ABSTRACT

This paper integrates techniques such as discrete event simulation (DES), the Design of Experiments and Desirability Function to support decision making. For this, it was considered an object of study in a multinational auto parts, which is inserted in an cutting area with eight identical machines, which produce the highest value-added component of the company final product. Currently, these machines have an Availability Efficiency (AE) and relatively low productivity due to several unscheduled downtimes that occur during the production shift. In this context, the paper uses the DES to model the cutting area studied, together with tools such as Design of Experiments and Desirability Function checks whether the targets for the indicator AE and productivity, established by the organization management, can be reached simultaneously. Through the use of DES and Design of Experiments was noted that all the factors in the improvement state (level -) it is possible an average increase of Total Produced and AE of 18.3% and 38.3%, respectively. It was also found that if only the first factor (setup time) achieves improvement state, it will be possible to reach an average increase of 11.9% and 21.3% in the Total Produced and AE, respectively. Now with the integration of these two techniques with Desirability Function, it was possible to note that the AE goal established by the management can not be achieved simultaneously with the goal of Total Produced per shift. The explanation for this fact is that it is not necessary to reach 60% for the DO to achieve the target set for the Total Produced 170,000 parts per shift. These results help the management of the company to correctly direct investments to reduce the duration of unscheduled downtimes of cutting machines, in order to find desired results.

Keywords: Discrete Event Simulation, Availability Efficiency, DOE, Optimization.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
DO	Disponibilidade Operacional
DOE	<i>Design of Experiments</i>
FAPEMIG	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais
GSP	<i>General Simulation Program</i>
IDEF	<i>Integrated definition methods</i>
ISI	<i>Institute Scientific Information</i>
MP	Matéria-prima
NEAAD	Núcleo de Estudos Avançados para Auxílio à Decisão
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i>
OTE	OEE Total
PPGEP	Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção
RPD	<i>Robust Parameter Design</i>
SED	Simulação a Eventos Discretos
SimPHO	<i>Ontology for Simulation Modeling of Population Health</i>
SPSA	<i>Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation</i>
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Sequência de passos para um projeto de simulação	24
Figura 2.1 – Aplicação de Fluxograma	34
Figura 2.2 – Elementos básicos de um ACD.....	35
Figura 2.3 - Cálculo do OEE e as seis grandes perdas	44
Figura 2.4 - Seis grandes perdas.....	44
Figura 2.5 - Modelo geral de um processo	47
Figura 2.6 - Representação modelagem, simulação e otimização.....	55
Figura 3.1 – Leiaute ilustrativo da área de corte com oito máquinas.....	61
Figura 3.2 - Ocorrência de paradas registradas, em um trimestre, na máquina M1	63
Figura 3.3 – Modelo conceitual do processo de corte	64
Figura 3.4 - Tela do ProModel® para o modelo desenvolvido com as oito máquinas idênticas	68
Figura 3.5 - Detalhe de uma das oito máquinas que compõem a área de corte.....	68
Figura 3.6 - Gráfico de Teste de Normalidade dos resíduos para a saída Total Produzido	77
Figura 3.7 - Gráfico de Teste de Normalidade dos resíduos para a saída DO.....	78
Figura 3.8 - Carta de controle para resíduos padronizados para a saída Total Produzido.....	78
Figura 3.9 - Carta de controle para resíduos padronizados para a saída DO.....	79
Figura 3.10 - Efeito dos tempos de parada não programadas sobre o Total Produzido da área de corte.....	80
Figura 3.11 - Ordenação dos fatores e interações que mais impactam no Total Produzido da área de corte	81
Figura 3.12 - Efeito dos tempos de parada não programadas sobre a DO da área de corte	84
Figura 3.13 - Ordenação dos fatores e interações que mais impactam na DO da área de corte	85

LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1- Análise dos principais artigos relacionados à pesquisa.....	20
Quadro 2.1- Particularidades das principais técnicas de Projeto e Análise de Experimentos..	52
Quadro 2.2- Objetivos de Otimização no Método Desejabilidade	57
Quadro 3.1- Fatores e níveis considerados no projeto experimental.....	73
Quadro 3.2- <i>Ranking</i> de dificuldade na implantação de melhorias para atingir o nível (-).....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Dados de entrada referentes à máquina de corte	66
Tabela 3.2 – Resultado do teste de Kleijnen (1995) para a máquina M1	71
Tabela 3.3 – Análise de variâncias considerando a saída Total Produzido	80
Tabela 3.4 – Comparativo entre o Total Produzido atual e no caso da melhoria de todos os fatores.....	82
Tabela 3.5 – Comparativo entre o Total Produzido atual e no caso de melhoria do fator A....	82
Tabela 3.6 – Análise de variâncias considerando a saída DO	83
Tabela 3.7 – Comparativo entre a DO atual e no caso de melhoria de todos os fatores	85
Tabela 3.8 – Comparativo entre a DO atual e no caso de melhoria do fator A.....	86
Tabela 3.9 – Resultados da Função Desejabilidade para variáveis de resposta, considerando nível (+) e (-) para os todos os fatores.....	86
Tabela 3.10 – Soluções encontradas para ambas as variáveis de resposta utilizando Função Desejabilidade	87
Tabela 3.11 – Tempo de duração dos fatores para atingir as soluções encontradas no Função Desejabilidade para ambas variáveis de resposta.....	87
Tabela 3.12 – Resultado da simulação para os parâmetros de otimização	88

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Questões da Pesquisa	16
1.2	Objetivos Geral e Específico	16
1.3	Justificativas	17
1.4	Contribuição Teórica	18
1.5	Limitações do Trabalho	21
1.6	Aderência ao Programa de Pós-Graduação	21
1.7	Metodologia de Pesquisa	21
1.7.1	Modelagem e Simulação	21
1.7.2	Etapas de uma Pesquisa em Modelagem e Simulação	22
1.8	Considerações finais	25
2	REVISÃO TEÓRICA	26
2.1	Simulação a eventos discretos	26
2.1.1	Breve histórico da simulação	27
2.1.2	O que é simulação?	28
2.1.3	Pesquisas em simulação a eventos discretos	30
2.2	Modelagem Conceitual	31
2.2.1	Técnicas de representação de modelos conceituais	32
2.2.2	Pesquisas em modelagem conceitual	36
2.3	Verificação e Validação	37
2.3.1	Técnicas de Verificação e Validação	37
2.3.2	Pesquisas relacionadas à verificação e validação	40
2.4	Indicadores de Desempenho	41
2.4.1	Disponibilidade Operacional	42
2.4.2	Como calcular a Disponibilidade Operacional	43
2.4.3	Pesquisas relacionadas a indicadores de desempenho	45
2.5	Projeto de Experimentos simulados	46
2.5.1	O DOE na simulação	46
2.5.2	Projeto fatorial completo	51
2.5.3	Pesquisas em projeto de experimentos simulados	53
2.6	Otimização	54

2.6.1	Simulação combinada à otimização	54
2.6.2	Método desejabilidade	55
2.6.3	Pesquisas em otimização via Função Desejabilidade.....	58
2.7	Considerações finais	60
3	PLANEJAMENTO E CONDUÇÃO DA PESQUISA	61
3.1	Aplicação do Método de Pesquisa	61
3.1.1	Concepção	61
3.1.2	Implementação	67
3.1.3	Análise.....	71
3.2	Considerações finais	88
4	CONCLUSÕES.....	89
	APÊNDICE A - Resultados replicados na matriz experimental para o Total Produzido.....	92
	APÊNDICE B - Resultados replicados na matriz experimental para a DO	94
	APÊNDICE C - Efeitos Estimados e Coeficientes para o Total Produzido	96
	APÊNDICE D - Efeitos Estimados e Coeficientes para a DO	98
	APÊNDICE E – Artigos Gerados.....	100
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
	ANEXO A - Símbolos do IDEF-SIM.....	113

1 INTRODUÇÃO

Companhias multinacionais de manufatura têm se dedicado a se tornarem empresas de Classe Mundial, que, para Murugesan, Kumar e Kumar (2012), são as que possuem as melhores práticas. Ainda segundo os mesmos autores, para serem consideradas empresas de classe mundial, essas devem ter o compromisso de serem as melhores em qualidade, flexibilidade, velocidade de entrega, confiabilidade de entrega e inovação, maximizando seu desempenho e ampliando sua competitividade.

Este trabalho, ciente da importância de uma elevada capacidade produtiva e da melhor utilização dos recursos existentes, integra técnicas como a Simulação a Eventos Discretos (SED), o Projeto de Experimentos (*Design of Experiments* – DOE) e a Função Desejabilidade (*Desirability Function*) para apoio à tomada de decisão. Para isto utiliza como objeto de estudo uma área de corte industrial com oito máquinas idênticas com alto volume de produção, baixa variedade de produtos e pequenos lotes. O acesso às máquinas foi autorizado por uma empresa brasileira de autopeças, na qual a baixa Disponibilidade Operacional (DO) da área de corte é um fator crítico que limita sua capacidade produtiva e torna a empresa menos competitiva devido à necessidade de novos investimentos em equipamentos, no caso de novos projetos ou novas demandas. Além disso, estas máquinas produzem o subproduto de maior impacto no preço do produto final e quando esse se eleva, a companhia fica em desvantagem perante seus concorrentes.

Desta forma, a SED pode ser utilizada para modelar a área de corte e gerar os resultados para o indicador DO desse setor. Como informação adicional, para auxiliar a tomada de decisão pela gerência da empresa, o modelo também fornece resultados da produtividade representada aqui pela variável Total Produzido por turno para a área de corte. Segundo Sharma, Shudhanshu e Bhardwaj (2012), para melhorar a produtividade, é essencial melhorar o desempenho dos sistemas de fabricação.

A partir desse modelo, pode-se utilizar o DOE para identificar o impacto que as paradas não programadas têm na DO e no Total Produzido da área de corte, além de verificar possíveis interações entre essas paradas.

No caso estudado, podem ocorrer seis tipos de paradas não programadas: tempo de *setup*, tempo de manutenção corretiva, tempo de troca no término de MP1 (matéria-prima 1), tempo de troca no término de MP2 (matéria-prima 2), problemas com ferramental e problemas com abastecimento. O detalhamento de tais paradas se dará no item 3.1.3.1,

durante a definição do projeto experimental. Kelton e Barton (2003) afirmam que, embora os métodos de planejamento de experimentos tenham sido criados para experimentos físicos, esses podem ser utilizados com relativa facilidade em experimentos simulados, criando oportunidades de melhoria de numerosos sistemas, especialmente para aqueles nos quais a realização de um experimento físico seja árdua ou impraticável.

Feito isso, podem-se utilizar os resultados dos experimentos para analisar se as metas estabelecidas pela gerência da empresa para a DO e o Total Produzido por turno, da área de corte, podem ser atingidas simultaneamente. Para o caso em que se deseje otimizar um sistema com múltiplas respostas, Zhang, Jiang e Guo (2009) afirmam que a Função Desejabilidade, de Derringer e Suich (1980), é empregada para que se determinem os parâmetros de otimização, sendo tal função considerada um dos métodos mais utilizados na indústria em processos de otimização de múltiplas respostas.

Os resultados obtidos poderão ser utilizados na tomada de decisões pela gerência da empresa, no tocante ao direcionamento de investimentos em melhorias na área de corte, para aprimorar seu desempenho. Atualmente, as decisões relativas a esse direcionamento são tomadas baseadas na opinião dos especialistas do processo. Estes analisam dados históricos das máquinas com informações sobre a ocorrência e duração das paradas não programadas, além de realizar observações do processo. Desta maneira, os especialistas tendem a priorizar as melhorias para redução da duração das paradas de maior ocorrência média, contudo sem informações se estas possuem impacto significativo nas variáveis de interesse, DO e Total Produzido, ou mesmo se há interações entre as paradas.

Vale ressaltar ainda que não é trivial visualizar alteração de parâmetros e suas consequências em ambiente estocástico e dinâmico – como a área de corte – e deste modo não é fácil tomar decisão de qual o melhor direcionamento de investimentos em melhoria na duração dos tempos de parada não programada, para que se alcance resultados desejados apenas baseados na opinião de especialistas.

Sendo assim, esse trabalho contribui com a integração da SED, com o Projeto de Experimentos e a Função Desejabilidade, tornando-se importante instrumento de suporte à decisão em uma companhia de autopeças. É importante ressaltar que este trabalho não tem a intenção de propor as ações de melhoria no sistema que resultariam na redução da duração dos tempos de paradas não programadas.

Vale salientar que o trabalho aqui apresentado está estruturado em seis capítulos, sendo o primeiro a introdução, no qual foi apresentado o contexto do trabalho. Na sequência, no mesmo capítulo, serão apresentadas as questões da pesquisa, os objetivos geral e específico, a

justificativa e a relevância do tema e objeto de estudo, a contribuição teórica do trabalho, as limitações, a aderência ao programa da pós-graduação, a metodologia utilizada, bem como a classificação da pesquisa. O capítulo 2 apresenta uma breve fundamentação teórica que abrange a SED, a modelagem conceitual, verificação e validação de modelos, indicadores de desempenho, planejamento de experimentos, otimização e exemplos de pesquisas relacionadas a estes temas. Em seguida, no capítulo 3, a metodologia de pesquisa é aplicada ao objeto de estudo e os resultados alcançados são analisados. No capítulo 4, as conclusões do estudo são apresentadas. Os capítulos 5 e 6 contemplam as referências utilizadas e as publicações ou submissões de artigos, respectivamente.

1.1 Questões da Pesquisa

Como integrar a SED, DOE e Função Desejabilidade, de forma a contribuir com a tomada de decisões?

As metas estabelecidas em uma determinada empresa, para a DO e para o Total Produzido, são possíveis de serem alcançadas?

1.2 Objetivos Geral e Específico

Considerando esse contexto, o presente trabalho explora os dados relativos à capacidade de uma área composta de oito máquinas de corte, idênticas, em uma empresa fabricante de um componente automotivo.

O objetivo geral desta dissertação é verificar se metas para o indicador DO e para a produtividade (Total Produzido por turno), estabelecidas pela gerência da organização, são possíveis de serem alcançadas.

Para tal, fez-se o uso da SED associada a ferramentas como DOE e Função Desejabilidade. Os resultados obtidos auxiliam a gerência da empresa a direcionar corretamente os investimentos na redução da duração das paradas não programadas das máquinas de corte, de forma a encontrar resultados desejados.

Considerando o objetivo geral proposto, delineiam-se os seguintes objetivos específicos a serem explorados no trabalho:

- Ranquear os fatores de maior impacto nas variáveis de resposta, DO e Total Produzido, bem como suas possíveis interações utilizando a ferramenta DOE.
- Verificar se as metas para a DO e Total produzido por turno, definidas pela empresa, podem ser atingidas simultaneamente através da Função Desejabilidade, uma

técnica de otimização.

- Gerar informações para a gerência da área, com o intuito de auxiliar a tomada de decisão no que diz respeito à viabilidade das metas estabelecidas e ao direcionamento de investimentos na redução da duração dos tempos de paradas não programadas.

1.3 Justificativas

No que diz respeito à relevância deste tema, Flynn *et al.* (1997), Hayes e Wheelwright (1985) empregaram o termo classe mundial pela primeira vez. Segundo estes autores, este termo descrevia as organizações que alcançaram uma vantagem competitiva a nível mundial através do uso de seus recursos de produção como uma arma estratégica. Os autores citam uma série de práticas críticas, incluindo desenvolvimento da força de trabalho, desenvolvimento de uma gestão de grupo tecnicamente competente, competição pela qualidade, incentivo à participação dos trabalhadores e investimento na melhoria de equipamentos e instalações. Para Giffi, Roth e Seal (1990), a qualidade e o cliente são os focos principais da fabricação em uma empresa classe mundial, apoiado por uma combinação de estratégia de produção e capacidades, abordagens de gestão, fatores organizacionais, ativos humanos, tecnologia e medição de desempenho. Murugesan, Kumar e Kumar (2012) destacam, conforme já informado anteriormente, que para serem consideradas empresas de classe mundial, essas devem ter o compromisso de serem as melhores em qualidade, flexibilidade, velocidade de entrega, confiabilidade de entrega e inovação, maximizando seu desempenho e ampliando sua competitividade. Diante deste cenário mundial, a confiabilidade e a disponibilidade dos equipamentos são cruciais (CAPETTI, 2005).

Neste contexto, a SED tem sido utilizada de forma crescente como auxiliar à tomada de decisão por meio de modelagem, análise e projetos de sistemas, com o intuito de que se visualize o impacto de mudanças de parâmetros no desempenho desses sistemas (CHO, 2005; BANKS *et al.*, 2009; GARZA-REYES *et al.*, 2010; SARGENT, 2011). Alguns exemplos de aplicações relacionando a SED com indicadores de desempenho, tais como a OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) ou um de seus fatores, podem ser vistos em Huang *et al.* (2003), Kenyon *et al.* (2005), Marvel, Schaub e Weckman (2008), Garza-Reyes *et al.* (2010) e Subramanya e Shobha (2012).

Maciel *et al.* (2012) afirmam que a utilização da SED no cálculo da DO, um dos fatores do OEE (*Overall Equipment Effectiveness*), é um assunto pouco encontrado na literatura.

Com o intuito de preencher esta lacuna na literatura e apoiar a tomada de decisão por meio da integração da SED, DOE e otimização (Função Desejabilidade), justifica-se a importância da escolha desse tema pela sua relevância frente às organizações.

Quanto à relevância do objeto de estudo desse trabalho, a área estudada é composta por máquinas de corte, que têm vital importância na capacidade fabril de uma empresa do setor de autopeças, sendo estes equipamentos caros com alto custo de manutenção.

Esta área de corte é o gargalo da empresa em questão e produz o subproduto, que é o principal componente do produto final. E este subproduto tem a maior participação, dentre os demais componentes, no preço de venda do referido produto.

A área em questão apresenta baixa DO e produtividade (Total Produzido por turno), que necessitam ser melhoradas de forma a reduzir a necessidade de novos investimentos em equipamentos para atender às variações de demanda do mercado automotivo.

Os critérios de seleção do objeto de estudo foram os seguintes:

- Uma área crítica para a empresa em questão foi tomada para o estudo.
- A escolha da máquina foi realizada pelos especialistas da empresa por sua relevância em representar as demais existentes no local e pela facilidade de acesso aos dados da mesma.
- A duração das paradas não programadas desta máquina vem sendo reduzida, na empresa estudada, com o intuito de ampliar a capacidade efetiva de produção, representada pelo indicador DO e Total Produzido. Mas, o resultado alcançado até o momento ainda não satisfaz as necessidades da empresa.

Assim, para este objeto de estudo, justifica-se a aplicação da metodologia de modelagem e simulação, uma vez que a operação das máquinas é influenciada por vários fatores, tais como: paradas não programadas, frequência de ocorrência de tais paradas, tempo de ciclo e intervenção humana no processo, todas regidas por variáveis estocásticas e dinâmicas. Dessa forma, pretende-se observar o comportamento do modelo durante um determinado período de tempo sem interferência no sistema real.

1.4 Contribuição Teórica

A contribuição teórica foi evidenciada por meio de uma análise bibliométrica do tema, e como esta se desenvolveu ao longo dos anos, realizada no dia 22/03/2013.

Para Bryman e Bell (2007), o objetivo da bibliometria é permitir afirmar, com confiabilidade, o que está sendo pesquisado em diversas áreas do conhecimento, ou seja, fornece informações para que se possa argumentar sobre o assunto de interesse.

As informações e artigos tiveram como uma das bases de pesquisa o *Institute Scientific Information* – ISI, que para Targino e Garcia (2000) é uma boa ferramenta para a análise da produção científica, sendo a mais abrangente base de dados de informações científicas. Em adicional a esta base, também foi utilizada a base Scopus, que para Herculano e Norberto (2012), é o maior banco de dados de resumos e citações, com cerca de 17 mil revistas que surgiu para competir com o ISI.

A análise bibliométrica foi efetuada abordando os principais artigos sobre Simulação a Eventos Discretos, Disponibilidade Operacional, Projetos de Experimentos e Otimização. Primeiramente, iniciou-se a busca das publicações na base de dados ISI limitando a pesquisa aos artigos nas áreas de Engenharia de Manufatura e Engenharia Industrial e, em seguida, na base Scopus.

Em ambos os bancos de dados, não foram encontrados artigos com todas as palavras chaves deste trabalho. Limitando as palavras chaves a: simulação a eventos discretos, Projeto de Experimentos e otimização, foram encontrados 9 artigos no ISI e 22 no Scopus, sendo que apenas um desses artigos utilizava a Função Desejabilidade, o de Dabbas *et al.* (2001); os demais utilizavam outras ferramentas de otimização.

O Quadro 1.1 reúne os principais resultados, considerando os 5 artigos e 1 capítulo de livro dos autores Montevechi, Miranda e Friend (2012), relevantes ao tema estudado. Os artigos foram classificados quanto ao ano de ocorrência, do mais recente ao mais antigo, e quanto ao foco da pesquisa.

Em 23/03/2013, utilizando as mesmas palavras chaves no banco de periódicos CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), foram encontrados os mesmos artigos do ISI. Em ambos os bancos, nesta mesma data, não foram encontrados artigos nacionais relacionados ao tema.

Dentre os artigos encontrados, há duas vertentes de cálculo do OEE, e consequentemente da DO:

- Baseados em Nakajima (1989): *The Productivity Development Team* (1999), Branco Filho (2006), Braglia, Frosolini e Zammori (2009).
- Baseados em Normas Regionais específicas para Indústrias de Semicondutores como a SEMI E79 (2000), SEMI E10 (2009), Huang *et al.* (2003), Wang e Pan (2011).

Quadro 1.1- Análise dos principais artigos relacionados à pesquisa

Ano	Autor(es)	Foco da pesquisa
2012	Montevechi, Miranda e Friend	Os autores apresentam exemplos reais de como realizar análise de sensibilidade com planejamento fatorial. Para tal, foram utilizados modelos de SED desenvolvidos no software ProModel®. Para tal objetivo, dois objetos de estudo são apresentados, comparando a otimização realizada sem investigação prévia da significância da variável de entrada com a otimização realizada em reduzido espaço de busca. Então, é realizada uma comparação dos resultados da otimização, sem e com a análise de sensibilidade.
2012	Amiri e Mohtashami	Os autores apresentam uma formulação de múltiplos objetivos do problema de alocação de <i>buffer</i> em linhas de produção instáveis. Propõem uma metodologia baseada em simulação, que pode considerar distribuições de funções gerais para todos os parâmetros de linhas de produção. Utilizaram o planejamento fatorial para construir um metamodelo para estimar a taxa de produção discreta baseado em um modelo de SED. Fizeram uso do algoritmo genético combinado com as técnicas mencionadas para solucionar um modelo de múltiplos objetivos e determinar o tamanho ideal (ou quase ideal) de cada armazenamento de <i>buffer</i> .
2011	Miranda e Castillo	Estes autores analisam a viabilidade do método <i>Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation</i> (SPSA) como otimizador para problemas com parâmetros robustos da pesquisa. Esta característica torna SPSA atraente para <i>robust parameter design</i> (RPD), onde alguns fatores afetam a variação da resposta (s) de interesse. Neste artigo, a viabilidade de SPSA como um otimizador RPD é apresentada, em primeiro lugar, quando a função objetiva é conhecida, e em seguida, quando a função objetiva é estimada por meio de uma SED.
2001	Kenne e Gharbi	Os autores implementaram um novo método para controlar a taxa de produção de sistemas de manufatura, baseado na combinação de <i>stochastic optimal control</i> , SED, DOE e metodologia de superfície de resposta. O sistema estudado consiste de diversas máquinas paralelas, que produzem vários produtos e que estão sujeitas a falhas, reparos e à capacidade do processo.
2001	Dabbas <i>et al.</i>	Os autores afirmam que em empresas de manufatura de semicondutores existem múltiplas respostas de interesse. O objetivo do trabalho é otimizar simultaneamente estas diferentes respostas ou encontrar a melhor solução. Para tal os autores combinaram SED, DOE e técnicas de otimização de múltiplas respostas como a superfície de resposta e a Função Desejabilidade. Os autores validam essa nova técnica para análise de performance em dois objetos de estudo.

Desta maneira, segundo Nakajima (1989), as empresas que apresentam seus resultados através do indicador OEE podem calculá-lo de maneiras diferentes. Portanto, antes de se analisar os resultados, deve-se conhecer a forma de cálculo utilizada.

1.5 Limitações do Trabalho

É importante ressaltar que este trabalho não tem a intenção de propor as ações de melhoria no sistema, que resultariam na redução da duração dos tempos de paradas não programadas.

Os resultados encontrados são limitados ao objeto de estudo. Entretanto, o uso integrado da SED, do DOE e a ferramenta de otimização pode ser utilizado para outros objetos de estudo.

1.6 Aderência ao Programa de Pós-Graduação

O Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP), da UNIFEI, tem como objetivo contribuir para a formação de profissionais de nível superior das áreas de ciências exatas e administração em áreas do conhecimento já consolidadas, bem como aquelas de pesquisa tecnológica e gestão de sistemas produtivos. O referido programa concentra-se em três áreas de pesquisa: modelagem, otimização e controle; qualidade e produtos; sistemas de produção e logística (PPGEP, 2013).

Neste sentido, a análise da viabilidade de metas para indicadores através do uso de SED, DOE e otimização, adere aos propósitos do PPGEP da UNIFEI.

1.7 Metodologia de Pesquisa

1.7.1 Modelagem e Simulação

A pesquisa aqui desenvolvida segue o método quantitativo: modelagem e simulação. Esta classificação da modelagem como quantitativa deve-se ao fato que, em um determinado domínio, os modelos de relações causais entre variáveis de controle e de desempenho são desenvolvidas, analisadas e/ou testadas, e podem ser alteradas (BERTRAND E FRANSOO, 2002; LEAL, 2008; MIRANDA, 2012).

Este método para Chung (2004) é o processo de criar e experimentar um sistema real através de um modelo matemático computadorizado. Como sistema entende-se um conjunto de componentes ou processos que interagem entre si, que recebem entradas e oferecem resultados para algum propósito (MONTEVECHI *et al.*, 2010).

Bertrand e Fransoo (2002) classificam as metodologias de pesquisa de modelagens quantitativas em axiomáticas e empíricas. Nas pesquisas axiomáticas, para estes autores, há a geração de conhecimento a respeito do comportamento de certas variáveis e, além disso, pode

produzir conhecimento sobre como manipular algumas variáveis no modelo. Morabito Neto e Pureza (2012) ainda destacam que os pesquisadores desta linha olham o problema como um modelo matemático que possa ser analisado. Já, a pesquisa empírica, foca em resultados e medidas empíricas. Nesta linha, o pesquisador quer garantir a adequação entre o modelo desenvolvido e as observações e ações no sistema real. Neste tipo de pesquisa, os resultados teóricos são aplicados em processos reais (BERTRAND E FRANSOO, 2002).

Bertrand e Fransoo (2002) e Morabito Neto e Pureza (2012) dividem a classificação das pesquisas axiomáticas e empíricas em descritivas e normativas:

- Axiomáticas Normativas: preocupadas em desenvolver normas, estratégias e ações com intuito de aprimorar os resultados existentes na literatura.
- Axiomáticas Descritivas: visam descrever o processo que foi modelado; estando os pesquisadores interessados em analisar o modelo, que leva ao entendimento e esclarecimento das características do mesmo.
- Empíricas Descritivas: possuem o intuito de gerar um modelo que descreva adequadamente as relações causais que possam existir no sistema real, levando à compreensão dos processos atuais.
- Empíricas Normativas: preocupam-se com o desenvolvimento de políticas, estratégias e ações para aprimorar um sistema real.

Desta forma, esta dissertação pode ser classificada como uma pesquisa Empírica Normativa, visto que esta tem por objetivo verificar a viabilidade de metas de desempenho de uma área de corte. Metas estas relacionadas ao indicador DO e total produzido, que devem ser alcançadas, simultaneamente, para a área como um todo. E, além disso, direcionar a tomada de decisão no direcionamento de investimento na redução da duração de paradas não programadas.

1.7.2 Etapas de uma Pesquisa em Modelagem e Simulação

Para Silva (2005), o método nos trabalhos de simulação traz a sistemática para seu desenvolvimento, aprimorando a integração entre software, modelador e usuário, e, assim, minimizando a perda de tempo, dinheiro e resultados inconsistentes.

A falta de um correto planejamento durante uma modelagem e simulação é o principal fator da causa de insucesso na maioria dos estudos. Desta forma, simular requer conhecimentos específicos, como conhecer o software utilizado e os passos do método. Além de experiência analítica, estatística, organizacional e de Engenharia (SILVA, 2005).

O método utilizado neste trabalho é o de Montevechi *et al.* (2010). Este método, segundo Paiva (2010) e Costa (2010), baseia-se na estrutura de Chwif e Medina (2006) e representa a lógica de um projeto de simulação, que através do planejamento e análise de experimentos leva a etapa de análise dos resultados do modelo de simulação. A utilização desse método deve-se, especialmente, à sua adequação ao trabalho aqui desenvolvido e à sua contemporaneidade. Conforme afirma Miranda (2012), este método foi apresentado à primeira vez em 2007 e revisado posteriormente em 2010.

Apresentado sob a forma de um fluxograma, Figura 1.1, é composto por três modelos que deverão ser elaborados em três etapas distintas: o modelo conceitual na etapa de concepção, o computacional na etapa de implementação e finalmente o modelo operacional na etapa de análise (MONTEVECHI *et al.*, 2010). Aqui também os modelos devem ser verificados e validados (PAIVA, 2010).

Na primeira fase do método de Montevechi *et al.* (2010), Figura 1.1, “concepção”, o analista de simulação deve entender de maneira clara, o sistema a ser simulado e os seus objetivos, por meio de discussões sobre o problema com os especialistas (CWHIF E MEDINA, 2010). O próximo passo é a criação do modelo conceitual, que para Robinson (2008) constitui-se de uma descrição independente do modelo de simulação que será desenvolvido, delineando os objetivos, entradas, saídas, conteúdo, pressupostos e simplificações do sistema real. Para Cwhif e Medina (2010), o modelo conceitual deve ser representado utilizando-se técnicas para tal fim, assim outras pessoas do projeto podem entender o modelo. Após a elaboração do modelo conceitual, o mesmo deve ser validado (MIRANDA, 2012). A validação será melhor detalhada na seção 2.3. O próximo passo é documentar o modelo conceitual. Kotiadis e Robinson (2008) afirmam que o modelo conceitual inúmeras vezes não é documentado, permanecendo apenas na mente do modelador e dos proprietários do problema. Para estes mesmos autores uma prática adequada para os modeladores seria documentar tanto o modelo conceitual do sistema quanto a descrição do mesmo. Law (2006) afirma uma forma de documentar os pressupostos do modelo, algoritmos, e resumos de dados em um documento escrito é por vezes denominado modelo conceitual. O último passo da etapa de “concepção” é a modelagem dos dados de entrada (MIRANDA, 2012). Os dados de entrada são coletados e ajustados a uma distribuição de probabilidade que alimenta o modelo computacional (COSTA, 2010).

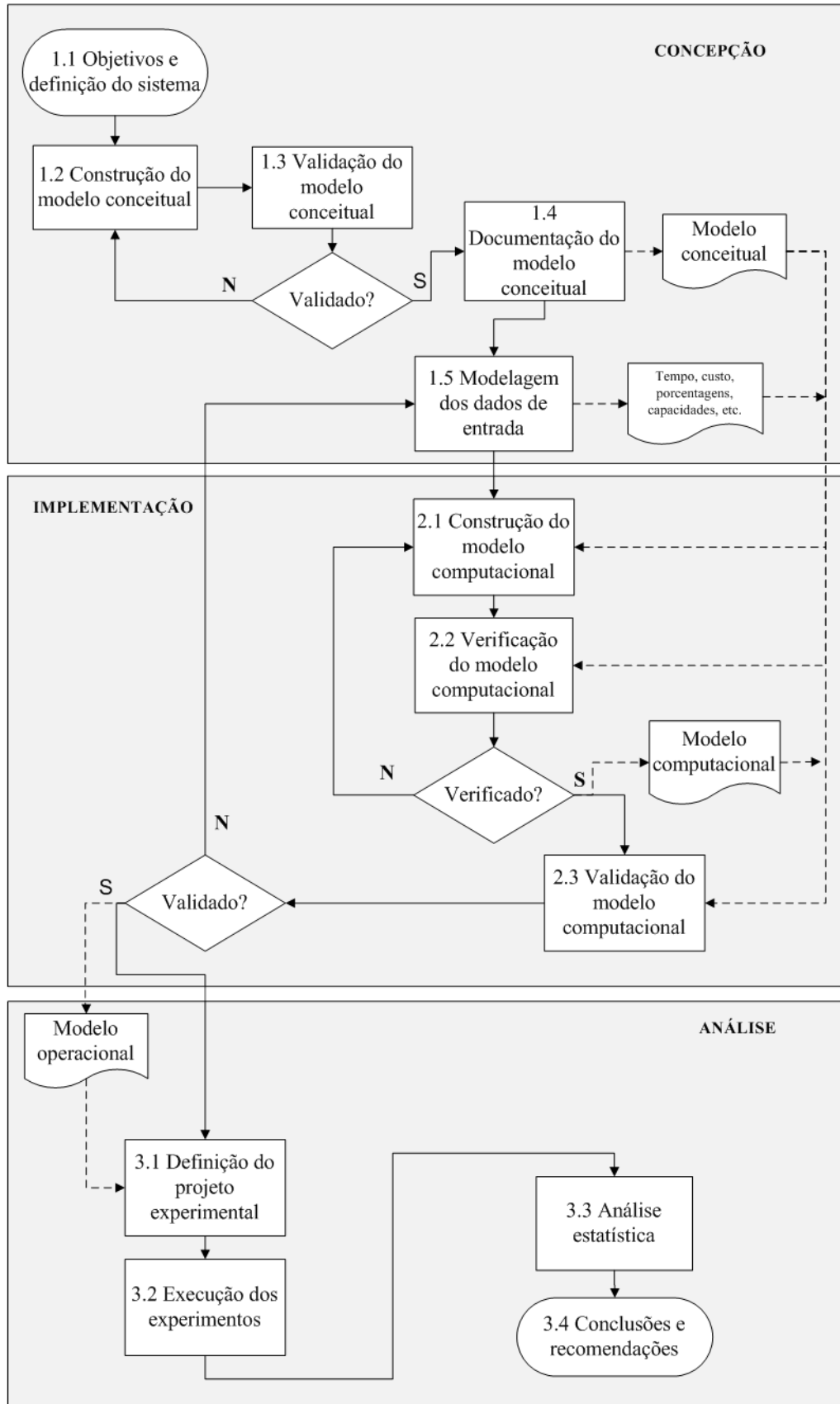


Figura 1.1 - Sequência de passos para um projeto de simulação

Fonte: Adaptado de Montevechi *et al.* (2010)

Conforme Cwhif e Medina (2010), na segunda fase da Figura 1.1, “implementação”, o modelo conceitual é transformado em modelo computacional. Para Miranda (2012) após a construção do modelo computacional, esse deve ser submetido a duas etapas de extrema importância: a verificação e a validação. Ambas etapas também serão melhor detalhadas na seção 2.3.

Na terceira e última etapa da Figura 1.1, conforme Chwif e Medina (2010), a “análise”, o modelo computacional pode ser utilizado para realização de experimentos, gerando assim o modelo experimental ou operacional. Nesta etapa, para estes autores, o modelo é rodado diversas vezes e os respectivos resultados da simulação são analisados e documentados. Para Banks *et al.* (2005), as réplicas realizadas no modelo e a análise dos dados derivados da simulação são utilizados com o intuito de estimar as medidas de desempenho do sistema estudado. Ainda para estes autores, a análise destes resultados gera conclusões e recomendações para o sistema modelado. É possível alterar o modelo e recomeçar o ciclo se o resultado não for satisfatório (CWHIF E MEDINA, 2006).

Segundo Paiva (2010), a estrutura da Figura 1.1, é importante para conduzir o modelador durante o projeto, uma vez que traz uma sequência lógica de passos a serem cumpridos em um projeto de simulação, enquanto que a abordagem de Chwif e Medina (1999) ressalta para o modelador que podem ser necessárias várias iterações para que um projeto de simulação seja concluído, e a cada interação o conhecimento do problema aumenta, lembrando o aspecto de uma espiral.

Pode-se encontrar aplicações do método de Montevechi *et al.* (2010) em diversos trabalhos como: Maciel *et al.* (2012), Rodrigues *et al.* (2012), Queiroz *et al.* (2012), Miranda *et al.* (2010). A aplicação deste método ao objeto de estudo será apresentado detalhadamente no capítulo 3.

1.8 Considerações finais

Este capítulo mostrou o contexto deste trabalho. Foram abordados: as questões da pesquisa, os objetivos, as justificativas, as limitações, a contribuição teórica e a metodologia de pesquisa.

Dessa maneira, promoveu-se um maior entendimento do trabalho que será desenvolvido ao longo desta dissertação.

2 REVISÃO TEÓRICA

O Capítulo 2 aborda os temas tratados nesse trabalho, mais especificamente a teoria da simulação a eventos discretos (SED), a modelagem conceitual, a verificação e validação de modelos, a DOE e uma ferramenta de otimização (Função Desejabilidade). Também apresenta como os pesquisadores relacionam este assunto na literatura. Não se almeja abranger toda a bibliografia existente sobre os temas, tampouco exaurir todas as possibilidades de pesquisa.

2.1 Simulação a eventos discretos

Banks (1998), Chwif e Medina (2006) e Banks *et al.* (2008) definem a simulação a eventos discretos (SED) como aquela em que o estado das variáveis muda em um determinado instante discreto do tempo onde o evento ocorre. E os eventos ocorrem como consequência dos tempos de atividade e espera.

Para Chwif e Medina (2006), além da SED, tem-se a simulação contínua, que também considera a mudança de estado do sistema ao longo do tempo. Entretanto, este tipo de simulação é empregado para modelar sistemas cujo estado varia continuamente com o tempo. Este tipo de simulação emprega equações diferenciais no cálculo das mudanças das variáveis de estado ao longo do tempo.

Para estes mesmos autores os modelos de SED são analisados numericamente e não analiticamente. Métodos analíticos são aqueles que aplicam o raciocínio dedutivo da matemática para “solucionar” o modelo. Agora, os métodos numéricos concentram-se em procedimentos computacionais para “solucionar” modelos matemáticos. Desta maneira, os modelos de simulação que utilizam métodos numéricos, os modelos são “corridos” ao invés de solucionados. Assim, é criada uma história artificial do sistema, a partir das suposições do modelo, e são colhidas observações com o intuito de analisar e estimar medidas reais de desempenho de um sistema. Estes modelos de simulação de um sistema real são complexos e com grande quantidade de dados armazenados e processados, deste modo estes são “rodados” com a ajuda de um computador. Contudo, é possível obter algumas informações através da simulação de modelos pequenos, realizados manualmente (BANKS *et al.*, 2008). Entretanto, este trabalho concentra-se nos modelos de simulação processados com auxílio de computadores.

2.1.1 Breve histórico da simulação

Inicialmente, a simulação foi usada nos EUA, na década de 60, para planejamento de operações militares, tendo como objetivo o planejamento da distribuição de suprimentos nas frentes de batalha e alocação de recursos escassos, obtendo grandes resultados (SILVA, 2005).

De forma, ao apresentar um resumo do histórico completo da simulação, pode-se adotar a divisão em cinco períodos, aplicada por Nance (1995), que contempla os primeiros 31 anos de evolução da simulação. Estes períodos foram sendo complementados por outros autores, com o passar dos anos.

Nance (1995) considerou o desenvolvimento da computação, advento dos *softwares* de simulação e as linguagens de programação, para realizar a seguinte divisão:

1) O Período de Pesquisa (1955-1960): nesse período, a simulação foi desenvolvida com linguagens de programação, como o Fortran e o Pascal (TORRES, 2001). Inúmeras pesquisas foram realizadas buscando-se rotinas de programação que estruturassem e facilitassem a simulação. Surge o primeiro simulador, o *General Simulation Program* (GSP) em 1960 (BANKS *et al.*, 2008). Aqui, todas as funções de um software de simulação deveriam ser programadas pelo analista (CHWIF e MEDINA, 2010). Surgem as primeiras aplicações em sistemas industriais (TORRES, 2001). Mais precisamente nos setores aeroespaciais e de aço, tamanho o investimento necessário (KELTON, SADOWSKI e STURROCK, 1998).

2) O Advento (1961-1965): aqui surgem as primeiras linguagens de programação destinadas à simulação (GPSS, SIMULA I, SIMSCRIPT, CSL, GASP, OPS, DYNAMO e MILITRAN). Estas linguagens apresentam rotinas e símbolos de fluxogramas, que eram conhecidos dos engenheiros de simulação (BANKS *et al.*, 2008). Para este período, Pegden (2010) enumera pioneiros da simulação, como: Markowitz, Hausner e Karr (1962), Gordon (1961), Dahl e Nygaard (1967).

3) O Período de Formação (1966-1970): nesta época os conceitos foram revisados e apurados, com o intuito de representar, de forma mais consistente, cada linguagem de programação. Novas versões de várias linguagens de programação surgiram ou foram reformuladas (GPSS, SIMULA, SIMSCRIPT, GASP, OPS, e CSL) (BANKS *et al.*, 2005).

4) O Período de Expansão (1971-1978): nesse período, desenvolveu-se a simulação tal como conhece-se hoje, devido a maior evolução e redução dos custos dos computadores. Nessa época, a simulação passou a ser descoberta pelas indústrias, principalmente pelas de

grande porte (KELTON, SADOWSKI e STURROCK, 2007). Este período viu grandes ampliações das capacidades e possibilidades de linguagens de programação, como o GPSS, SIMSCRIPT e GASP (JENKINS e RICE, 2009). Nesta época, segundo Kelton, Sadowski e Sturrock (1998), a simulação se tornou uma possibilidade, principalmente para a indústria automotiva e para detecção de causas de desastres.

5) O Período de consolidação e renovação (1979-1986): neste momento, surgiram as linguagens de simulação mais evoluídas, como a SLAM II e a SIMAN (BANKS *et al.*, 2005). Nesta época, segundo Kelton, Sadowski e Sturrock (1998), a simulação começa a entrar no campo da administração.

Banks *et al.* (2009) complementam os períodos da história da simulação proposto por Nance (1995):

6) Período de Integração de Ambientes (1987 - 2008): nesta ocasião, surgiram os *softwares* de simulação com interfaces gráficas com o usuário, animação e outras ferramentas de visualização. E esta disseminação foi promovida pelo advento dos computadores pessoais. Nesse momento, segundo Kelton, Sadowski e Sturrock (1998), várias empresas de pequeno porte passaram a utilizar essa ferramenta no início de seus projetos. A simulação adquiriu maturidade nesse momento (KELTON, SADOWSKI e STURROCK, 2007).

7) Futuro (2009 - 2011): nesse período, a simulação toma um rumo no sentido do uso de computação gráfica, realidade e ambientes virtuais (BANKS, 2009). Nance e Sargent (2002), ainda afirmam que modelagens em tempo real e via *web* podem ampliar o uso e o conhecimento sobre a simulação.

2.1.2 O que é simulação?

Para Banks (1998), Banks *et al.* (2008), simulação é a imitação de um processo real ou de um sistema ao longo do tempo.

Os mesmos autores ainda destacam que simular abrange a criação de uma história artificial do sistema e a sua observação pode ser utilizada para realizar inferências sobre as características da operação do sistema real, o qual representa. Para eles, a simulação tem a atribuição de descrever e analisar o comportamento de um sistema, e responder a questões como: “o que ocorre se?”, relacionadas ao sistema real e auxiliar no projeto de sistemas reais. Eles ainda acrescentam que o sistema existente e o conceitual podem ser modelados através de simulação.

Jahangirian *et al.* (2010) afirmam que a simulação é uma das técnicas mais utilizadas nas mais diversas áreas, principalmente devido à facilidade de analisar sistemas complexos como um todo, e não somente as partes.

Da mesma forma, para Oliveira (2008), a simulação é a utilização, de um modelo que representa o processo real ou sistema, geralmente em um computador, com o objetivo de análise o comportamento deste sistema. É utilizada para testar alternativas de mudanças sem, contudo, alterar o sistema real, como também para identificação de gargalos nos processos produtivos. Pode também ser utilizada para simular novos sistemas, antes de suas implementações.

Para Carson II (2002) e Law (2009), o modelo de simulação deve ser bem próximo do sistema real o qual representa, ou seja, validado, para que as decisões a partir deste auxiliem corretamente nas tomadas de decisões.

Segundo Silva (2005), simular requer mais que simplesmente usar um *software*. A simulação é um projeto, e como tal deve ser planejada com conhecimento das etapas e suas necessidades. O sistema deve ser bem conhecido, existindo comunicação entre os clientes e pessoas envolvidas durante todo o processo.

Conforme Pereira (2000), ao modelar um sistema, é importante iniciar com modelos simples até atingir modelos mais complexos. Desta forma, há um ganho no tempo de modelagem, bem como é possível à verificação de erros de programação e realizar sua correção. Com isso, o modelo inicial vai sendo refinado, até que atenda aos objetivos propostos.

Com o intuito de uma maior eficiência no uso da simulação, reduzindo-se o tempo de execução sem levar a uma perda da confiabilidade na resposta, realiza-se o controle de fatores como: o nível de detalhamento dos modelos, o número de dados estatísticos, o uso de animação, e o uso dos elementos do sistema mais relevantes para o modelo. Estas ações devem ser realizadas na etapa de planejamento, sendo esta fase de suma importância. Nela, devem-se utilizar metodologias que orientem sua correta execução (HARREL e PRICE, 2003).

Durante a definição do detalhamento do modelo, não se deve deixar de lado o objetivo da modelagem. É necessário definir se todo ou parte do sistema será modelado; se é conveniente introduzir variáveis relacionadas ao custo do produto ou ao estoque em processo; se é possível à redução da quantidade de dados a serem coletados; se os tempos de parada dos operadores ou equipamentos são significativos para aprimorar a precisão da análise. A etapa

de coleta e a de modelagem são atividades que demandam tempo; desta forma é imprescindível que o modelo seja o mais simples possível (PEREIRA, 2000).

Harrel *et al.* (1995) listam alguns motivos, para se adotar a simulação como ferramenta na resolução de problemas, pois esta pode:

- promover a solução criativa de problemas;
- identificar causas de problemas;
- prever resultados;
- considerar a variação de sistemas;
- promover soluções totais;
- ser eficiente do ponto de vista econômico;
- ser utilizada para verificar soluções analíticas geradas por outros métodos;
- ser mais simples que outras ferramentas.

Banks *et al.* (2005) apresentam algumas outras vantagens da simulação:

- prever o comportamento de novos sistemas antes que estes sejam construídos;
- prever o impacto de mudanças, no desempenho do sistema existente, sem implantá-las na prática;
- analisar gargalos no sistema.

Entretanto, algumas desvantagens da simulação são citadas por Pegden, Shannon e Sadowski (1995), Torres (2001), BANKS *et al.* (2005) e incluem:

- A construção do modelo demanda treinamento especial que leva tempo e necessita de experiência. Esta experiência pode ter impacto considerável no tempo para na geração do modelo conceitual.
- Os resultados da simulação podem ser de difícil interpretação devido a sua aleatoriedade.
- A modelagem e análise de simulações podem demandar mais tempo e custar mais que outra solução.
- A simulação pode ser utilizada de forma inapropriada quando soluções de outra natureza resolveriam o mesmo problema em menor tempo ou custo.

2.1.3 Pesquisas em simulação a eventos discretos

Existem diversas áreas de aplicação da SED, aqui focando especificamente em manufaturas serão apresentadas algumas publicações relacionadas.

Jenkins e Rice (2009) comparam modelos de recursos existentes em SED e também informam o desenvolvimento de novas abordagens.

Em Miranda *et al.* (2010), os autores realizam a avaliação da operação de *setup* através da SED. Outros autores com trabalhos relacionados a este tema são: Al-Mubarak, Canelb, Khumawala (2003), Yilmaz *et al.* (2009) e Vinod e Sridharan (2008).

Paiva (2010) identificou como inserir fatores humanos em um modelo de SED. Em um segundo momento, analisou se a incorporação de fatores humanos em um modelo de simulação altera a qualidade dos resultados previstos pelo modelo sem a incorporação desses fatores.

Can e Heavey (2012) comparam a programação genética, redes neurais artificiais para metamodelagem de modelos de SED. Estes autores estudaram três sistemas: um abastecimento de material automatizado em uma fabricante de semicondutores, um modelo de estoque e uma linha de produção seriada.

Vale ressaltar aqui alguns trabalhos de autores relacionados ao tema, dentre esses alguns já foram citados ou terão seus trabalhos detalhados mais adiante: Marvel, Schaub e Weckman (2008), Ilgin e Gupta (2010), Garza-Reyes *et al.* (2010), Miranda e Castillo (2011), Maciel *et al.* (2012), Montevechi, Miranda e Friend (2012) e Amiri e Mohtashami (2012).

Tirando um pouco o foco da manufatura, são dados exemplos de dois trabalhos na área de saúde. O trabalho do Baesler *et al.* (2012), os autores utilizam a SED para estudar um banco regional de sangue no Chile. Já Okhmatovskaia *et al.* (2012) estão desenvolvendo a *Ontology for Simulation Modeling of Population Health* (SimPHO) - uma abordagem formal explícita, legível com o uso de computador para descrever modelos de simulação de saúde da população. SimPHO se baseia no trabalho anterior, dos mesmo autores, para classificar e representar formalmente o conhecimento sobre modelos de simulação, e incorpora a semântica da epidemiologia e domínios de saúde pública.

2.2 Modelagem Conceitual

Segundo Leal (2008), a modelagem conceitual é uma fase da simulação a eventos discretos, como mostram os trabalhos dos autores Chwif e Medina (2006); Law e Kelton (2000). Também é possível notar essa fase no método de Montevechi *et al.* (2010). Para Sargent (2008), o modelo conceitual é uma representação matemática, lógica ou verbal do problema. Para Law e Kelton (2000), a etapa de construção do modelo conceitual é o aspecto

mais importante de um estudo de simulação. Para Chwif e Medina (2010), a modelagem conceitual é uma fase que muitas vezes é ignorada por livros e analistas.

Segundo Robinson (2006) a confecção de um modelo conceitual influi em todos os aspectos de um estudo de simulação, especialmente na coleta de dados, velocidade de desenvolvimento do modelo, validação do mesmo, velocidade da experimentação e confiança nos resultados. Para Oliveira (2010), é de extrema importância escolher uma técnica de modelagem conceitual que proveja o suporte necessário a um projeto de simulação.

No item a seguir, serão enumeradas algumas técnicas de mapeamento de processos que podem ser utilizadas na modelagem conceitual.

2.2.1 Técnicas de representação de modelos conceituais

Para Oliveira (2010), a dificuldade da escolha de técnicas para se mapear processos, também ocorre na escolha de técnicas para se construir modelos conceituais, parte componente da etapa de concepção de um projeto de simulação.

Oliveira (2010) e Ryan e Heavey (2006) apresentam em seus trabalhos vantagens e desvantagens da utilização de algumas técnicas existentes na literatura na construção de modelos conceituais em projetos de simulação computacional, conforme apresentado no Quadro 2.1.

Para Hernandez-Matias *et al.* (2008) não há método único de modelagem que possa modelar totalmente um processo complexo de manufatura.

Os autores Ryan e Heavey (2006) afirmam que não existe nenhuma técnica de modelagem que ofereça suporte suficiente a projetos de simulação. Como resultado das limitações destas técnicas, diferentes métodos integrados de modelagem têm sido desenvolvidos (HERNANDEZ-MATIAS *et al.*, 2008). Segundo Oliveira (2010) como as técnicas presentes na literatura não proporcionam suporte suficiente a projetos de simulação, principalmente devido ao fato de não terem sido desenvolvidas para este propósito, alguns autores tem criado técnicas de modelagem com foco específico em projetos de simulação.

Para Leal (2008), um grande número de pesquisadores tem apontado que os métodos da abordagem IDEF podem ser utilizados no apoio à simulação. Um exemplo é o trabalho Montevechi *et al.* (2008b) no qual os autores combinaram as técnicas IDEF0, fluxograma e SIPOC para criar um modelo conceitual mais próximo às necessidades de um modelo computacional.

Quadro 2.1 - Vantagens e desvantagens de determinadas técnicas de construção de modelos conceituais

Técnicas	Vantagens	Desvantagens
Redes Petri	Em forma de grafos, com suas posições, transições e arcos, esta técnica permite a reprodução gráfica e matemática da lógica presente em eventos discretos.	Não descrevem visualmente ramos lógicos complexos ou modelos de decomposição hierárquica complexa, se tornando confuso com aumento da complexidade do sistema.
IDEF0	Possibilita a criação de modelos de fácil interpretação e com capacidade de desdobramento. Demonstra os elementos funcionais de um sistema, como a interação entre as atividades de um processo produtivo e os seus elementos.	Não relata ramificações do sistema, elaboração textual de modelos gráficos, fluxo de estado ou ainda a modelagem de uma perspectiva do usuário.
IDEF3	Possui elementos lógicos que buscam criar uma dinâmica na figuração dos eventos e atividades do sistema. Fornece formulários para a padronização do detalhamento e registro das informações sobre o modelo conceitual.	Representa textualmente modelos gráficos com uma linguagem abstrata. Não relata fluxo de informação ou a modelagem da perspectiva do usuário.
UML	Possibilita que as atividades sejam ordenadas em fluxo para representar as várias etapas de um sistema discreto. Apresenta facilidade na interpretação visual, melhorando a comunicação entre os modeladores e usuários.	Não representa fluxo de informação, recursos, atividades ou uma forma de elaborar o modelo gráfico textualmente.
<i>Role Activity Diagrams</i>	Possibilita que o usuário participe ativamente na construção do modelo, demonstrando as suas perspectivas e necessidades. A lógica do modelo pode ser facilmente ilustrada.	As representações das variáveis do sistema, a disponibilidade de informações e as interações com as funções e recursos são ineficazes.

Fonte: adaptado de Oliveira (2010) e Ryan e Heavey (2006)

Tendo sido apresentadas as vantagens e desvantagens de algumas técnicas para modelagem conceitual, da mesma forma que o apresentado nos trabalhos de Oliveira (2010) e Leal (2008), vale destacar três técnicas de modelagem conceitual: Fluxograma, ACD e IDEF-SIM, sendo esta última a técnica de modelagem conceitual a ser utilizada neste trabalho.

2.2.1.1 Fluxograma

O Fluxograma, conforme definição da autora Aguilar-Savén (2004) é uma representação gráfica formal de uma sequência lógica programada, trabalho, processo de manufatura, ou estrutura em geral, que não possui uma data de origem. Para Slack *et al.* (2002), o Fluxograma é uma técnica de mapeamento que permite o registro de ações de algum tipo e pontos de tomada de decisão que ocorrem no fluxo real. Para Campos (1992), o Fluxograma é fundamental para a padronização e entendimento do processo. Para Pinho *et al.* (2007), esta técnica facilita a visualização ou identificação dos produtos produzidos, dos

clientes e fornecedores internos e externos do processo, das funções, das responsabilidades e dos pontos críticos.

Para Aguilar-Savén (2004), o Fluxograma apresenta como ponto forte ao usuário a facilidade de comunicação, já para o modelador os pontos fortes são a flexibilidade da técnica e sua simplicidade. Para Leal (2008) a facilidade do seu uso é um dos principais destaques (LEAL, 2008). Entretanto, para Aguilar-Savén (2004) o ponto fraco da técnica para o usuário é que a mesma pode levar a uma grande extensão na representação de processos. Para a mesma autora, ponto negativo principal para o modelador é o fato que há uma diversidade de diferentes notações associadas à técnica. A Figura 2.1 ilustra uma aplicação de um fluxograma adaptada de Leal (2008) e Aguilar-Savén (2004).

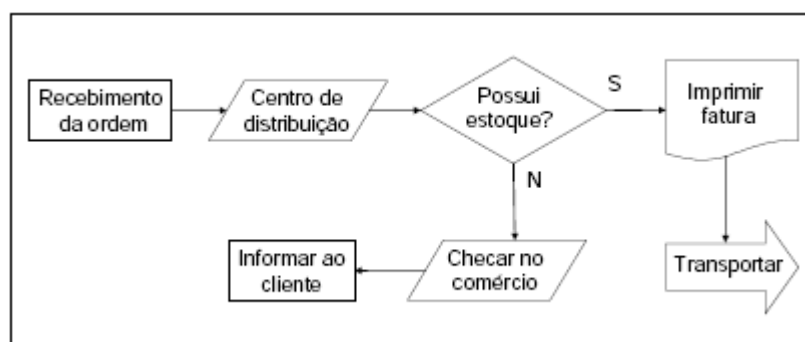


Figura 2.1 – Aplicação de Fluxograma

Fonte: Adaptado de Leal (2008) e Aguilar-Savén (2004)

2.2.1.2 ACD (*Activity Cycle Diagram*)

Conforme Chwif e Medina (2006) esta é uma técnica que modela as interações dos objetos que pertencem a um determinado sistema. Para Leal (2008), essa é uma forma de representação as interações das entidades de um sistema. Segundo Chwif, Paul e Barreto (1999), no formato ACD, as entidades alternam seu estado em um ciclo, entre atividades e esperas. Para Oliveira (2010) essa técnica também é conhecida pelo nome de Diagrama do Ciclo de Vida. Os elementos básicos de um ACD são apresentados na Figura 2.2.

Para Leal (2008), o trabalho de Chwif, Paul e Barretto (2006) fazem uso desta forma de modelagem através de diagrama de ciclo de atividades como foco na simulação. Ainda para o mesmo autor, que neste caso, nota-se que a modelagem do processo tende à elaboração do modelo conceitual, uma das etapas da simulação.

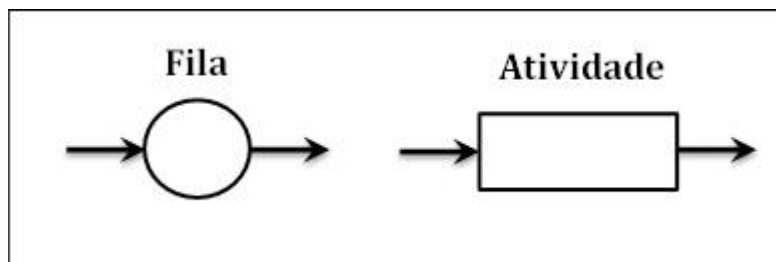


Figura 2.2 – Elementos básicos de um ACD

Fonte: Adaptado de Chwif e Medina (2006)

Para Chwif e Medina (2010) a ACD é útil, principalmente, para sistemas com fortes características de geração de filas. Estes mesmos autores ainda ressaltam a vantagem da simplicidade na criação do modelo conceitual com o uso de apenas dois símbolos, a habilidade de mostrar as interações entre os objetos do sistema, os fluxos, a facilidade no entendimento e uso. Outra vantagem é apresentada por Oliveira (2010) e Ryan e Heavey (2006), que afirmam que a ACD pode ser utilizada para representar a lógica dos eventos discretos e a dinâmica das entidades em função do tempo de execução.

Como uma das desvantagens da técnica ACD, Chwif e Medina (2010) creem que enquanto aumenta a complexidade do sistema, cresce a dificuldade de entender os modelos. Estes autores também destacam a dificuldade de contemplar totalmente a lógica através da forma de modelagem ACD. Ryan e Heavey (2006), afirmam que o método possui limitações de semântica e sintaxe na descrição de informações de relevância para o modelo.

2.2.1.3 IDEF-SIM (*Integrated Definition Methods - Simulation*)

Conforme afirma Oliveira (2010), os autores Leal, Almeida e Montevechi (2008) propuseram uma nova técnica para a modelagem conceitual, que foi denominada de IDEF-SIM computacional (*Integrated Definition Methods - Simulation*), que faz uso e realiza a adaptação de elementos lógicos das técnicas de modelagem já consagradas no *Business Process Modelling* (IDEF0, IDEF3 e Fluxograma), possibilitando desta forma a construção de modelos conceituais com informações úteis a modelagem computacional. Os símbolos utilizados na técnica são apresentados no ANEXO A.

Para Leal, Almeida e Montevechi (2008), Montevechi *et al.* (2010) e Oliveira (2010), a principal propriedade do IDEF-SIM é a analogia da sua lógica de aplicação com a lógica utilizada em simulação a eventos discretos. Segundo estes mesmos autores, esta técnica tem o

intuito de construir um modelo conceitual do processo a ser simulado que possua elementos necessários na fase de modelagem computacional. Para Leal *et al.* (2009), uma outra importante vantagem do uso da técnica IDEF-SIM é a possibilidade de aprimorar o processo de validação face-a-face com os especialistas do processo. Conforme estes mesmos autores, isto ocorre devido à lógica do IDEF-SIM ser análoga a empregada no processo de modelagem computacional.

Para Nunes e Rangel (2009a), a técnica IDEF-SIM para modelagem conceitual, ao utilizar a semântica e sintaxe do IDEFØ e IDEF3, adaptadas às particularidades da simulação, demonstra-se eficiente na representação de sistemas simulados. Oliveira (2010) afirma que apesar das técnicas IDEF serem capazes de modelar sistemas, quando seu uso está associado a projetos de simulação, estas deixam de registrar características importantes, por não terem sido criadas para projetos de simulação.

Nunes e Rangel (2009a) enfatizam ainda, que o IDEF-SIM criado por Leal, Almeida e Montevechi (2008), ao oferecer elementos lógicos de uso específico em projetos de simulação, favorecem a representação do sistema de forma satisfatória e com leitura simplificada, bem como potencializam o processo de documentação.

Após a apresentação o IDEF-SIM como favorável a modelagem em projetos de simulação por diversos autores, este método será empregado neste trabalho na etapa de modelagem conceitual. Também foi levada em consideração, para escolha do método para modelagem conceitual, sua ampla utilização encontrada na literatura e que é apresentada no item a seguir.

2.2.2 Pesquisas em modelagem conceitual

Oliveira (2010) enumera diversos exemplos encontrados na literatura de aplicações e análises do uso da técnica IDEF-SIM na modelagem conceitual como: Leal, Almeida, Montevechi (2008); Leal *et al.* (2009); Nunes (2010); Costa *et al.* (2010); Oliveira *et al.* (2010) e Montevechi *et al.*, (2010). Vale acrescentar também os trabalhos de: Pinho e Morais (2010), Oliveira *et al.* (2009), Nunes e Rangel (2009a), Nunes e Rangel (2009b), Santos e Rangel (2010), Lima, Lobato e Leal (2011) e Maciel *et al.* (2012).

A técnica ACD é utilizada e analisada em trabalhos como Chwif, Paul e Barreto (1999); Chwif, Paul e Barreto (2006); Chwif e Medina (2010).

Na análise do fluxograma destaca-se Aguilar-Savén (2004) que mostra em seu trabalho uma comparação entre técnicas de modelagem. E na aplicação do fluxograma relacionado à simulação computacional, destaque para o trabalho de Leal (2003).

2.3 Verificação e Validação

Para Chwif e Medina (2010) embora as palavras verificação e validação sejam semelhantes, seus significados não são.

Segundo Costa (2010) há a concordância entre os trabalhos de diversos autores que a validação e a verificação de modelos são etapas críticas no desenvolvimento de um modelo de simulação, e, portanto têm sido alvo de inúmeras pesquisas tais como Chwif e Medina (2007); Harrel, Ghosh e Bowden (2004); Kleijnen (1995) e Sargent (2009). Vale ressaltar, também, os trabalhos sobre validação e verificação de Leal *et al.* (2011) e Sargent (2011).

A verificação de um modelo é definida como a garantia de que o programa computacional e sua implementação estejam corretos (SARGENT, 2011). Para Montevechi *et al.* (2008b), a verificação busca eliminar os erros do modelo computacional.

Já a validação computacional, para Sargent (2011), é definida como a maneira de se determinar se o comportamento do modelo simulado é suficientemente preciso para representar o modelo real, para a aplicação a qual se destina. Assim, segundo o mesmo autor, se o modelo não é uma boa aproximação do sistema real, as conclusões tiradas a partir desse estarão sujeitas a erros e poderão resultar em decisões equivocadas. Banks *et al.* (2005), afirmam que esta etapa de validação deve ser executada até que o modelo tenha a precisão desejada pelos analistas de simulação.

Assim, para Chwif e Medina (2010), a validação do modelo conceitual ou computacional tem relação com o que será modelado, e a verificação com a forma que o modelo está sendo implementado.

Existem diversas técnicas para verificação e validação de modelos. Nos próximos itens serão apresentadas algumas encontradas na literatura, bem como serão destacadas as utilizadas neste trabalho.

2.3.1 Técnicas de Verificação e Validação

Sargent (2011) descreve técnicas de validação e testes comumente utilizados em verificação e validação de modelos. Para Banks *et al.* (2005) e Sargent (2011), estas técnicas podem ser utilizadas de forma subjetiva ou objetiva. Banks *et al.* (2005) enfatiza que as técnicas empregadas de forma objetiva são testes que necessitam de dados do sistema real e dos gerados pelo modelo, de forma que se possa comparar algumas características do sistema com as do modelo, através de um ou mais testes estatísticos. Sargent (2011) ainda apresenta, como exemplo destes testes estatísticos, os testes de hipóteses e intervalos de confiança.

Segundo Leal *et al.* (2011), as técnicas estatísticas devem ser empregadas de forma a mostrar se um modelo computacional, de um sistema, tem precisão satisfatória e está relacionado com os objetivos do estudo. Já os testes subjetivos frequentemente envolvem pessoas que conhecem alguma ou várias características pertinentes ao sistema estudado, realizando a análise do modelo e suas saídas (BANKS *et al.*, 2005).

Segundo Sargent (2011) a combinação de técnicas normalmente é utilizada. Este autor afirma ainda que as técnicas de verificação e validação podem ser utilizadas para submodelos e modelos completos.

Sargent (2011) apresenta diversas técnicas de validação e verificação de modelos. Aqui serão apresentadas algumas destas técnicas que foram destacadas em Leal *et al.* (2011). Segundo Banks *et al.* (2005), algumas destas técnicas são mais subjetivas e outras mais objetivas.

- Animação: graficamente é apresentada a evolução do modelo ao longo do tempo e desempenho operacional do mesmo.
- Validação por eventos: comparação dos eventos do modelo de simulação com os do sistema real, de modo a determinar a semelhança entre os dois.
- Validação face-a-face: os especialistas do sistema verificam se o modelo representa de maneira razoável o problema estudado. Para o caso do modelo conceitual, por exemplo, pode se verificar se não existem erros de lógica e se a relação entre as entradas e saídas são plausíveis.
- Validação interna: são realizadas diferentes réplicas em um modelo estocástico com o intuito de determinar a variabilidade da resposta do modelo. Se houver uma grande variabilidade, os resultados podem ser questionáveis.
- Gráficos operacionais: os valores de diversas medidas de desempenho, como exemplo, o tamanho da fila e o percentual de funcionários ocupados, são apresentados na forma de gráficos da evolução do modelo ao longo do tempo.
- A análise de sensibilidade: alteração dos valores das entradas e parâmetros internos de um modelo para com o objetivo de determinar os efeitos sobre o comportamento e de saída do modelo. Devem incidir as mesmas relações entre o modelo e o sistema real.
- Validação preditiva: uso do modelo na previsão do comportamento do sistema, e após isso, essas previsões são comparadas com o comportamento do sistema real.
- *Turing test*: apresentação dos dados gerados pelo sistema real e o modelo simulado,

de maneira aleatória, para as pessoas que conhecem como funciona o sistema modelado. Então, estes indivíduos são questionados se conseguem distinguir as saídas do modelo simulado e do sistema real.

- Validação por dados históricos: quando há dados históricos, uma parte destes dados é empregada para construir o modelo e os demais são utilizados para determinar se o modelo se comporta como o sistema real.

Leal *et al.* (2011) ainda mencionam a técnica de validação para modelos computacionais adotada por Potter, Yang e Lalwani (2007), que compara os resultados de simulação com os do sistema real utilizando média e desvio padrão dos resultados.

Após a apresentação destas técnicas, vale ressaltar que para a validação do modelo conceitual deste trabalho foi utilizada a técnica face-a-face, devido sua ampla aplicação encontrada na literatura. Trabalhos relacionados a esta técnica de validação são apresentados no item 2.3.2.

Para verificação do modelo computacional deste trabalho foram utilizadas depurações, correções nos erros de lógica, visualização das animações e análise dos gráficos operacionais de saída. Estas técnicas foram empregadas aqui, também devido à sua utilização em diversos trabalhos na literatura. Trabalhos relacionados a estas técnicas de verificação também são apresentados no item 2.3.2.

Já em relação à validação do modelo computacional deste trabalho, da mesma forma que a adotada em Leal *et al.* (2011), o foco é a validação estatística (técnica objetiva). Mais especificamente, este trabalho adota o método de Kleijnen (1995) apresentado em Chwif e Medina (2006) e utilizado em Leal (2008) e Maciel *et al.* (2012). Segundo Leal (2008), esse teste consiste em adotar o intervalo de confiança da diferença entre o conjunto de dados resultantes da simulação do modelo e os dados reais do sistema. Ainda para esse autor, caso o intervalo contenha o zero pode-se afirmar que as respostas são equivalentes (do sistema real e do modelo de simulação), com um nível de confiança $(1-\alpha)$. Os intervalos propostos por Kleijnen (1995) são obtidos através da Equação (2.1):

$$\bar{x}_s - \bar{x}_r \pm t_{2n-2, \alpha/2} \sqrt{\frac{s_s^2 + s_r^2}{n}} \quad (2.1)$$

Na qual:

\bar{x}_s = média do resultado da simulação;

\bar{x}_r = média do resultado real;

s_s = desvio padrão do resultado simulado;

s_r = desvio padrão do resultado real;

n = número de observações (deve ser o mesmo para simulado e real);

$t_{2n-2, \alpha/2}$ = é a distribuição t de Student para $2n-2$ graus de liberdade e um nível de significância de $\alpha/2$.

A seguir são apresentadas pesquisas relacionadas à verificação e validação de modelos.

2.3.2 Pesquisas relacionadas à verificação e validação

Diversos são os trabalhos que utilizam uma ou mais técnicas para verificação e validação de modelos de simulação a eventos discretos.

Com relação à validação de modelos conceituais através de técnicas subjetivas, podem-se destacar trabalhos com a validação face-a-face, tais como Leal *et al.* (2009), Oliveira *et al.* (2009), Costa (2010), Miranda (2010), Pinho e Morais (2010), Paiva (2010), Maciel *et al.* (2012), Rodrigues *et al.* (2012).

Segundo Leal *et al.* (2011), autores como as Bekker e Viviers (2008); Longo (2010); Nazzal, Mollaghasemi e Anderson (2006); Kouskouras e Georgiou (2007), utilizaram técnicas subjetivas para validação de seus modelos computacionais, tais como a face-a-face, *Turing test* e animação. Já Leal (2008) utiliza a técnica face-a-face como uma das formas para validação do modelo computacional.

Leal *et al.* (2011) destacam em seu trabalho os autores, tais como Abdulmalek e Rajgopal (2007), Lam e Lau (2004), Jordan, Melouk e Faas (2009), Mahfouz, Hassan e Arisha (2010), que realizam a validação do modelo computacional por meio de teste estatístico, como a construção de intervalos de confiança. Vale ressaltar aqui também alguns trabalhos que utilizaram validação estatística para o modelo computacional, tais como Leal (2008), Oliveira *et al.* (2009), Costa (2010), Pinho e Morais (2010), Miranda (2010), Maciel *et al.* (2012). Já Rodrigues *et al.* (2012) utilizaram a comparação entre dados históricos para validar seu modelo computacional.

Já na verificação do modelo, Santos e Rangel (2010) utilizaram um teste da simulação computacional citado em Sargent (2010): “Testes de Degenerescência ou Robustez”, ou seja, no qual são aplicados sobre os parâmetros valores extremos. Conforme mencionado anteriormente, alguns autores utilizam depurações, correções nos erros de lógica, visualização das animações, inclusão de contadores e funções, análise dos gráficos de saída e dos resultados gerados na simulação para realizar a verificação dos modelos computacionais, tais

como Oliveira *et al.* (2009), Miranda (2010), Costa (2010), Paiva (2010), Maciel *et al.* (2012) e Rodrigues *et al.* (2012).

2.4 Indicadores de Desempenho

Neste tópico serão salientados os conceitos de indicadores de desempenho, focando principalmente no indicador Disponibilidade Operacional (DO), um dos componentes da OEE.

Segundo Moreira (2002) e Murugesan, Kumar e Kumar (2012), as organizações necessitam permanentemente verificar se o seu desempenho está compatível com as premissas estratégicas estabelecidas. Ainda para Moreira (2002), desvios do foco estratégico definido podem ter como consequência negativa a perda da competitividade. O que ocasiona a imposição de que o gerenciamento dos processos de uma empresa seja supervisionado por indicadores que reflitam o seu desempenho e estejam associados com o alcance dos objetivos estratégicos.

Lavy, Garcia e Dixit (2010) corroboram com as afirmações dos demais autores, ressaltando que a medição de desempenho amplia as possibilidades de rever o funcionamento passado e presente, e ainda resultam em estratégias futuras para o bom funcionamento da organização bem como para o cumprimento de seus objetivos.

Desta forma, a medição de desempenho busca quantificar ações e verificar as metas ou os padrões definidos com o ambiente real (TANGEN, 2003; RON e ROODA, 2005; MURUGESAN, KUMAR e KUMAR, 2012; SLACK, CHAMBERS e JOHNSTON, 2010).

As informações obtidas a partir da avaliação do desempenho dos processos e sistemas de manufatura levam diretores e gerentes a tomar melhores decisões sobre como gerenciar seus sistemas de produção de forma mais eficaz e eficiente (FRANCESCHINI *et al.*, 2008; GARZA-REYES *et al.*, 2010). Para alcançar este objetivo, é necessário estabelecer indicadores adequados para os fins de medição (NACHIAPPAN e ANANTHARAM, 2006).

No tocante a equipamentos, Branco Filho (2006) destaca que os índices e indicadores medem e quantificam as variáveis, os itens de controle e verificação, de modo a permitir conhecer rapidamente a situação real do seu equipamento, por exemplo, e compará-lo com outras situações em outras datas.

Para Kiyon (2001) os indicadores empregados pelas empresas tem o intuito de retratar o grau de utilização dos recursos organizacionais. Para este autor, os indicadores mais comuns

são os índices de produtividade que passaram a ser utilizados de forma mais expressiva no processo de gestão de organizações industriais, após o advento da produção em massa.

2.4.1 Disponibilidade Operacional

Segundo Nakajima (1989), a DO (Disponibilidade Operacional) é um dos fatores que compõem a OEE (*Overall Equipment Effectiveness*), que é uma ferramenta de medição das melhorias implementadas pelo TPM (*Total Productive Maintenance*).

De acordo com Nakajima (1989), o TPM é um método que tem como objetivo melhorar a eficácia e o tempo de vida das máquinas. Segundo este autor, este método atribui aos operadores as atividades básicas de manutenção nos seus equipamentos. Assim, as áreas de manutenção começam a receber informações por parte dos operadores que se referem a anormalidades e sintomas estranhos apresentados por seus equipamentos, permitindo que intervenções sejam executadas preventivamente, evitando assim, a quebra ou a falha do equipamento. Para Santos (2009) o TPM é utilizado em várias empresas em todo o mundo para melhorar a capacidade de seus equipamentos, atingir metas para a redução de desperdícios, incluindo a restauração e manutenção dos padrões de operação.

Para este autor, as empresas que utilizam o indicador OEE podem analisar as condições reais da utilização de seus equipamentos. Estas análises são realizadas com a identificação das perdas existentes no ambiente fabril, abrangendo índices DO, desempenho e qualidade. Ron e Rooda (2005) recomendam o uso da OEE para ambientes de alto volume de produção, onde a utilização da capacidade produtiva é prioritária e, paradas ou interrupções apresentam custo elevado devido às perdas de capacidade. Ron e Rooda (2005) destacam ainda que a eficiência do equipamento depende de fatores que não são todos relacionados com o equipamento em si, incluindo operadores, facilitadores, a interferência dos demais equipamentos, a disponibilidade de materiais e recursos, as requisições de programação de produção, etc.

Entretanto, o foco desta dissertação será apenas na DO, pois é o indicador mais crítico dentre todos os fatores que compõem a OEE da área de corte em questão.

Para Nagao (1998) e Branco Filho (2006), a DO é a probabilidade de um objeto estar disponível para utilização em um dado período de tempo, sendo que estar disponível não significa que tenha que estar em funcionamento, mas sim, que esteja em condições de operação.

A DO, denominação utilizada por Branco Filho (2006), Braglia, Frosolini e Zammori (2009) adotada neste trabalho, é conhecida por outros nomes na literatura, como: índice de disponibilidade (NAKAJIMA, 1989; THE PRODUCTIVITY DEVELOPMENT TEAM,

1999; SHARMA, SHUDHANSHU, BHARDWAJ, 2012), e eficiência da disponibilidade (HUANG *et al.*, 2003; SEMI E79, 2000; SEMI E10, 2009; WANG e PAN, 2011).

2.4.2 Como calcular a Disponibilidade Operacional

Para Nakajima (1989), a DO é denominada índice de tempo operacional (ITO), um dos fatores que compõem a OEE. Conforme Figura 2.3, a ITO é calculada como a razão entre o tempo de funcionamento (TF) pelo tempo de carga (TC). Entende-se por TC, o tempo total de máquina disponível (TTMD) descontando-se o tempo de paradas programadas (TPPR) definidas pela empresa, e por TF entende-se por TC descontados os tempos de paradas não programadas (TPNPR). Este autor define os termos TPPR e TPNPR da seguinte maneira:

- Tempo de parada programada (TPPR): são os tempos vagos de máquinas, quer decorrentes de programação ou de repouso dos operadores, e os da manutenção programada;
- Tempo de parada não programada (TPNPR): constituem perdas como quebras, falhas, mudança de linha, de moldes ou ferramentas (*setup*), e outras paradas temporárias.

Destaca-se também na Figura 2.3 que a ITO é afetada por duas das seis grandes perdas: quebras/falhas, *setup*/regulagem/mudança de linha. Estas perdas estão identificadas pelos números 1 e 2, respectivamente.

Seguindo a filosofia de cálculo de Nakajima (1989) e apresentando apenas variação nas denominações dos fatores existem trabalhos contemporâneos relacionados ao cálculo da DO, como: Braglia, Frosolini e Zammori (2009), Branco Filho (2006) e o The Productivity Development Team (1999).

Para Braglia, Frosolini e Zammori (2009) a DO, um dos fatores componentes da OEE, pode ser expressa como a divisão entre o tempo programado de produção (TPP), descontados os tempos de paradas, pelo tempo programado de produção (TPP), o que pode ser visualizado na Figura 2.4. Para estes autores este indicador sofre a ação de falhas ou quebras de equipamentos; tempo de troca de ferramentas (*setup*) e ajustes de produção, que conforme Nakajima (1989) caracterizam paradas não programadas. Desta forma o tempo de parada que compõe a equação da DO, da Figura 2.4, será denominado no decorrer do texto como TPNPR (tempo de parada não programada).

Vale ressaltar que os autores Braglia, Frosolini e Zammori (2009), denominam tempo programado de produção (TPP) como sendo a diferença entre o tempo total disponível para produzir descontando as paradas programadas definidas pela empresa e/ou pela legislação vigente, como: almoço/jantar, pausas livres, ginástica, reuniões diárias, dentre outras paradas.

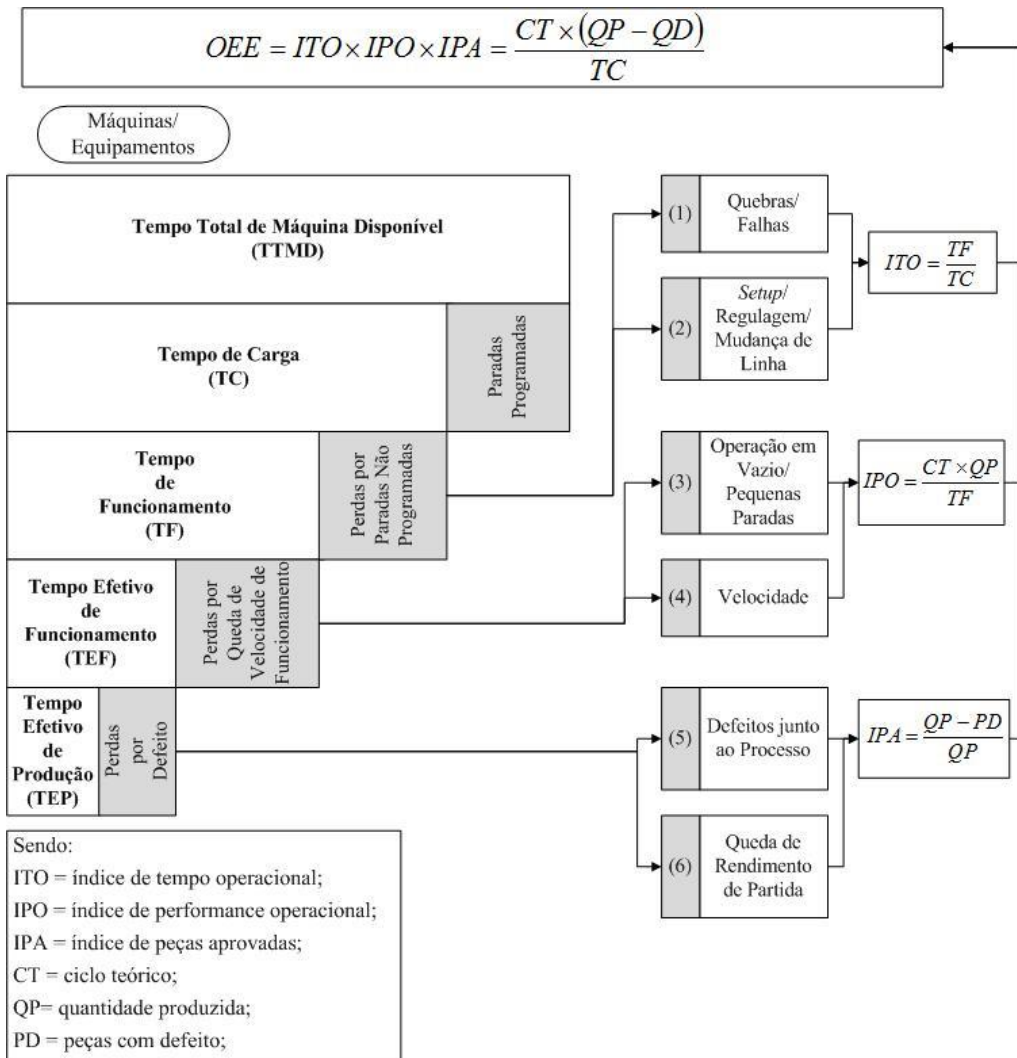


Figura 2.3 - Cálculo do OEE e as seis grandes perdas

Fonte: Adaptado de Nakajima (1989)

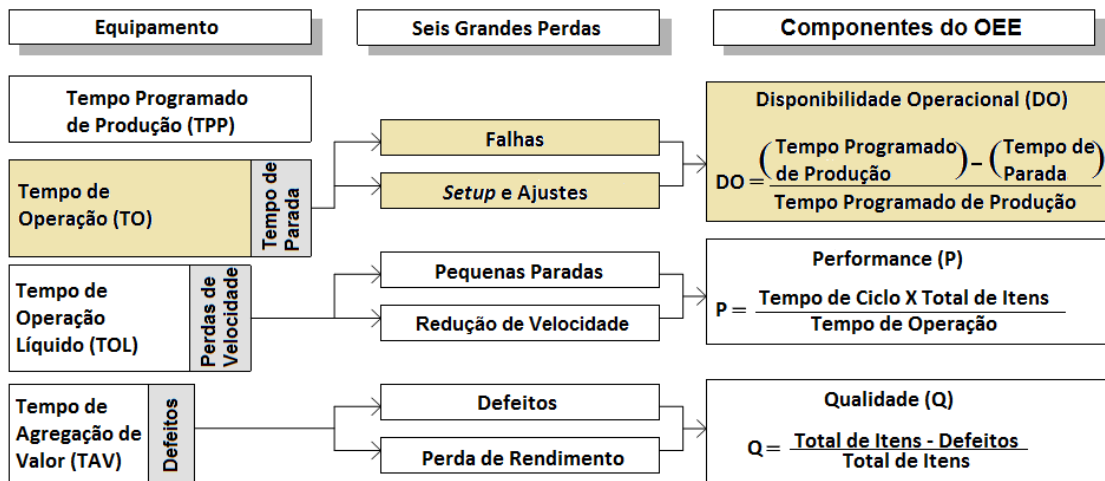


Figura 2.4 - Seis grandes perdas

Adaptado de: Braglia, Frosolini e Zammori (2009)

Como o trabalho aqui desenvolvido se passa em uma área de corte de uma empresa fabricante de autopeças e não de semicondutores, foi adotada a abordagem de Braglia, Frosolini e Zammori (2009) para o cálculo da DO, devido à sua contemporaneidade.

2.4.3 Pesquisas relacionadas a indicadores de desempenho

Huang *et al.* (2003) utilizam a SED para simular métricas como o OEE e o OTE (OEE total da fábrica) de forma automática, utilizando o software ProModel®, com o intuito de analisar e melhorar a produtividade do objeto de estudo, que apresenta um processo produtivo complexo. Os autores analisam cenários de melhoria da DO e da qualidade. Tal pesquisa foi realizada em uma fábrica da Pilkington América do Norte, em Clinton, Michigan, EUA.

Kenyon, Canel e Neureuther (2005) utilizam a SED para examinar a melhoraria do OEE baseado em tamanhos de lotes, taxas de demanda, e decisões referentes a localizações de gargalos. Para criação do modelo foi utilizado o software SLAM II. Esta pesquisa foi realizada em uma manufatura de semicondutores nos EUA.

Santos (2009), que realizou uma pesquisa-ação em uma linha produtiva de uma empresa multinacional do setor de autopeças, concluiu que o indicador OEE é uma ferramenta eficaz na identificação dos desperdícios e das restrições, além de auxiliar no processo de decisão de como explorá-las. Ainda em seu estudo, foi possível quantificar e validar estatisticamente as melhorias obtidas com a eliminação dos gargalos de produção.

Para Moellmann *et al.* (2006) o conceito de OEE, aliado à Teoria das Restrições (TOC) e técnicas de Kaizen, permitiram a análise para escolha de ações de melhoria em linhas de produção em uma fábrica de motores no interior de São Paulo.

Ilgin e Gupta (2010) avaliam o impacto de produtos com sensores embutidos (PSE), utilizados para monitorar seu funcionamento, sobre o desempenho dos indicadores de uma linha de desmontagem destes produtos. Tal linha é controlada por um sistema de múltiplos kanbans. Em primeiro lugar, foi criado um Projeto de Experimentos para os produtos convencionais sem sensores internos (PC) e os PSEs. Para calcular os valores de resposta para cada experimento, modelos detalhados de SED foram desenvolvidos para ambos os produtos. Então, foram realizados testes *2 sample-t* para comparar os dois casos, com base em medidas de desempenho diferentes. Os resultados dos testes mostram a superioridade de PSEs sobre os PCs com relação a todos os custos (ou seja, a desmontagem, disposição, testes, *backorder*, transporte, exploração), bem como a receita e o lucro.

Com relação aos componentes do OEE e simulação, foi encontrado o trabalho de Marvel, Schaub e Weckman (2008), que avalia a disponibilidade e a capacidade de alocação

de produção via SED em um fornecedor de segundo nível da cadeia automotiva. No tocante ao aumento do indicador OEE, ou um de seus componentes, tem-se como exemplo o trabalho de Wang e Pan (2011) que realizaram um estudo para aumento do OEE utilizando a coleta automática de dados.

Garza-Reyes *et al.* (2010) realizaram um estudo cujo objetivo era investigar a relação entre OEE e capacidade do processo (CP), como eles interagem e interferem entre si, e os possíveis efeitos que essa relação pode ter na tomada de decisão. Isso gerou uma perspectiva útil que guia o entendimento da interação de diferentes elementos de desempenho e auxilia os gestores a tomar melhores decisões sobre como executar e melhorar seus processos.

Subramanya e Shobha (2012) realizaram uma estimativa da capacidade produtiva em uma indústria. Tal empresa utiliza uma variedade de recursos, incluindo postos de trabalho, máquinas, ferramentas e utensílios, sendo que eles estão disponíveis em quantidades fixas. O objetivo do estudo foi estimar a capacidade das máquinas utilizadas nas atividades de chão de fábrica e acompanhar os processos de produção utilizando a modelagem de simulação. A utilização efetiva da capacidade foi calculada e comparada com a utilização da capacidade simulada. Os resultados indicaram que uma das máquinas era utilizada 85% do tempo.

Maciel *et al.* (2012), apresentam um estudo conduzido numa empresa de autopeças, analisando o impacto do tempo de *setup* de uma máquina de corte, em sua DO, através da SED. Os autores propuseram três cenários de redução do tempo de *setup* a partir do cenário atual. Com a proposição dos cenários foi possível alcançar um aumento médio da DO de 21,6% e um aumento de 13,1% no Total Produzido.

2.5 Projeto de Experimentos simulados

2.5.1 O DOE na simulação

Antes de elucidar sobre o Projeto de Experimentos (*Design of Experiments* – DOE) faz-se necessário à definição de experimento.

Experimento é um teste ou uma série deste, onde são realizadas alterações propositalmente nas variáveis de entrada de um processo, ou ainda, de um sistema, de maneira que se possa observar e identificar as conseqüentes mudanças nas respostas das variáveis de saída (MONTGOMERY, 2005).

De maneira geral, para o mesmo autor, os experimentos são utilizados quando se deseja estudar a performance de processos e sistemas, como apresentado na Figura 2.5.

Na Figura 2.5 é possível notar que Montgomery (2009) apresenta dois tipos de variáveis de um processo: as controláveis (x_1, x_2, \dots, x_p) e as não controláveis (z_1, z_2, \dots, z_q). O autor destaca que os objetivos do experimento podem ser:

- Determinar que variáveis mais influenciam a resposta (y);
- Determinar os valores de x (significativos) de modo que a resposta esteja próximo ao valor nominal desejado;
- Determinar os valores de x (significativos) de maneira que a variabilidade em y seja pequena;
- Determinar os valores de x (significativos) de maneira que os efeitos das variáveis não controláveis sejam mínimos.

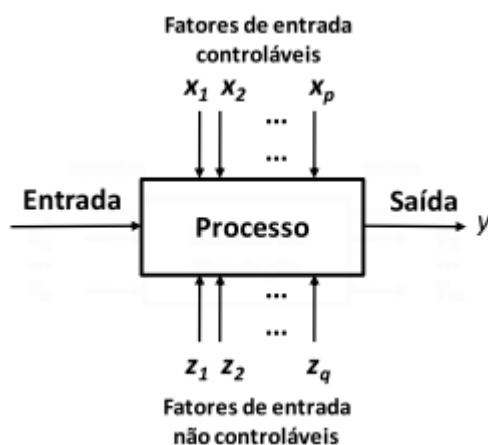


Figura 2.5 - Modelo geral de um processo

Fonte: Montgomery (2009)

De maneira a esclarecer alguns conceitos utilizados em Projeto de Experimentos, vale ressaltar os principais, de forma sucinta, que serão utilizadas no decorrer desta dissertação. Essas definições são:

- Replicação: para Montgomery (2005) é a realização de todo o experimento básico, novamente; permite estimar o erro experimental e maior precisão na determinação do efeito de um fator; interessante para modelos estocásticos;
- Fatores: é um parâmetro, uma variável de entrada ou um módulo de um modelo de simulação (KLEIJNEM, 1998). Sofrem alteração durante o experimento (LEAL, 2008). Podem ser controláveis ou incontroláveis. Os controláveis podem ser fixados pelo experimentalista. Agora um fator incontrolável, contudo mensurável, pode ser analisado por meio de um processo chamado de análise de covariância, usado

frequentemente para compensar seus efeitos Montgomery (2005). Segundo Miranda (2012) os fatores não controláveis são conhecidos também como ruídos do sistema.

- Níveis: são as possíveis variações consideradas para cada fator Chung (2004), Kleijnen *et al.* (2005) definem que a combinação dos níveis de todos os fatores cria um cenário. Quando o número de fatores é grande, comumente escolhem-se apenas dois níveis “nível +” e “nível –”, para manter um tamanho satisfatório do experimento (COX e REID, 2000).
- Resposta: também chamada de variável de resposta é uma medida de desempenho ou saída de um modelo de simulação (HARREL, GHOSH e BOWDEN, 2000; LAW e KELTON, 2000). Para Leal (2008), as variáveis de resposta descrevem o comportamento de um sistema para uma determinada configuração de fatores.
- Efeito: é a mudança obtida na resposta causada pela alteração do nível do fator. O efeito será determinado depois da conclusão dos experimentos. Em simulação, os resultados da variável de resposta devem ser tratados por métodos estatísticos, para que se possam definir os efeitos de cada fator (LEAL, 2008).
- Interação: ocorre quando a diferença na resposta entre os níveis de um fator não é a idêntica a totalidade dos níveis dos demais fatores (MONTGOMERY e RUNGER, 2003). Para Chung (2004) interação é um evento que advém da sinergia dos fatores. Este autor ainda afirma que, neste caso, o efeito da soma dos fatores pode ser maior que a soma do efeito de cada fator separadamente.

Desta maneira, após elucidar os conceitos e objetivos de um experimento, pode-se apresentar o conceito de DOE.

O DOE é uma metodologia que identifica as variáveis de maior importância em um processo e descobre se há interações entre as variáveis (Montgomery e Runger, 2011).

E todo problema experimental deve ser suportado por um projeto de experimentos e a análise estatística dos dados (GOMES, 2010; COSTA, 2010; MIRANDA, 2012).

Para Montevechi, Miranda, Friend (2012), Miranda (2012) e Gomes (2010), as técnicas do DOE têm sido aplicada nas mais variadas áreas do conhecimento, despontando-se como um conjunto de ferramentas de suma importância para o desenvolvimento de produtos e processos. E ainda, o DOE é uma importante ferramenta para melhoria de performance de processos de manufatura (MONTGOMERY, 2005).

Montgomery (2005, 2009) enfatiza a importância de que os envolvidos no experimento tenham uma ideia clara do objetivo deste, de quais fatores serão analisados, de como conduzir o experimento e de como os dados serão coletados e analisados.

Montgomery (2005) propõe as diretrizes do DOE, com as seguintes etapas:

1. Reconhecimento e definição do problema: desenvolver totalmente as ideias a respeito do problema e os objetivos a serem obtidos com o experimento; isso leva para uma melhor compreensão do processo e para uma eventual solução do problema;

2. Escolha dos fatores, dos níveis e intervalos de trabalho: devem-se escolher os fatores que irão ser alterados, os intervalos nos quais esses fatores alterarão e os níveis específicos nos quais cada rodada será efetivada;

3. Escolha das variáveis de resposta: o pesquisador deve definir as variáveis de resposta que verdadeiramente forneçam informações úteis sobre o processo em estudo;

4. Seleção do projeto experimental: esse planejamento abrange considerações sobre o tamanho da amostra (número de replicações), escolha da ordem adequada das rodadas para as tentativas experimentais, ou se a geração de blocos ou outras restrições de aleatorização estão envolvidas;

5. Execução dos experimentos: durante a realização dos experimentos, é importante que o processo seja monitorado de forma a garantir que tudo está de acordo com o planejamento; erros nesta fase podem invalidar o experimento;

6. Análise estatística dos dados: métodos estatísticos devem ser empregados para analisar os dados de maneira que os resultados e conclusões possam ser objetivos e não originados de opiniões; a análise dos resíduos e a verificação da validade do modelo, também são importantes nesta fase;

7. Conclusões e recomendações: após analisar os dados, o experimento deve acarretar conclusões de ordem prática sobre os resultados e indicar um plano de ação. Sequências de acompanhamento e testes para confirmação devem ser realizadas para validar as conclusões geradas pelo experimento.

Kelton (2003) afirma que embora os métodos de planejamento de experimentos tenham sido criados para experimentos físicos, estes podem ser utilizados com relativa facilidade em experimentos simulados. O planejamento de experimentos simulados cria oportunidades de melhoria de numerosos sistemas, especialmente, para aqueles no qual a realização de um experimento físico seja árdua ou ainda impossível de ser obtido na prática. Para Montevechi *et al.* (2008a), o projeto experimental, ainda, maximiza a utilidade das informações geradas pelas rodadas da simulação, minimizando o esforço. Isto porque possibilitam a melhoria da

performance do processo de simulação, pois pode-se evitar técnicas de tentativa e erro para alcançar soluções (MONTEVECHI *et al.*, 2007).

Em simulação, o uso do DOE tem se mostrado de grande impacto no auxílio à tomada de decisões (LEAL, 2008).

Após ter um modelo verificado e validado pode-se utilizar o DOE para explorar o modelo (SANCHEZ, 2006). Para Kleijnen (1998), o modelo de simulação deve ser executado utilizando a seleção da combinação dos fatores. Após esta etapa, o DOE analisa os resultados das variáveis de respostas, para concluir sobre a importância dos fatores (LEAL, 2008).

Em concordância com a autora Sanchez (2006), Kleijnen *et al.* (2005) afirmam que os pesquisadores que utilizam simulação podem ter ganhos na análise empregando teoria estatística no DOE. Para Kleijnen *et al.* (2005), os benefícios da utilização do DOE engloba a melhora na performance de sistemas na busca de uma boa solução para a sua configuração, evitando um enfoque de tentativa e erro. Ainda para estes autores poucos usuários de simulação conhecem às possibilidades causadas pelo uso do DOE em simulação.

Para Leal (2008) e Montevechi *et al.* (2008a) obras clássicas relacionadas a DOE, como Box, Hunter e Hunter (1978), Box e Draper (1987), Montgomery (2005), Myers e Montgomery (2002), não estão destinados a suprir as necessidades das análises de simulação, mas sim nas questões práticas em experimentos realizados no sistema real.

Leal (2008) ainda destaca que em obras relacionadas à simulação como Law e Kelton (2000) e Banks *et al.* (2005), debatem vários tópicos do assunto, demonstram o DOE, mas aplicam o mesmo em poucos problemas.

Para Kleijnen *et al.* (2005) isto é explicado pelo fato que a maioria destes projetos surgiram para experimentação em mundo real, ao invés de elaboradas para simulação.

Law e Kelton (2000) apresentam algumas vantagens da experimentação via simulação se comparada a experimentos físicos, industriais ou laboratoriais:

- utilizando a simulação torna-se possível controlar fatores que no sistema real são incontroláveis;
- com a simulação é possível controlar a fonte das variações, diferente do que ocorre em experimentos físicos;
- a aleatorização em experimentos com uso da simulação não se faz necessária, desde que o gerador de números aleatórios seja utilizado de forma correta.

2.5.2 Projeto fatorial completo

Uma das etapas do DOE definidas por Montgomery (2005) é a escolha do projeto experimental. Para Chung (2004) a seleção do projeto experimental sofre influência dos objetivos do projeto de simulação, escolhidos na etapa de definição do problema.

Dentre as diversas técnicas de Projeto de Experimentos tem-se o planejamento fatorial completo, no qual os fatores são alterados em conjunto, e não um de cada vez. Com isto para cada corrida ou réplica completa a totalidade das possíveis combinações dos níveis é averiguada (Montgomery e Runger, 2011). Para Montgomery (2005), esse tipo de planejamento é à base de muitos outros tipos, uma vez que sua análise é simples.

As técnicas de projetos experimentais mais empregadas são: o Planejamento Fatorial Completo, o Planejamento Fatorial Fracionado, os arranjos de Taguchi e a Metodologia de Superfície de Resposta (COSTA, 2010; GOMES, 2010; MIRANDA, 2012).

O Quadro 2.1, adaptado de Gomes (2010) e Miranda (2012), apresenta as principais particularidades dos projetos experimentais mais utilizados. Esse trabalho utilizou o Planejamento Fatorial Completo para a seleção dos tempos de duração de seis tipos de paradas não programadas, em máquinas de corte, que mais influenciam o indicador DO e Total Produzido destes equipamentos. Desta forma, esse método experimental é apresentado com mais detalhes no item 3.5.1.

Paiva (2008) afirma que o mais comum dos arranjos experimentais é o fatorial completo, que abrange todo o espaço experimental. Neste tipo de projeto o número de experimentos é dado pelo número de níveis do experimento elevado ao número de fatores. Dentre os diversos tipos existentes de experimentos, o mais utilizado é aquele onde são determinados apenas dois níveis para cada fator, denominado planejamento fatorial 2^k (MONTEVECHI *et al.*, 2008a), o que foi utilizado neste trabalho.

Os fatores são alterados em conjunto, no planejamento fatorial completo, e não um de cada vez, com isto para cada corrida ou réplica completa, a totalidade das possíveis combinações dos níveis é averiguada (MONTGOMERY e RUNGER, 2003).

Um experimento fatorial completo incide em um idêntico número de replicações para todas as combinações dos níveis atribuídos aos fatores (COX e REID; 2000). O planejamento de experimentos tem um crescimento exponencial das combinações quando é aumentado o número de fatores (KLEIJNEM, 1998; PAIVA, 2008). Assim esta pode ser considerada uma desvantagem do projeto fatorial completo, pois segundo Kelton (1999), o número de rodadas

tende a explodir. Desta forma, uma grande quantidade de fatores pode levar um processo de experimentação se tornar inviável (PAIVA, 2008).

Quadro 2.1- Particularidades das principais técnicas de Projeto e Análise de Experimentos

Projeto experimental	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Fatorial Completo 2^k	Permite a varredura completa da região de estudo, pois utiliza todos os fatores e respectivos níveis.	Não identifica variação intermediária, pois só trabalha em dois níveis. Necessita de um alto número de corridas para problemas com grande número de variáveis.	Processos em que já se tem um prévio domínio e no qual a realização das corridas não demandam maior tempo ou custo.
Fatorial Fracionado $2^{(k-1)}$	Permite uma análise prévia do processo com um número reduzido de corridas.	Não promove a varredura completa da região experimental.	Processos em que se deseja um conhecimento prévio e no qual a literatura é limitada. Corridas que demandam maior tempo ou custo.
Taguchi	Permite a análise de um processo com muitas variáveis de entrada com um número extremamente reduzido de experimentos.	Fornecer uma ideia do processo, porém pode apresentar modelos matemáticos não confiáveis.	Processos onde há pouco ou quase nenhum conhecimento prévio de comportamento. Processos com alta dispersão ou que as corridas demandem alto custo ou tempo.
Metodologia de Superfície de Resposta	Permite a verificação de variações intermediárias do processo.	Pode apresentar erros na extrapolação dos pontos estrela, já que são realizadas poucas corridas nestes níveis.	Otimização de processos, principalmente bem conhecidos e com baixa dispersão.

Fonte: Adaptado de Gomes (2010) e Miranda (2012)

Em contrapartida, Montgomery (2005) ressalta benefícios dos planejamentos fatoriais: é mais eficiente comparado a abordagem de um fator por vez, visto que estes permitem estimar os efeitos dos fatores a partir dos níveis dos demais fatores. Ainda, segundo este autor, isto leva a corretas conclusões a partir do experimento e é o único modo de se identificar interações entre as variáveis, evitando deste modo conclusões equivocadas quando há interações entre fatores. Montevechi, Miranda e Friend (2012) afirmam que o uso de planejamento fatorial pode minimizar ou até mesmo eliminar as desvantagens trazidas pela experimentação de sistemas simulados em vez do sistema real.

2.5.3 Pesquisas em projeto de experimentos simulados

Montevechi *et al.* (2007) utilizaram o DOE combinado à SED para avaliar o efeito de fatores sobre o número de peças produzidas em uma empresa de autopeças, no caso os efeitos das interações foram considerados significativos.

Costa (2010) realizou o uso combinado da SED com o custeio baseado em atividades, DOE e valor presente líquido para auxiliar a tomada de decisões em sistemas de manufatura com o intuito de avaliar economicamente cenários em SED.

Can e Heavey (2011) apresentam o uso do DOE para aprimorar uma metamodelagem de sistemas de manufatura com programação genética. Experimentos em diferentes tamanhos de linhas de produção são apresentados com seus efeitos e análise das variâncias.

Sanchez e Wan (2011) apresentam um tutorial do uso do DOE em simulação. Apresentam os conceitos básicos do projeto experimental, os tipos de metas que podem resolver, e enfatizam que esta é uma ferramenta muito importante e útil para a simulação.

Amiri e Mohtashami (2012) apresentam uma formulação de múltiplos objetivos para um problema de alocação de buffer em linhas de produção. O trabalho propõe uma metodologia baseada em simulação que pode considerar distribuições de funções gerais para todos os parâmetros de linhas de produção. O DOE foi usado para construir um metamodelo para estimar taxa de produção baseado em um modelo de SED detalhado. E ainda foram utilizados algoritmos genéticos combinados a estas técnicas para resolver o modelo de múltiplos objetivos e determinação do tamanho ideal (ou quase ótimo) de cada local de armazenamento.

Miranda (2012) desenvolveu um algoritmo genético adaptativo para otimização não linear de modelos de SED, capaz de alcançar resultados satisfatórios em termos de eficiência e qualidade de resposta, quando comparado a uma ferramenta de otimização comercial. Para

tal objetivo, foi utilizado o DOE para definir os parâmetros mais significativos do algoritmo genético, e, para estes parâmetros, foram propostas adaptações.

Vale ressaltar aqui alguns trabalhos de autores relacionados à manufatura, dentre esses alguns já foram citados ou serão explanados mais adiante: Zhang, Jiang e Guo (2009), Montevechi, Miranda e Friend (2012).

2.6 Otimização

2.6.1 Simulação combinada à otimização

Otimização pode ser definida como um processo de teste de diferentes combinações de valores para variáveis que podem ser controladas, com o intuito de alcançar uma combinação de valores que leve ao resultado desejado para a saída de um modelo de simulação (HARREL, GHOSH e BOWDEN, 2004). Harrel *et al.* (2000) afirmam que na maior parte dos casos este processo de teste de combinações de variáveis pode ser árduo ou mesmo impossível no sistema real, deste modo faz-se o uso de modelos computacionais. Para Montevechi *et al.* (2008a) um modelo já construído e validado, normalmente é utilizado quando se emprega método de otimização em simulação.

Para Prottil (2001), a otimização computacional está fundamentada em um sistema que possui uma relação entrada-saída, onde X é a variável de entrada, Y é a variável de saída e M representa a relação das informações de entrada e saída. Desta maneira, é possível comparar a modelagem, a simulação e a otimização. A modelagem tem o intuito de descobrir as inter-relações entre os dados de entrada e os de saída de um sistema, isto significa que o que se busca é uma representação de seu comportamento. Enquanto na simulação há a manipulação das entradas de um modelo e suas diferentes saídas são averiguadas. Agora, o objetivo da otimização é obter uma saída ótima, realizando alterações na composição das entradas (PINHO, 2008; PINHO e MORAIS, 2010; PROTIL, 2001; TORGA, 2007; MONTEVECHI *et al.*, 2008a). Esta comparação pode ser visualizada na Figura 2.6.

Para Harrel *et al.* (2003), o uso da otimização visa responder perguntas do tipo: Quais os ajustes ótimos das variáveis de entrada (X) que maximizam (ou minimizam) uma saída no modelo de simulação?

Para Chwif e Medina (2010) com o uso de ferramentas de otimização em conjunto com a simulação, esta última se torna uma geradora de soluções e não só uma forma de avaliação destas soluções.

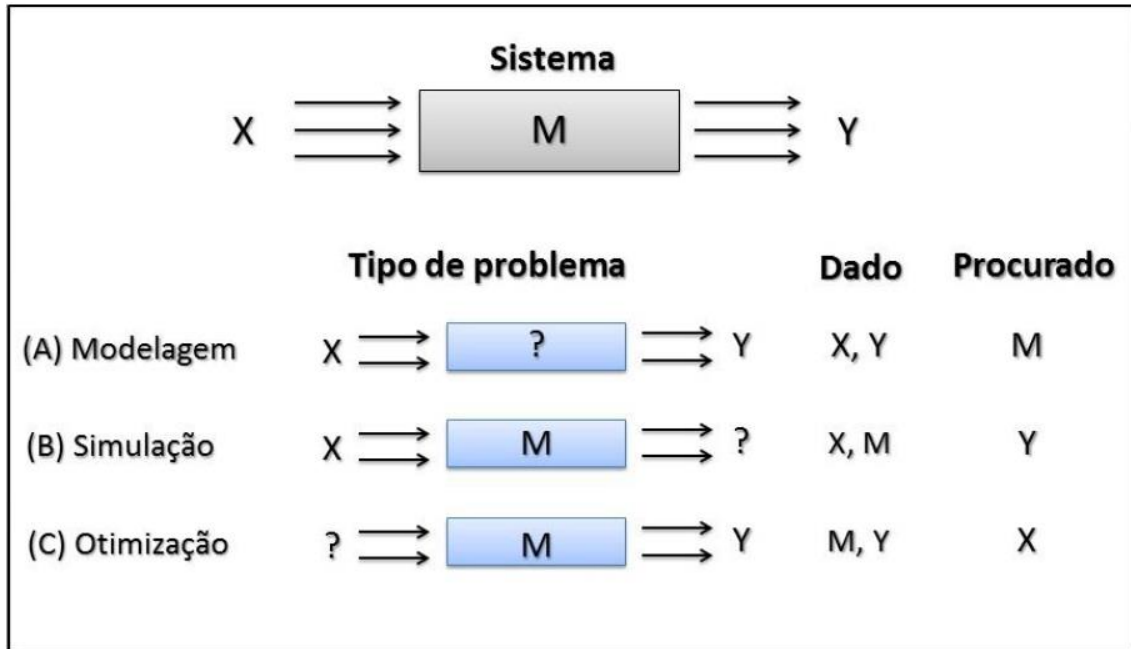


Figura 2.6 - Representação modelagem, simulação e otimização

Fonte: Adaptado de PROTIL (2001)

Kleijnen, Beers e Nieuwenhuysse (2010) destacam que os problemas de otimização com uso de simulação podem ser problemas de difícil solução. E que uma das desvantagens do uso da integração destas duas ferramentas é que as saídas dos modelos de simulação podem ser originadas de funções implícitas e sujeitas a ruídos. Os mesmo autores destacam, ainda, dependendo do número de entradas do modelo de simulação, este processo pode se tornar dispendioso, devido à necessidade de alta capacidade de processamento computacional e o tempo envolvido.

2.6.2 Método desejabilidade

Existem diversas ferramentas de otimização, mas aqui se destaca uma das mais utilizadas na indústria, conforme afirmado por Zhang, Jiang e Guo (2009), o método desejabilidade.

O método desejabilidade é um algoritmo criado inicialmente por Harrington (1965) e que foi aperfeiçoado mais tarde por Derringer e Suich (1980), para ser utilizado na otimização simultânea dos modelos de múltiplas respostas (PAIVA, 2008). Ainda para este autor este método condensa um problema de otimização multivariada em um univariado. Desejabilidade é um método multicritério adequado para avaliar um conjunto de respostas simultaneamente, e que, além disso, possibilita a determinação do conjunto de condições mais

desejável para as propriedades estudadas (VAN GYSEGHEM *et al.*, 2004; SANCHES *et al.*, 2008).

Para Sanches *et al.* (2008), o princípio de funcionamento do método é simples. Inicialmente, devem-se estabelecer as relações entre as respostas e as variáveis independentes, também conhecidas por funções objetivo, conforme apresentada na Equação (2.2). Para isto, normalmente utiliza-se o DOE Fatorial ou Métodos de Superfície de Resposta.

$$\begin{aligned}
 Y_1 &= b_{01} + b_{11}x_1 + b_{21}x_2 + \dots + b_{k1}x_k \\
 Y_2 &= b_{02} + b_{12}x_1 + b_{22}x_2 + \dots + b_{k2}x_k \\
 Y_3 &= b_{03} + b_{13}x_1 + b_{23}x_2 + \dots + b_{k3}x_k \\
 &\vdots \\
 Y_n &= b_{0n} + b_{1n}x_1 + b_{2n}x_2 + \dots + b_{kn}x_k
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

A partir daí, segundo Paiva (2008) e Sanches *et al.* (2008), utiliza-se a formulação unilateral ou bilateral de Harrington (1965) e Derringer e Suich (1980), na qual cada uma das respostas do conjunto original é transformada de modo que a Função Desejabilidade para cada uma das respostas d_k pertença ao intervalo $[0, 1]$. O valor de d_k cresce quando a k -ésima resposta se aproxima dos limites estabelecidos.

Para Paiva (2008), a Equação (2.3) é empregada com o intuito de descobrir o índice global D , a partir da combinação de cada uma das respostas transformadas, por meio de uma média geométrica.

$$D = (d_1(Y_1) \times d_2(Y_2) \times \dots \times d_k(Y_k))^{\frac{1}{k}}
 \tag{2.3}$$

Ainda para o mesmo autor, o resultado da média geométrica representada pela Equação (2.3), o valor de D avalia de modo geral os níveis do conjunto combinado de respostas. Da mesma forma que d_k também pertencente ao intervalo $[0, 1]$ e será maximizado quando a totalidade das respostas se aproximarem o máximo possível de suas especificações. Osborne *et al.* (1997) e Rossi (2001) alegam que quanto mais próximo de 1, estiver D , mais próximas dos limites de especificação estarão as respostas originais. O ponto de ótimo geral do sistema é o ponto de ótimo alcançado pela maximização da média geométrica, dada pela Equação (2.3), calculada a partir das Funções Desejabilidade individuais (PAIVA, 2008).

O uso da média geométrica, Equação (2.3) é vantajosa, pois leva ao alcance da solução global de forma balanceada, possibilitando que todas as respostas atinjam os valores esperados e impelindo o algoritmo a se aproximar das especificações impostas. No caso disto não ser possível, o algoritmo gera uma solução inviável para o problema (PAIVA, 2008).

O algoritmo de Derringer e Suich (1980) está sujeito ao tipo de otimização que se deseja para a resposta (maximização, normalização ou minimização), dos valores desejados (limites de especificação) e das respectivas importâncias de cada resposta (PAIVA, 2008). O Quadro 2.2 mostra as características principais dos diferentes tipos de otimização possíveis com este método.

Quadro 2.2- Objetivos de Otimização no Método Desejabilidade

Objetivo	Características	Representação Esquemática
Minimizar	O valor da Função Desejabilidade cresce enquanto que o valor da resposta original se aproxima de um valor alvo mínimo. Abaixo do alvo, $d=1$; acima do limite superior, $d=0$.	
Normalizar	Quando a resposta se movimenta na direção do alvo, o valor da Função Desejabilidade cresce. Acima ou abaixo dos limites, $d=0$; no alvo $d=1$.	
Maximizar	O valor da Função Desejabilidade cresce quando o valor da resposta aumenta. Abaixo do limite inferior, $d=0$; acima do alvo, $d=1$.	

Fonte: Paiva (2006)

Para Wu (2005) e Murphy, Tsui e Allen (2005), para a maximização de uma resposta, a fórmula de transformação utilizada é a apresentada pela Equação (2.4). Nesta Equação, L_i e T_i são, respectivamente, o menor e o maior valor aceitáveis para a i -ésima resposta.

O valor de R na Equação (2.4) indica o predomínio dos limites, para o qual valores maiores que a 1 precisam ser usados quando a resposta cresce rapidamente acima de L_i . Assim sendo, d_i aumenta lentamente, enquanto o valor da resposta vai sendo maximizado.

Logo, para se maximizar D , a i -ésima resposta deve ser bem maior que L_i . Pode-se optar por $R < 1$ quando não for crucial obter valores para a resposta abaixo dos limites fixados.

$$d = \begin{cases} 0, & \hat{Y}_i < L_i \\ \left[\frac{\hat{Y}_i - L_i}{T_i - L_i} \right]^R, & L_i \leq \hat{Y}_i \leq T_i \\ 1, & \hat{Y}_i > T_i \end{cases}, \quad (2.4)$$

Segundo Paiva (2008), a minimização de \hat{Y}_i é equivalente à maximização de $-\hat{Y}_i$ (DERRINGER e SUICH, 1980). Para este autor, nos casos no qual o intuito é alcançar um valor alvo, a formulação de transformação passa de unilateral para bilateral. A formulação bilateral está apresentada na Equação (2.5) na qual ocorre quando a resposta de interesse possui dupla restrição: uma de máximo e outra de mínimo.

$$d = \begin{cases} 0, & \hat{Y}_i < L_i \text{ ou } \hat{Y}_i > H_i \\ \left[\frac{H_i - \hat{Y}_i}{H_i - T_i} \right]^R, & T_i \leq \hat{Y}_i \leq H_i \\ \left[\frac{\hat{Y}_i - L_i}{T_i - L_i} \right]^R, & L_i \leq \hat{Y}_i \leq T_i \end{cases}, \quad (2.5)$$

Para Paiva (2006), a principal dificuldade do método é que este depende de uma escolha subjetiva das funções d_i individuais. Além de não levar em consideração a variância das respostas, bem como a estrutura de correlação entre elas (KO *et al.*, 2005; WU, 2005). Outra desvantagem do método, segundo Ortiz, Simpson e Pignatiello (2004), é que a medida de que se considera um número maior de fatores de respostas existe um aumento da não linearidade de D , caso em que o método poderá conduzir à localização apenas de ótimos locais.

2.6.3 Pesquisas em otimização via Função Desejabilidade

O uso integrado de simulação e otimização é discutido em trabalhos como de Van Volsem, Dullaert e Van Landeghem (2007) com o intuito de otimizar estratégias de inspeção em sistemas de produção com múltiplas etapas de trabalho.

Ang e Sivakumar (2007) utilizam SED, otimização baseada em algoritmos genéticos com Função Desejabilidade. No trabalho apresentam os conceitos de desenvolvimento e potencial aplicação desta simulação, para determinar a programação de um implantador de íon

submetido a múltiplos objetivos conflitantes e com sequência dependente do *setup* na fabricação de semicondutores.

Zhang, Jiang e Guo (2009) realiza um estudo em uma empresa de fabricação de *wafers* de semicondutor na qual o agendamento de fabricação desse produto é complicado devido ao seu fluxo de reentrantes, grandes incertezas nas operações, e rápidas mutações nos produtos e tecnologias. Assim sendo, as regras de envio têm sido amplamente utilizadas para a programação em tempo real, pois podem fornecer uma rápida e muito boa solução. Assim o trabalho descreve uma abordagem para a avaliação e otimização de regras de envio, integrando a simulação, metodologia de superfície de resposta (MSR) e Função Desejabilidade.

Asim, Mahmood, Siddiqui (2012) discutem o potencial de otimização simultânea, via Função Desejabilidade, do processo de fixação de impressão reativa e acabamento resistente a vinco de uma etapa de produção de uma fábrica de algodão.

Islam, Alam e Hannan (2012) realizaram uma tentativa para otimizar os parâmetros do processo de produção de aglomerado de partículas, usando processo de otimização de múltiplas respostas. Por meio da Função Desejabilidade e metodologia de superfície de resposta (MSR), buscou-se atingir a espessura ideal do floco, conteúdo de umidade em lascas secas (U%), temperatura e pressão que afetam o módulo de arrebatamento (MOA) e o módulo de elasticidade (MOE) da produção de aglomerado de partículas.

Al-Refaie *et al.* (2013) propõem uma abordagem para otimização de múltiplas respostas *fuzzy* utilizando a Função Desejabilidade e regressão *fuzzy*. Cada resposta da repetição é transformada em uma relação sinal-ruído que então é modelada utilizando regressão múltipla estatística. Um estudo de caso é utilizado para ilustração.

John (2013) realizou um estudo para otimizar simultaneamente, via Função Desejabilidade, a dureza superficial e profundidade de escovas de carbonitreto. Nesta pesquisa, o efeito de quatro fatores e duas interações foram estudadas utilizando o DOE.

Roy, Barma e Saha (2013) e Singh, Datta e Mahapatra (2013) utilizaram o método de Taguchi combinado com Função Desejabilidade para otimizar parâmetros em soldagem. A Função Desejabilidade é aplicada para converter uma função de múltiplos objetivos em uma de único objetivo.

2.7 Considerações finais

Este capítulo mostrou o referencial teórico deste trabalho. Foram abordados os principais temas envolvendo a SED, a modelagem conceitual, a verificação, a validação, o indicador de desempenho DO, o DOE, e otimização.

Dessa maneira, tentou-se com isto promover um maior entendimento do trabalho que será desenvolvido ao longo dessa dissertação.

3 PLANEJAMENTO E CONDUÇÃO DA PESQUISA

3.1 Aplicação do Método de Pesquisa

Este capítulo apresenta a aplicação prática do método proposto por Montevechi *et al.* (2010), apresentado anteriormente na Figura 1.1 (Capítulo 1), na área de corte da empresa estudada. O processo de pesquisa foi dividido em três etapas principais, conforme apresentado no Capítulo 1: concepção, implementação e análise.

3.1.1 Concepção

Segundo Montevechi *et al.* (2010), a primeira etapa a ser trabalhada consiste na definição dos objetivos do estudo, construção e validação do modelo conceitual e modelagem dos dados de entrada.

3.1.1.1 Objetivos e Definição do Sistema

O sistema modelado é uma área de corte de uma empresa brasileira de autopeças, que produz um componente automotivo. Composta por oito máquinas idênticas que produzem produtos similares e operam em paralelo. A operação destas máquinas consiste basicamente em cortar uma matéria-prima e juntar a duas peças de outra matéria-prima, criando-se assim o referido produto. Esse, por sua vez, é considerado a principal matéria-prima para todas as linhas de montagem da empresa e possui o maior valor agregado do produto final, fato que justifica a escolha de tal área de corte como objeto de estudo. A Figura 3.2 apresenta um leiaute ilustrativo com as oito máquinas em paralelo com legenda de siglas.

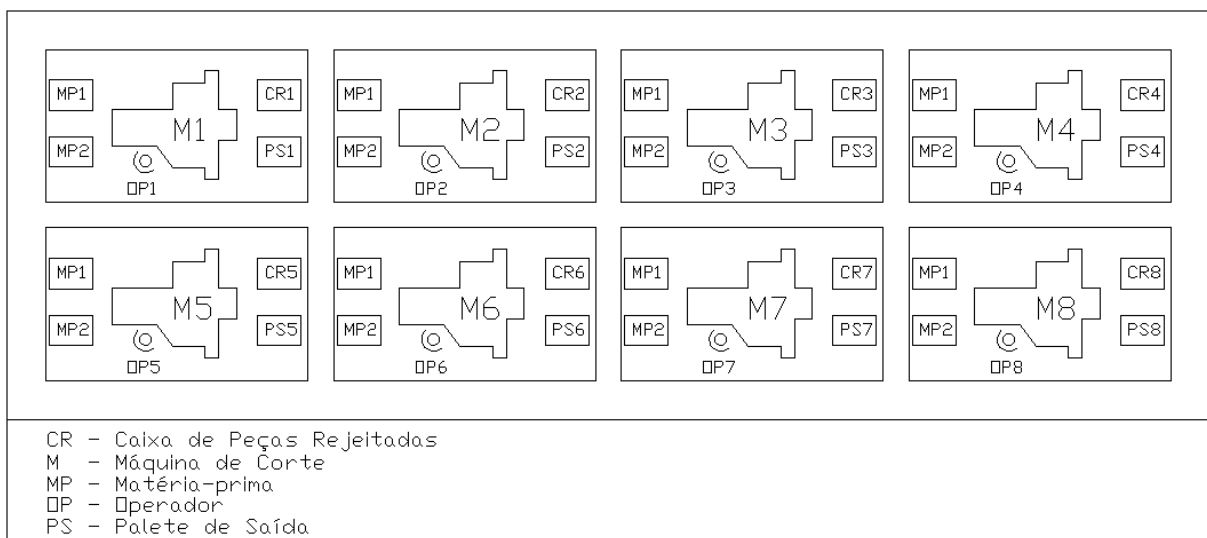


Figura 3.1 – Leiaute ilustrativo da área de corte com oito máquinas

Uma destas máquinas, denominada M1, foi à escolhida para ser modelada, uma vez que, segundo especialistas da empresa em questão, ela é a que melhor representa as demais. Além disso, havia uma maior facilidade de acesso à mesma pelos pesquisadores. Assim sendo, o modelo desta máquina M1 constitui um submodelo, que deverá ser replicado oito vezes para que se complete a modelagem da área de corte.

Nessa área não existem paradas programadas das máquinas durante os períodos de descanso, almoço e/ou jantar dos operadores, devido à existência de um operador substituto nestes momentos. As manutenções preventivas são realizadas fora do turno produtivo e a matéria-prima é disponibilizada nos postos por um operador que não está envolvido diretamente na operação da máquina. Este operador além de desempenhar tal função, é também responsável por disponibilizar os ferramentais necessários para o *setup* da máquina ou para outras etapas da operação. O operador da máquina, por sua vez, é responsável por alimentá-la com a matéria-prima, fazer pequenos ajustes de parâmetros, realizar algumas inspeções visuais dos produtos produzidos - de forma amostral - e realizar o *setup* ao final do lote de produção. Ao final da linha, a inspeção da primeira peça produzida é realizada por inspetores e os produtos defeituosos são dispostos no ponto de descarte.

Foram consideradas no modelo, para a máquina M1, todas as paradas não programadas, que se dividem em seis tipos: tempo de *setup*, tempo de manutenção corretiva, tempo de troca no término da matéria-prima 1 (MP1), tempo de troca no término da matéria-prima 2 (MP2), tempo de problemas com ferramental e tempo de problemas com abastecimento. A ocorrência percentual de tais paradas são mostradas na Figura 3.2, em um diagrama de Pareto, cuja elaboração se deu a partir da coleta de dados durante três meses, o que resultou num total de 384 horas de paradas da máquina de corte em questão.

A partir disso, foi elaborado um modelo computacional da área em questão, englobando as oito máquinas, de forma a permitir que se identifiquem as variáveis que mais impactam no Total Produzido e na DO, bem como suas possíveis interações. Além disso, deverão ser analisadas as metas estabelecidas pela empresa, tanto para o Total Produzido quanto para DO, de forma a verificar se essas podem ser atingidas e, ainda facilitar o direcionamento da redução dos tempos de paradas não programadas. Estes objetivos estabelecidos vão de encontro ao objetivo geral definido para esta dissertação.

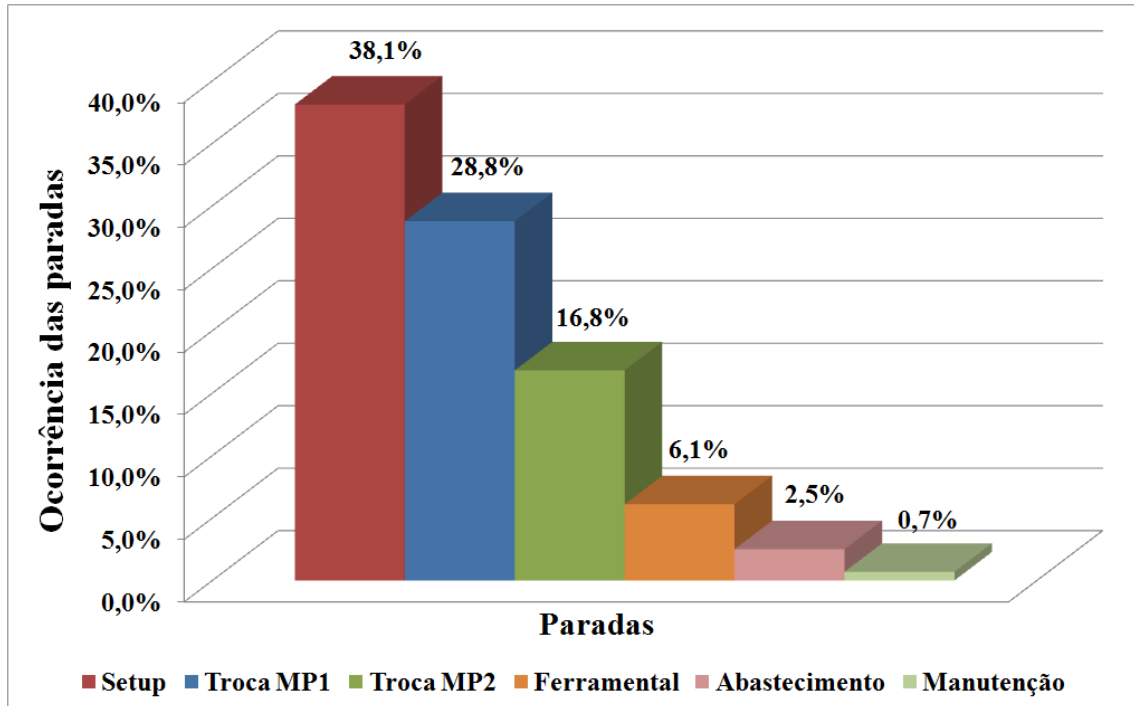


Figura 3.2 - Ocorrência de paradas registradas, em um trimestre, na máquina M1

3.1.1.2 Construção e validação do modelo conceitual

Para a construção do modelo é necessário, inicialmente, que se mapeiem as atividades do processo a ser simulado, o que irá fornecer informações essenciais para elaboração do modelo conceitual (LEAL, 2008; MONTEVECHI *et al.*, 2010).

Para esta etapa foi utilizada a técnica IDEF-SIM, proposta por Leal (2008) e Montevechi *et al.* (2010). Esta técnica já foi apresentada e justificada, anteriormente, na seção 2.2. Conforme mencionado anteriormente, os símbolos do IDEF-SIM podem ser visualizados no ANEXO A.

A Figura 3.3 apresenta o modelo conceitual por meio da utilização da técnica IDEF-SIM, no qual os valores percentuais são os utilizados no modelo. Os dados referentes a este modelo serão detalhados na Tabela 3.1, no item 3.1.1.3.

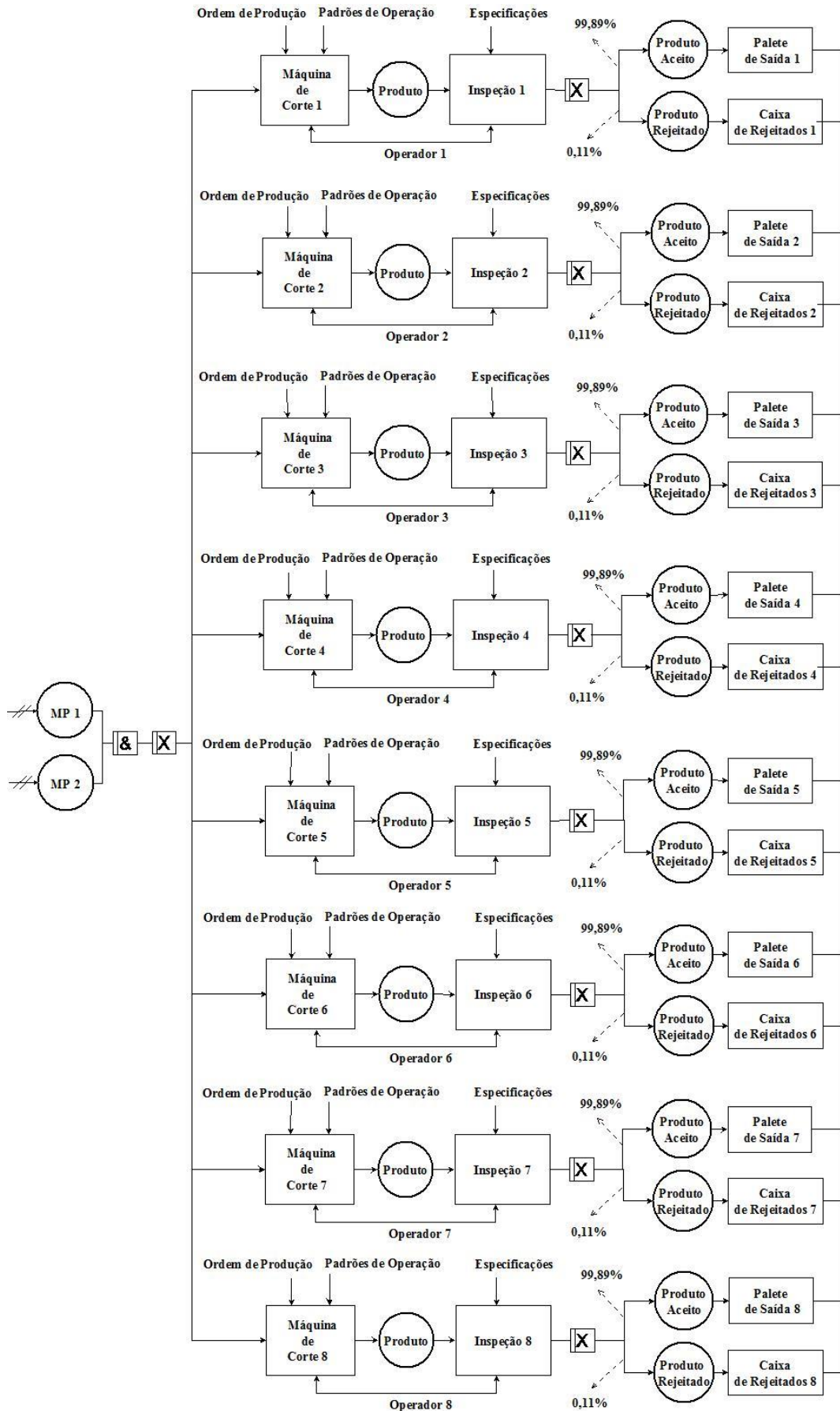


Figura 3.3 – Modelo conceitual da área de corte

Depois de elaborado, o modelo conceitual da Figura 3.3 foi apresentado aos especialistas da empresa e validado por eles por meio da técnica de validação face a face, já mencionado e justificado na seção 2.3. Não houve a necessidade de realizar o mapeamento das oito máquinas, pois elas são idênticas e trabalham em paralelo.

3.1.1.3 Modelagem dos Dados de Entrada

Essa etapa é composta por três passos: coleta dos dados, tratamento dos dados e inferência (MONTEVECHI *et al.*, 2010).

O trabalho foi desenvolvido a partir de três meses de informações coletadas no banco de dados da companhia, referentes à máquina que, segundo os especialistas da empresa, melhor representava as demais na área de corte estudada (M1) e que, além disso, era de mais fácil acesso ao pesquisador, conforme dito anteriormente.

O banco de dados é alimentado por informações descritas pelos operadores das máquinas de corte, em formulários nos quais as paradas não programadas são registradas na forma de códigos padronizados em conjunto com o nome do produto em produção, data, horário, local de ocorrência e o tempo de parada. Além disso, alguns dados complementares sobre o processo foram fornecidos diretamente pelos especialistas da empresa.

A partir de então, para tratamento dos dados do modelo da Figura 3.3 apresentados na Tabela 3.1, foram seguidos os seguintes passos:

a) Utilização do software Minitab[®] para identificar e, posteriormente, eliminar os *outliers*, quando necessário, conforme análise dos especialistas da companhia. O número de amostras de dados sem *outliers* pode ser visto na Tabela 3.1.

b) Cálculo do número de amostras necessárias: para tanto foi utilizada uma fórmula proposta por Morettin e Bussab (2010) - Equação (3.1) - considerando um nível de confiança de 95% para todos os dados. Dessa forma, verificou-se que o número de amostras existentes, sem os *outliers*, era suficiente.

$$n = \left(\frac{Z \cdot S}{e} \right)^2 \quad (3.1)$$

Na qual:

n = número de amostras necessárias;

Z = constante a ser inserida na fórmula de acordo com a confiabilidade esperada;

S = desvio padrão;

e = erro para a confiabilidade esperada ($e = \text{média} \times \text{probabilidade de erro}$).

c) Identificação das distribuições que melhor aderiram-se aos dados, utilizando-se o software Minitab®.

Tabela 3.1 – Dados de entrada referentes à máquina de corte

Variável	Número de amostras	Amostras a serem utilizadas (sem outliers)	Distribuição	Média	Desvio padrão
Tempo Padrão (min/peça)	1040	955	Lognormal	0,0172	0,0021
Tempo de <i>Setup</i> (min)	1040	1040	Lognormal	11,16	4,51
Tempo de Manutenção Corretiva (min)	19	19	Lognormal	13,63	7,90
Tempo de Troca de MP1 (min)	459	459	Lognormal	5,36	1,32
Tempo de Troca de MP2 (min)	785	785	Lognormal	5,61	2,42
Tempo de Problemas com Ferramental (min)	167	167	Lognormal	9,46	3,6
Tempo de Problemas com Abastecimento (min)	48	48	Lognormal	10,15	4,33
Tempo de Paradas programadas (min)	211	203	Lognormal	8,54	2,96
Frequência de ocorrência de parada por <i>Setup</i> (min)	63	50	Lognormal	38,23	6,19
Frequência de ocorrência de parada por Manutenção Corretiva (min)	15	15	Lognormal	522,67	136,93
Frequência de ocorrência de parada por Troca de MP1 (min)	61	61	Lognormal	94,49	71,53
Frequência de ocorrência de parada por Troca de MP2 (min)	61	60	Lognormal	50,15	16,58
Frequência de ocorrência de parada por Problemas de Ferramental (min)	55	55	Lognormal	266,11	166,32
Frequência de ocorrência de parada por Problemas de Abastecimento (min)	30	30	Lognormal	439,37	165,03
Frequência de ocorrência de parada programada (min)	63	61	Lognormal	216,91	95,60

A mesma análise foi realizada para a DO e para o Total Produzido por turno, mas esses dados foram utilizados apenas na fase de validação do modelo.

3.1.2 Implementação

Segundo Montevechi *et al.* (2010), a fase de implementação é composta por construção, verificação e, por fim, a validação do modelo computacional.

3.1.2.1 Modelo Computacional: construção e verificação

O software utilizado neste trabalho para a modelagem da área de corte foi o ProModel[®]. Para Saif, Seliaman e Ahmad (2006), o ProModel[®] é um software de simulação de fácil modelagem e aplicável a todos os tipos de sistemas de produção, representando assim uma poderosa ferramenta de apoio à tomada de decisão. Além disso, sua escolha se deve à experiência dos pesquisadores com o simulador (fato evidenciado por sua utilização em diversos trabalhos do grupo de pesquisa) e por esse apresentar interface gráfica amigável (com animações), o que facilita a verificação e validação do modelo computacional.

Foram elaborados diversos modelos, em ordem crescente de complexidade, até representar toda a área de corte.

Definiram-se para as oito máquinas, as “entidades”: matéria-prima 1 (MP1), matéria-prima 2 (MP2), produto, produto rejeitado e a rota que o “recurso” (operador) iria percorrer. Na Figura 3.4, é possível ver as oito máquinas idênticas que operam em paralelo no modelo do ProModel[®] e identificadas da seguinte forma: máquina 1 (M1), máquina 2 (M2), máquina 3 (M3), máquina 4 (M4), máquina 5 (M5), máquina 6 (M6), máquina 7 (M7) e máquina 8 (M8). Na Figura 3.5 é possível visualizar em detalhe uma das máquinas que compõe área de corte.

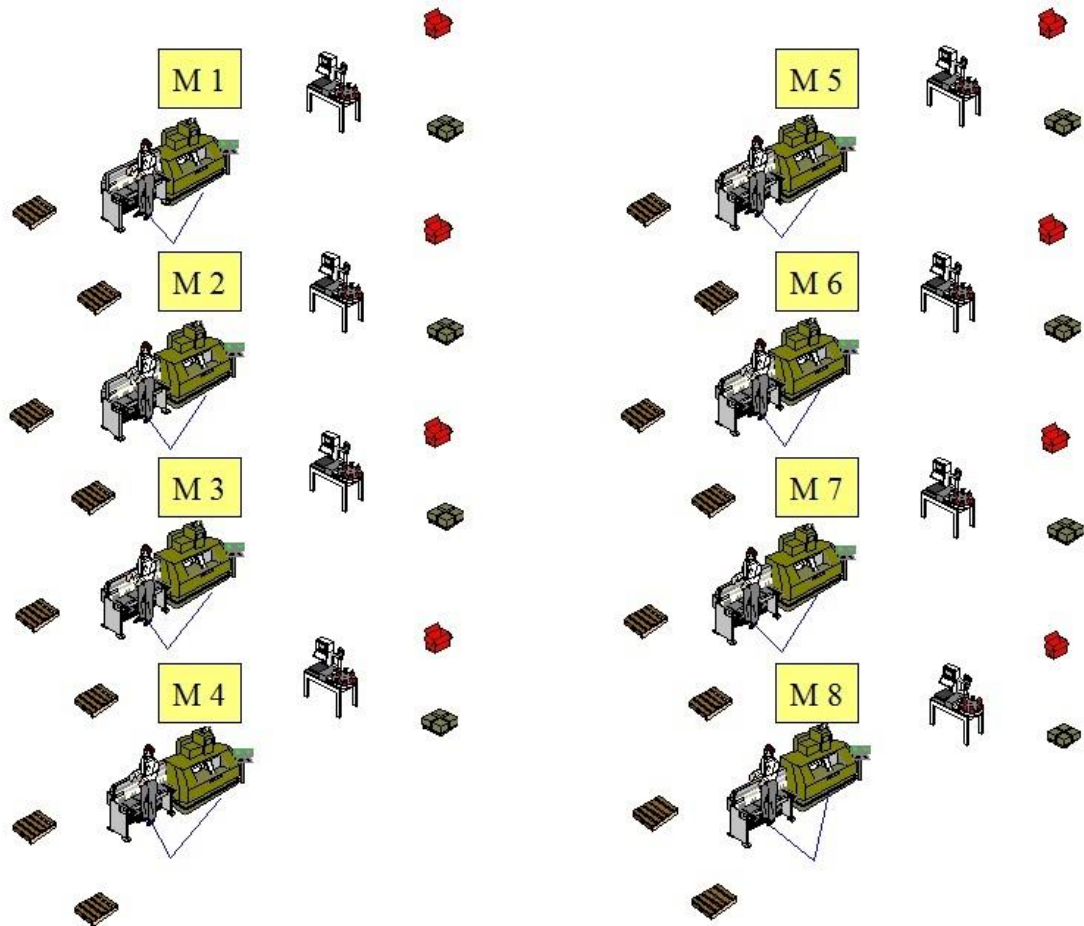


Figura 3.4 - Tela do ProModel[®] para o modelo desenvolvido com as oito máquinas idênticas

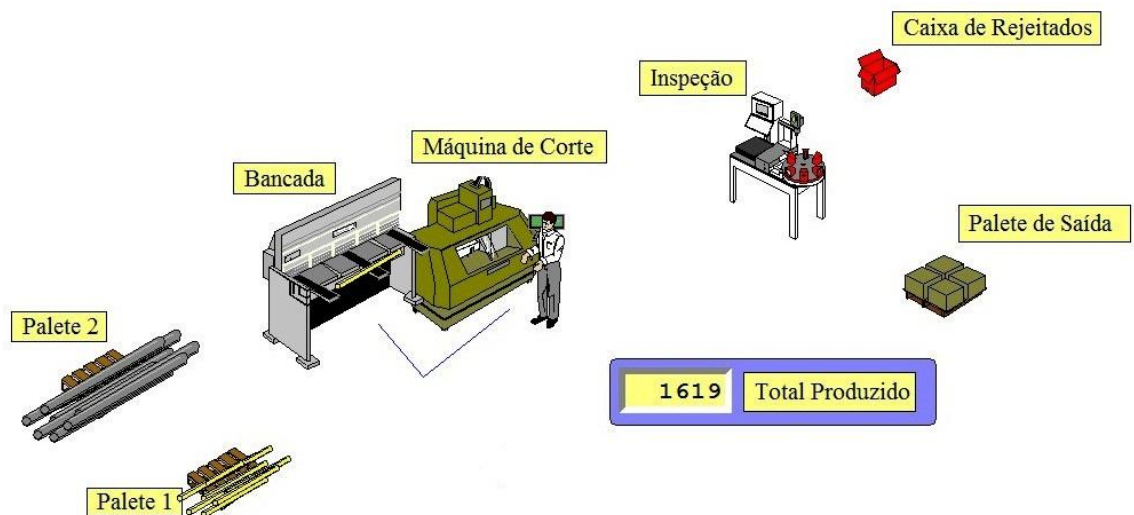


Figura 3.5 - Detalhe de uma das oito máquinas que compõem a área de corte

De forma a permitir o cálculo da DO para o conjunto de oito máquinas de corte, foi utilizada a fórmula da DO de Braglia, Frosolini e Zammori (2009), entretanto adaptada ao

fato de o objeto de estudo possuir mais de uma máquina em paralelo, conforme apresentado na Equação (3.2).

$$DO = \frac{\sum_{i=1}^n TPP_{(i)} - \sum_{i=1}^n TPNPR_{(i)}}{\sum_{i=1}^n TPP_{(i)}} \quad (3.2)$$

Na qual:

n = número de máquinas;

TPP = tempo programado de produção;

TPNPR = Tempo de parada não programada;

Considerando n máquinas, para encontrar o Total Produzido na área de corte, foram somadas as produções de todas as máquinas em um turno de produção, apresentada na Equação (3.3).

$$TOTAL \ PRODUZIDO = \sum_{i=1}^n TOTAL \ PRODUZIDO_{(i)} \quad (3.3)$$

Desta forma, todos os resultados referentes à DO e ao Total Produzido deste trabalho são os resultantes do conjunto de oito máquinas paralelas que compõem a área de corte em estudo, conforme apresentado anteriormente nas Equações (3.2) e (3.3).

Como pode ser observado na Tabela 3.1, todos os dados de entrada são distribuições de probabilidade e são, logicamente, os mesmos para as oito máquinas. Mas, para Leal (2008), o uso de uma mesma distribuição de probabilidade em diversos pontos da programação do modelo computacional, resulta em um mesmo valor em cada réplica. Assim, todas as oito máquinas seriam submetidas às mesmas ações simultaneamente, tais como: tempo de paradas, frequência de ocorrência das mesmas e tempo de produção por peça.

Com o intuito de evitar isto, foi utilizado um recurso do software ProModel[®] denominado *streams*, para garantir uma aleatorização. ProModel User Guide (2011) e Leal (2008), definem *stream* como o ciclo de uma sequência pseudo-randômica de números independentes. Para esse ciclo são gerados números aleatórios entre 0 e 1, para serem utilizados nas distribuições de probabilidade. O ponto de início do ciclo é denominado semente e escolhido pelo programador. Tanto o *stream* quanto a semente devem ser um

número de 1 a 100. Caso o programador não informe o ponto inicial do ciclo, o software adota o número escolhido para o *stream*. Os *streams* que tenham a mesma semente geram a mesma sequência de números aleatórios. No entanto, se forem definidos diferentes valores de sementes para os *streams*, são produzidas diferentes sequências de números aleatórios.

Desta forma ao se definirem as distribuições dos dados de entrada para as oito máquinas se fez necessário escolher, para cada uma delas, diferentes valores de *streams* e as respectivas sementes, também diferentes entre si. Dessa maneira, as oito máquinas apresentarão tempos de paralisação, frequência de ocorrência das paradas e até mesmo tempos de produção diferentes, devido ao ponto de início no ciclo (semente) de números aleatórios. Para que isto ocorra, durante a programação dos dados de entrada no ProModel[®], tem-se que adicionar o número do *stream* (correspondente a cada máquina) à suas distribuições de probabilidade. Isso pode ser notado tomando como exemplo a máquina M1, na qual a distribuição lognormal (L) do tempo de *setup*, com valores mostrados na Tabela 3.1, é $L(11,16; 4,51; 1)$ min, com a média do tempo de parada de 11,16 minutos, desvio padrão de 4,51 minutos e *stream* igual a 1. Para o caso específico desta máquina, o *stream* foi associado à semente 1, em uma tabela do software.

Após essas alterações na programação do modelo, ele foi verificado por meio de depurações, correções nos erros de lógica, visualização das animações e análise dos gráficos de saída, conforme mencionado anteriormente na seção 2.3.

3.1.2.2 Validação do Modelo Computacional

Desse modo, para a validação estatística do modelo em questão foi utilizado o método proposto por Kleijnen (1995), conforme apresentado e detalhado anteriormente na seção 2.3.

Para tal validação foi tomada apenas a máquina M1, isso porque a empresa não dispunha de dados suficientes para possibilitar a validação do modelo com as oito máquinas. Mas isso não constitui um problema, já que todas as máquinas são idênticas e operam em paralelo, ou seja, não interferem na operação umas das outras.

Dessa forma, foram realizadas 21 replicações do modelo e, para um nível de confiança de 95%, o modelo da máquina M1 foi validado, tanto para a variável Total Produzido como para a DO, uma vez que ambos os intervalos contém zero. O resultado da validação encontra-se na Tabela 3.2.

Assim, como modelo da máquina M1 foi validado e outras sete máquinas são réplicas idênticas desse, considera-se que o modelo completo com oito máquinas foi validado.

Pela Equação (3.1), de número de amostras de Moretin e Bussab (2010), apenas 12 amostras seriam suficientes para esta validação, mas foram mantidas as 21.

Tabela 3.2 – Resultado do teste de Kleijnen (1995) para a máquina M1

Variável	Intervalo resultante do teste Kleijnen (1995)
Total Produzido	[-92,93; 2501,88]
Disponibilidade Operacional (DO)	[-0,0679; 0,0045]

3.1.3 Análise

Segundo Montevechi *et al.* (2010), essa fase utilizará o modelo operacional, execução de experimentos, análise dos resultados e conclusões.

De posse de um modelo de simulação validado e verificado, pode-se utilizá-lo para avaliar percepções de melhorias nos tempos das paradas não programadas, bem como suas consequências em duas variáveis de resposta: o Total Produzido e o indicador DO. Para isso, pode-se lançar mão de ferramentas como o DOE para direcionar a etapa experimental do modelo de simulação. Além disso, nessa etapa, também é possível o uso de ferramentas de otimização, como a Função Desejabilidade para auxiliar a tomada de decisão.

Assim, tem-se a definição do projeto experimental, a execução dos experimentos e as respectivas análises estatísticas.

3.1.3.1 Definição do projeto experimental

Os dados desse estudo, conforme informado anteriormente, compreendem três meses de produção da máquina de corte M1. No período houve 384 horas de paradas não programadas distribuídas em seis tipos de fatores descritos da seguinte forma:

- Fator A - tempo de *setup*: Caracteriza-se pelo tempo gasto na execução da operação de *setup*, atualmente executada pelo operador da máquina, até que seja produzida a primeira peça boa do próximo lote (SLACK, CHAMBERS e JOHNSTON 2010).

- Fator B - tempo de manutenção corretiva: Deve-se ao tempo gasto na execução de manutenção corretiva, pelos técnicos de manutenção nas máquinas durante o turno de produção.

- Fator C - tempo de troca no término de MP1: Deve-se ao tempo gasto na execução da troca da matéria-prima 1 (MP1), devido ao seu término durante o processamento da ordem de produção. Essa operação é executada atualmente pelo operador da máquina.

- Fator D - tempo de troca no término de MP2: Semelhante ao anterior, caracteriza-se pelo tempo gasto na execução da troca da matéria-prima 2 (MP2) devido ao seu término

durante o processamento da ordem de produção. Essa operação é, atualmente, executada pelo operador da máquina.

- Fator E - problemas com ferramental: Deve-se a problemas em que se faz necessário o ajuste do ferramental, já realizado durante a operação de *setup*, mas que devido a desgastes ou ajustes fora do padrão estabelecido perde a regulagem durante o processamento da ordem de produção, levando à parada da máquina para correção. Essa operação pode ser executada pelo próprio operador, que deve realizar os ajustes e terminar a ordem, e em seguida, seu líder o encaminha à área responsável pelo ferramental, para realizar a detecção da causa raiz do problema e saná-lo.

- Fator F - problemas com abastecimento: Ocasionado por problemas de abastecimento das matérias-primas ou até mesmo do ferramental necessário para o processamento da ordem de produção, essa parada deve-se ao desvio da rota estabelecida para abastecimento (ou mesmo à má definição da rota, o que a torna excessivamente longa), falta de treinamento do abastecedor e má organização do material no ponto de coleta ou mesmo próximo às máquinas.

Em uma reunião realizada com especialistas da empresa, considerou-se o intuito de avaliar esses seis fatores, inicialmente, sobre o Total Produzido pelas oito máquinas da área de corte, por dia, considerando um turno de produção. E em um segundo momento, considerar o efeito desses mesmos fatores no indicador DO, para o mesmo intervalo de tempo e para a área de corte como um todo.

Desse modo, para confecção da matriz experimental, para cada tipo de parada não programada descrita (fatores) foram estabelecidos dois níveis. Esses seis fatores saem do seu estado atual (nível +) para o estado de melhoria de tempo (nível -), conforme metas factíveis e adotadas pela empresa para essas paradas. Para o nível (-), foram definidos valores determinísticos de duração das paradas, pois os gestores da área de corte não têm condições de estimar a variabilidade dos fatores sem a realização das melhorias. No Quadro 3.1, os fatores e seus níveis são apresentados.

Apesar de a área de corte ser composta por oito máquinas idênticas, as paradas não programadas ocorrem aleatoriamente, graças ao comando *stream* do software ProModel[®], apresentado anteriormente.

Nesse momento, se faz necessário realizar uma explanação sobre as ações factíveis que, segundo os especialistas da companhia, possibilitam alcançar o nível (-) de melhoria dos tempos de paradas para os seis fatores em questão.

Quadro 3.1- Fatores e níveis considerados no projeto experimental

Fator	Nível (+)	Nível (-)
A: (Tempo de <i>Setup</i>)	Ocorrência aleatória, com tempo atual de paralisação de L(11,16; 4,51) min.	Ocorrência aleatória, com tempo reduzido de paralisação, após melhorias, de 7,50 min.
B: (Tempo de Manutenção Corretiva)	Ocorrência aleatória, com tempo atual de paralisação de L(13,63; 7,90) min.	Ocorrência aleatória, com tempo reduzido de paralisação, após melhorias, de 10,00 min.
C: (Tempo de Troca no Término de MP1)	Ocorrência aleatória, com tempo atual de paralisação de L(5,36; 1,32) min.	Ocorrência aleatória, com tempo reduzido de paralisação, após melhorias, de 4,00 min.
D: (Tempo de Troca no Término de MP2)	Ocorrência aleatória, com tempo atual de paralisação de L(5,61; 2,42) min.	Ocorrência aleatória, com tempo reduzido de paralisação, após melhorias, de 4,00 min.
E: (Problemas com Ferramental)	Ocorrência aleatória, com tempo atual de paralisação de L(9,46; 3,6) min.	Ocorrência aleatória, com tempo reduzido de paralisação, após melhorias, de 7,00 min.
F: (Problemas com Abastecimento)	Ocorrência aleatória, com tempo atual de paralisação de L(10,15; 4,33) min.	Ocorrência aleatória, com tempo reduzido de paralisação, após melhorias, de 8,00 min.

Inicialmente temos o fator A, que contempla o tempo de execução de *setup* e que, segundo os especialistas da empresa, pode ser melhorado para esse tempo do nível (-) por meio de uma espécie de *pit stop* para troca de ferramentas, atrelado ao apontamento de produção eletrônico, antes realizado manualmente pelo operador. Este também incluirá os parâmetros necessários para o *setup* da máquina, que antes eram digitados pelo operador na tela da mesma e que agora seria realizado de forma automática, segundo a ordem de produção, reduzindo-se assim as atividades do operador durante a execução do *setup*.

Já o fator B, que se trata do tempo de execução de manutenção corretiva, pode ser melhorado para esse tempo do nível (-) intensificando-se o treinamento dos técnicos que executam a manutenção e aperfeiçoando-se os procedimentos, atuando de forma mais ativa nas causas raízes dos problemas geradores das maiores paradas. Assim as manutenções corretivas seriam apenas pequenos ajustes que podem ser realizados dentro da meta estabelecida no nível (-) do Quadro 3.1.

O fator C, que se refere ao tempo de troca no término da MP1, pode ser melhorado para este tempo do nível (-), segundo os especialistas da companhia, pela inserção de um

dispositivo de baixo custo nas máquinas, que facilitaria a emenda da cartela (forma de armazenamento desta matéria-prima) que está se findando, no decorrer da ordem, com a nova cartela de MP1. Além disso, seria conveniente o auxílio de outro operador para agilizar a operação de troca por conta da divisão de tarefas. Outra forma seria intensificar a fiscalização, para que os operadores anotem o real consumo desta matéria-prima nas cartelas. Assim, com o consumo real digitado na tela da máquina será possível perceber, por meio de um alerta da própria máquina de corte, que a cartela está sendo finalizada no decorrer da ordem e o operador pode se antecipar e parar a máquina pouco antes do final da cartela para facilitar a emenda.

Formas muito semelhante ao fator C, segundo os especialistas, podem ser utilizadas para levar o tempo do fator D, tempo de troca no término da MP2, também ao nível (-). Porém, vale salientar que essa matéria-prima é armazenada em barricas e o dispositivo deve ser específico para este fim, além de que anotar corretamente a metragem de matéria-prima utilizada pode facilitar o alerta da máquina de que o material vai acabar e o operador pode se antecipar, evitando que a ponta final do material da primeira barrica entre na máquina, o que dificultaria a emenda mesmo com um dispositivo para tal.

O fator E, parada devida a problemas com ferramental durante a corrida da ordem, também pode ser levado ao nível (-) através de uma melhor avaliação do desgaste natural do ferramental com estudos mais detalhados do mesmo, para que os ajustes necessários durante a operação por variação nas dimensões do produto sejam mínimos. Também é necessário intensificar a manutenção preventiva dos apoios dos ferramentais nas máquinas, de forma a evitar que desgastes e vibração possam causar variação nas dimensões dos mesmos.

Para o fator F, os especialistas da empresa afirmam que a redução do tempo de abastecimento para atingir o nível (-) é possível, melhorando-se o trajeto do abastecedor de matéria-prima, além de uma melhor organização do material no ponto de armazenagem e nas proximidades das máquinas. Isto, evita compras desnecessárias emergenciais e/ou a perda de tempo com a procura de materiais perdidos, ou ainda o uso de outro material equivalente sem necessidade. Há a necessidade, ainda, que a liderança da área enfatize aos abastecedores, armazenadores e operadores, a importância da organização das áreas, para que não ocorram perdas de produção por erros internos devido à falta de abastecimento de matéria-prima.

Após descrever as ações necessárias para redução dos tempos de parada dos seis fatores, os especialistas, enumeram as melhorias necessárias em um *ranking*, apresentado no Quadro 3.2, em grau crescente de dificuldade de implantação, segundo a experiência e estudos dos especialistas da referida empresa:

Quadro 3.2- *Ranking* de dificuldade na implantação de melhorias para atingir o nível (-)

Item	Melhorias	Fator Afetado
1	Treinar abastecedores, armazenadores e operadores acerca da importância da organização das áreas de trabalho e pontos de coleta de matéria-prima.	F
2	Treinamento do operador para anotar corretamente o consumo de MP1 na cartela.	C
3	Treinamento do operador para anotar corretamente o consumo de MP2 na barrica.	D
4	Reduzir os desperdícios de tempo no trajeto do abastecedor de matérias-primas.	F
5	Treinamento intensificado dos técnicos de manutenção.	B
6	Melhoria das manutenções preventivas.	B
7	Intensificar a manutenção preventiva dos ferramentais e seus apoios nas máquinas.	E
8	<i>Pit stop</i> na troca de ferramentas.	A
9	Apontamento eletrônico com ajuste automático de parâmetros nas máquinas.	A
10	Sistema de alerta de término de MP2 durante a corrida da ordem.	D
11	Sistema de alerta de término de MP1 durante a corrida da ordem.	C
12	Implantação de dispositivo para emenda no fim da MP1 quando ocorrer o término da mesma.	C
13	Instalação de dispositivo para emenda no fim da MP2 quando no término da mesma.	D
14	Auxílio de operador externo para trocar a MP1.	C
15	Auxílio de operador externo para trocar a MP2.	D

O *ranking* visto no Quadro 3.2, considerando o item onde se encontram as melhorias e o fator afetado, é possível fazer algumas considerações sobre quais fatores são facilmente melhorados e os que não são. Desta forma, o Quadro 3.2 mostra que as melhorias nos fatores F, E e B, nessa ordem, são as de maior facilidade de implantação, seguidas pelo fator A, que apresenta um nível médio de dificuldade de implantação das melhorias. E por último, os fatores C e D, também nessa ordem, requerem um maior desafio nas implantações, já que necessitam de quatro melhorias cada um e a maioria dessas encontram-se nas últimas posições do *ranking* de dificuldade de implantação.

Sendo assim, a gerência pode utilizar tais informações em conjunto com os experimentos como suporte à decisão, suporte esse que pode direcionar corretamente o investimento em recursos humanos e/ou financeiros e propiciar um retorno mais rápido e satisfatório.

3.1.3.2 Execução dos experimentos

Após serem definidas, no item anterior, as respostas esperadas para o experimento (Total Produzido e DO), bem como os respectivos fatores e seus níveis, foi gerada uma matriz experimental. Tal matriz é composta por seis fatores (seis tipos de paradas não programadas) e dois níveis (nível + e nível -), totalizando 64 experimentos que foram replicados 5 vezes cada, considerando um turno de produção. Para tais experimentos foi considerada uma matriz experimental do tipo 2^k , onde k é o número de fatores. O planejamento fatorial completo foi escolhido, pois considera o efeito de todos os fatores e das interações de todas as ordens (MONTGOMERY, 2005). O número de replicações do modelo de simulação foi o suficiente para um poder do teste acima de 90%, tanto para Total Produzido quanto para DO. Segundo Montgomery e Runger (2011), o poder de um teste estatístico é a probabilidade de rejeitar corretamente uma hipótese nula falsa. Se esse valor de poder for considerado muito baixo, o analista poderá aumentar tanto o nível de significância (α) quanto o tamanho n da amostra (Montgomery e Runger, 2011). Nesse caso, como o poder do teste é relativamente alto, o número de replicações foi considerado satisfatório.

Assim, as duas matrizes experimentais foram criadas, sendo uma para o Total Produzido e outra para a DO. Os 320 dados do experimento estão representados no APÊNDICE A - Resultados replicados na matriz experimental para o Total Produzido, considerando a primeira resposta como Total Produzido, dada em número de peças por turno considerando o somatório das oito máquinas de corte em um dia.

Da mesma forma, no APÊNDICE B - Resultados replicados na matriz experimental para a DO, considera a resposta agora como sendo o indicador DO, também para as oito máquinas de corte em um turno de um dia produção, para os mesmos fatores, níveis e número de réplicas.

Com as matrizes de experimentos prontas para as duas respostas, tem-se na sequência a análise estatística das mesmas.

3.1.3.3 Análise estatística

Essa etapa se inicia com a validação dos resíduos dos experimentos, para a qual se utilizou o software Minitab[®]. Segundo Montgomery (2005), os resíduos encontrados nos experimentos realizados deveriam ter uma distribuição normal e ser independentes entre si. Para Costa (2010), com o teste de normalidade é possível verificar se os dados aderem a uma distribuição normal, tanto pela visualização de como os pontos de aproximam da linha reta e através da análise do *P-Value*. Como o valor desse último foi maior que 0,05 e os pontos se

aproximam da reta, pode-se concluir que os resíduos, tanto do Total Produzido como da DO, são normalmente distribuídos, conforme apresentado nas Figura 3.6 e Figura 3.7, respectivamente.

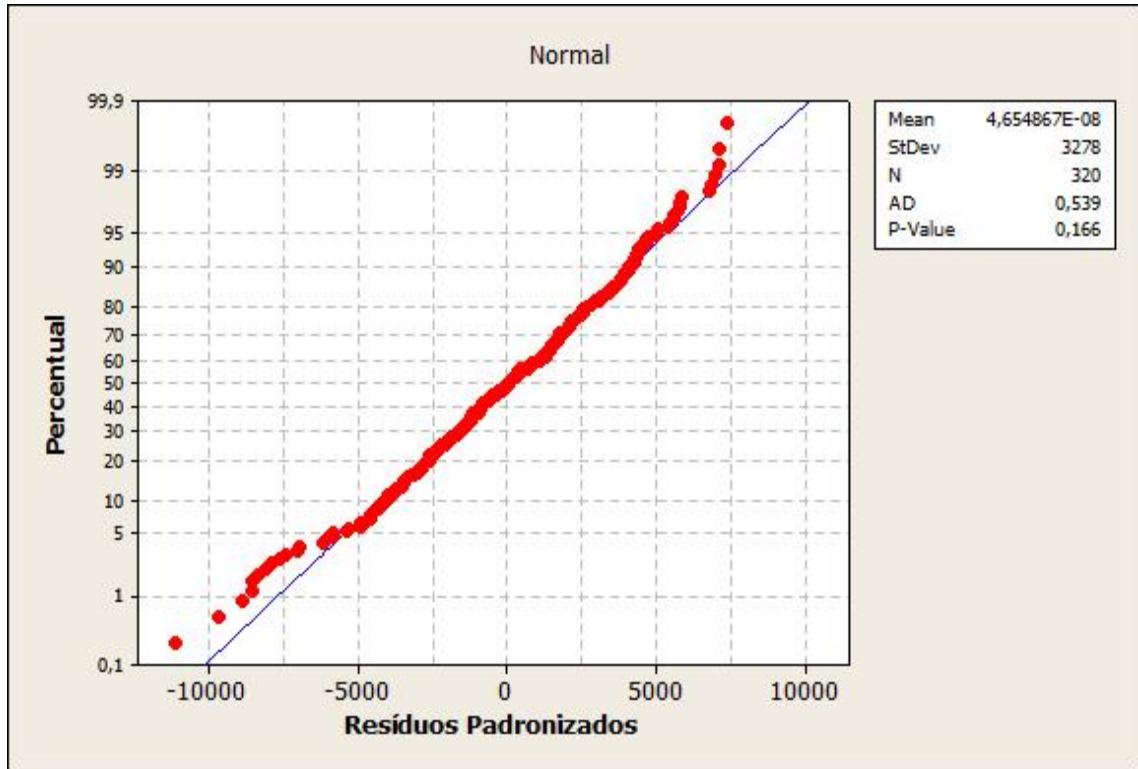


Figura 3.6 - Gráfico de Teste de Normalidade dos resíduos para a saída Total Produzido

As Figura 3.8 e Figura 3.9, mostram a verificação da independência dos resíduos, via carta de controle, para as saídas Total Produzido e DO, respectivamente. Por meio desses gráficos, segundo Costa (2010), é possível verificar que os resíduos não apresentam nenhum padrão não aleatório, agrupamento ou tendência, o que pode ser notado pelos *P-Values* maiores que 0,05 nas Figura 3.8 e Figura 3.9.

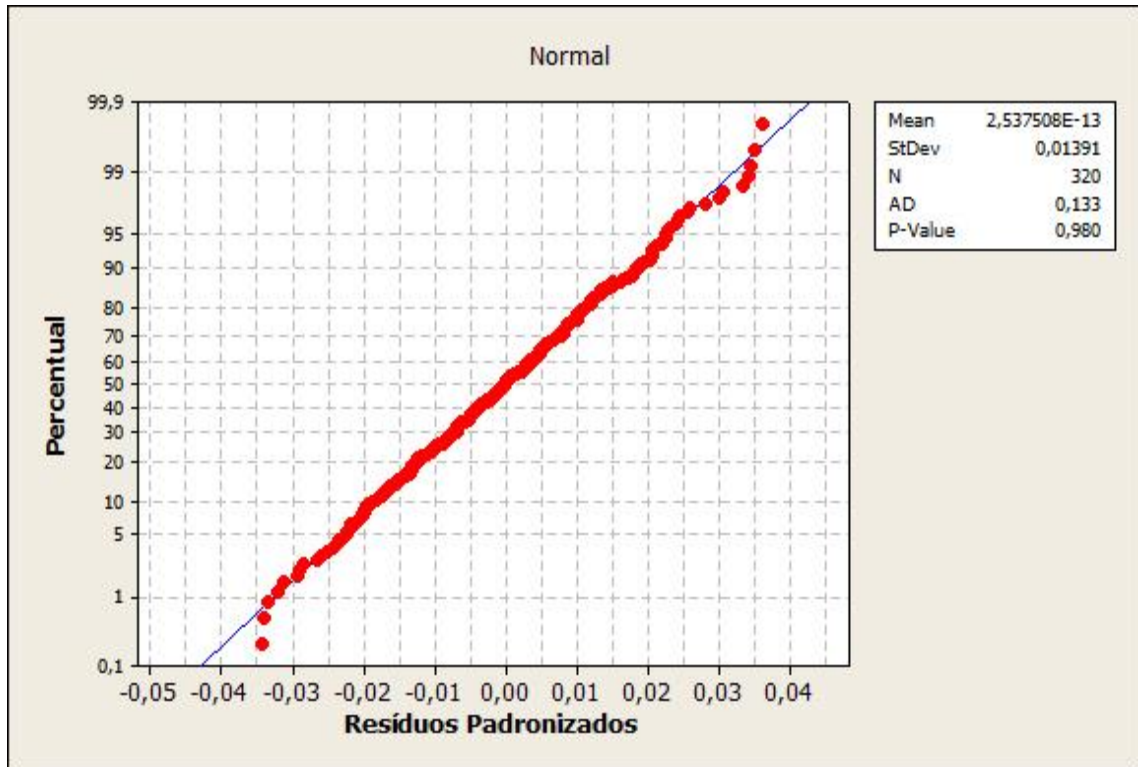


Figura 3.7 - Gráfico de Teste de Normalidade dos resíduos para a saída DO

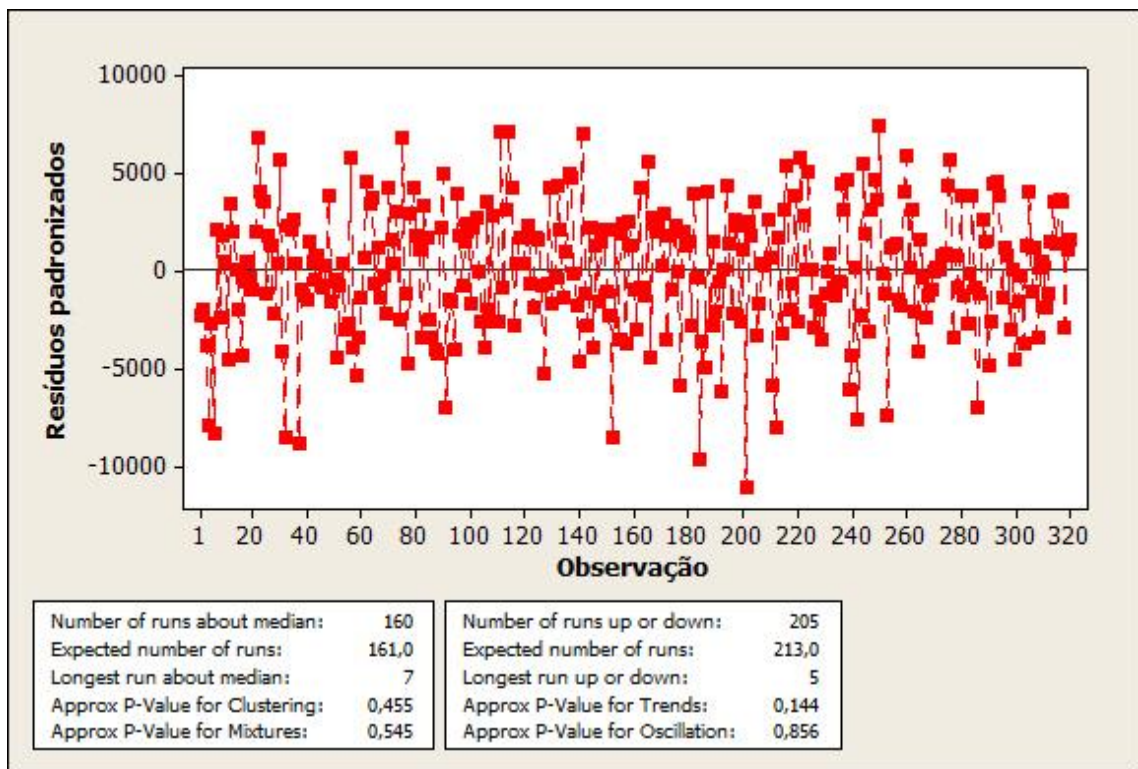


Figura 3.8 - Carta de controle para resíduos padronizados para a saída Total Produzido

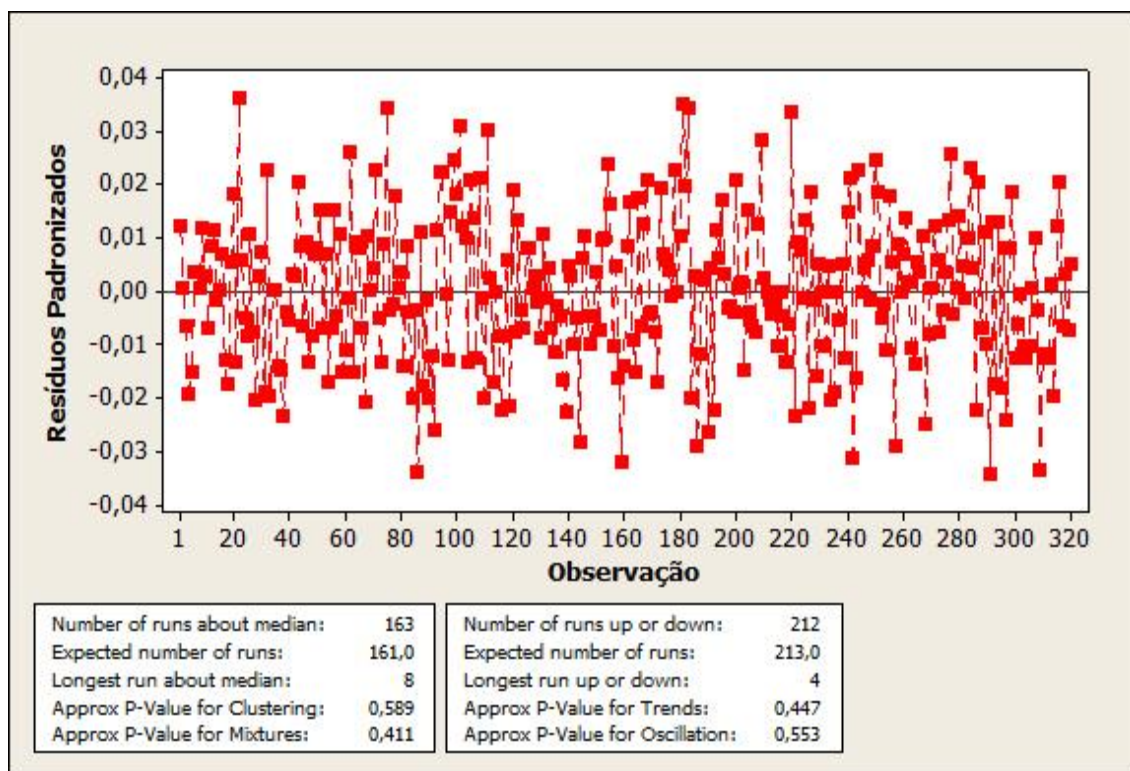


Figura 3.9 - Carta de controle para resíduos padronizados para a saída DO

Para Costa (2010), tendo já verificado a validade dos resíduos, podem-se analisar estatisticamente os resultados do DOE. Tal análise será dividida em duas etapas: uma para a resposta Total produzido por turno e outra para a DO.

a) Total Produzido

Iniciando com a resposta Total Produzido, a Tabela 3.3 apresenta a análise de variâncias onde nota-se que as interações a partir da 2ª ordem podem ser desconsideradas, pois para Costa (2010) uma vez que o P-Value está acima de 0,05 essas interações não são significativas. Ainda é possível notar que os efeitos principais são todos significativos. Esta informação foi verificada e se encontra no APÊNDICE C - Efeitos Estimados e Coeficientes para o Total Produzido - por meio do qual se pode concluir que dos 64 cenários testados, apenas quatro dos fatores principais são significativos (A, C, D e F) e uma interação de 4ª ordem (BDEF) para 95% de confiança.

A Figura 3.10 traz a análise dos efeitos principais para cada fator, considerando ainda a saída Total Produzido, onde se pode observar o que já era previsto: os efeitos principais, ou seja, os tempos de paradas não programadas, afetam negativamente o Total Produzido da área de corte. Além disso, é possível notar que essa resposta é menos sensível aos tempos de parada “manutenção” (fator B) e “ferramental” (fator E). Tal conclusão pode ser notada na

análise do APÊNDICE C - Efeitos Estimados e Coeficientes para o Total Produzido, mencionado anteriormente, e também na Figura 3.11.

Tabela 3.3 – Análise de variâncias considerando a saída Total Produzido

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Média quadrática	F	P-Value
Efeitos principais	6	35550697185	5925116198	442,41	0,000
Interações de 2ª ordem	15	127235624	8482375	0,63	0,846
Interações de 3ª ordem	20	120619690	6030984	0,45	0,981
Interações de 4ª ordem	15	198395311	13226354	0,99	0,469
Interações de 5ª ordem	6	14003478	2333913	0,17	0,984
Interações de 6ª ordem	1	12667147	12667147	0,95	0,332
Erro residual	256	3428577006	13392879		
Total	319				

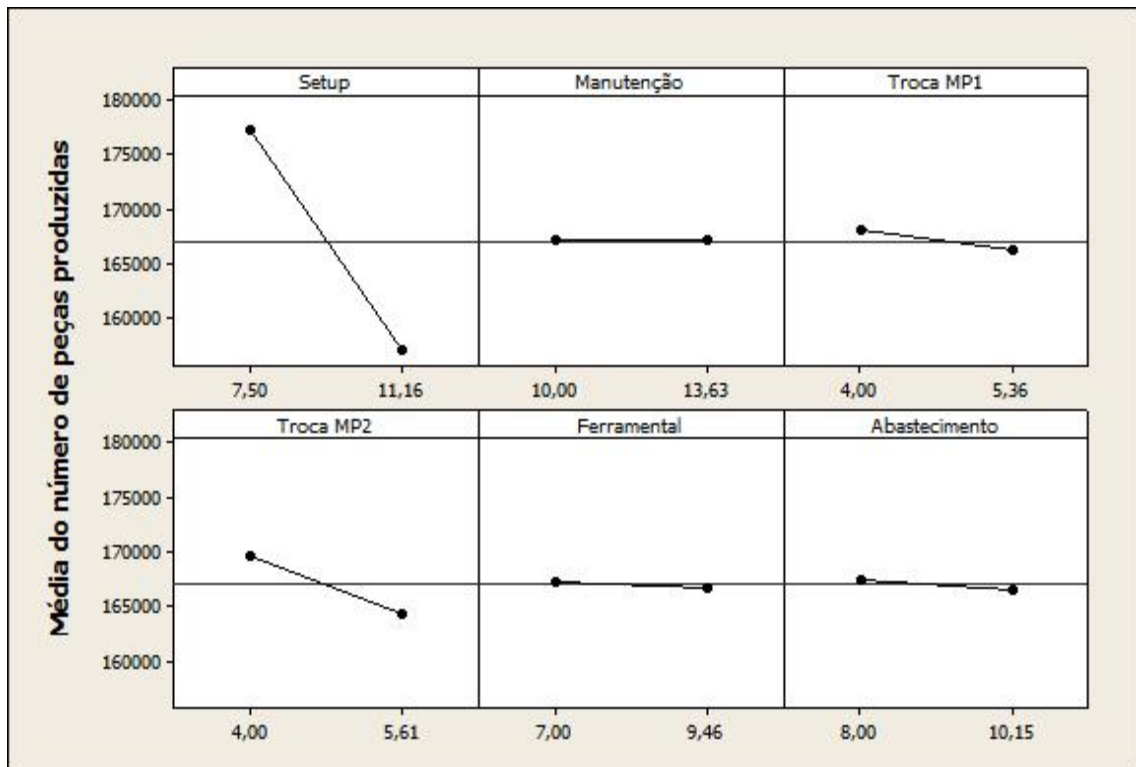


Figura 3.10 - Efeito dos tempos de parada não programadas sobre o Total Produzido da área de corte

No gráfico de Pareto (Figura 3.11), é apresentado o peso dos 30 maiores efeitos dos fatores e suas interações são ordenadas em função do impacto que causam à variável de

resposta Total Produzido. Pela análise desse gráfico é possível notar que nem todos os seis fatores interferem significativamente no Total Produzido em um turno de produção, pois somente os fatores que ultrapassam a linha vertical são considerados significativos. Nota-se que o fator A (tempo de *setup*) é o que possui maior importância relativa sobre essa resposta, seguido pelo fator D (tempo de troca no término da MP2). Logo após tem-se o fator C (tempo de troca no término de MP1) e em quarto lugar, tem-se o fator F (problemas com abastecimento). Enquanto a interação de quarta ordem, BDEF (tempo de manutenção, tempo de troca no término da MP2, problemas com ferramental e problemas com abastecimento) ocupa a quinta colocação em importância relativa ao impacto na variável de resposta. Também pelas análises anteriores os fatores principais B (“manutenção”) e E (“ferramental”), não têm influência significativa sobre o Total Produzido.

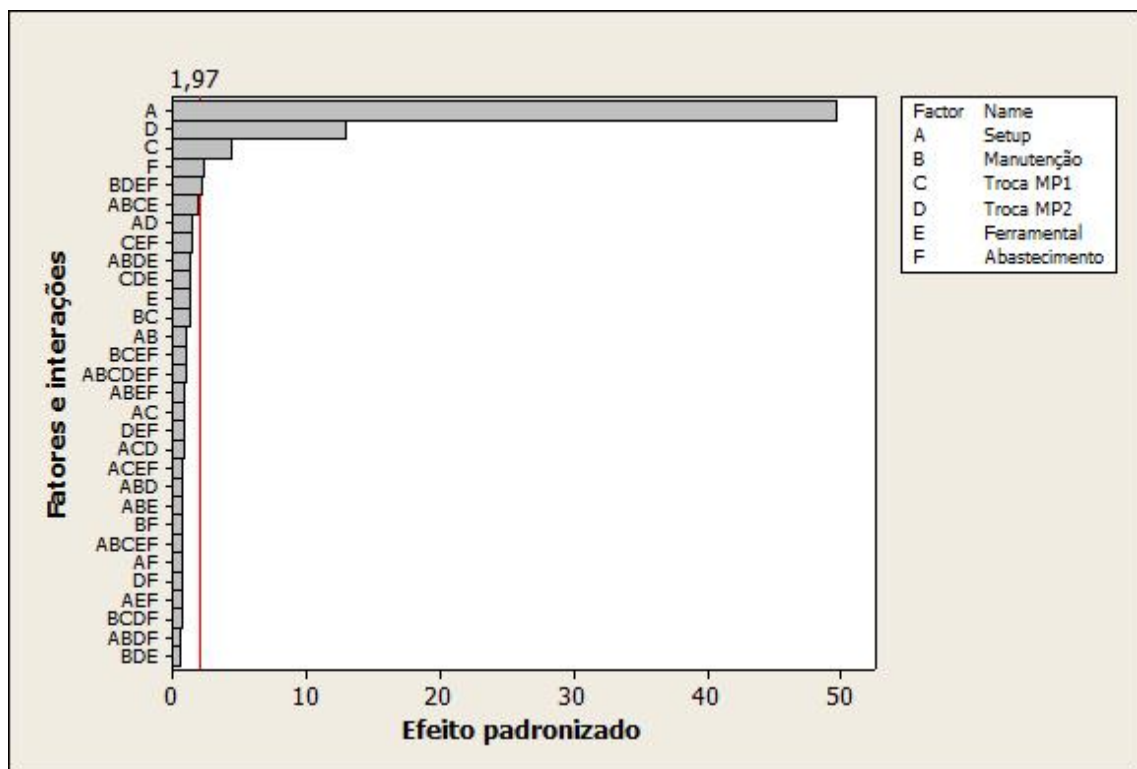


Figura 3.11 - Ordenação dos fatores e interações que mais impactam no Total Produzido da área de corte

Na Tabela 3.4, analisando o experimento 64 da matriz experimental (APÊNDICE A - Resultados replicados na matriz experimental para o Total Produzido) para a resposta Total Produzido, nota-se que, em média, com todos os fatores no nível (+) (estado atual), o Total Produzido é 153719 peças por turno. Enquanto que para o experimento 1 (APÊNDICE A - Resultados replicados na matriz experimental para o Total Produzido), com todos os fatores no nível (-), que se refere ao estado de melhoria para todos os fatores, na média, o Total

Produzido é 181834 peças por turno, que em valores percentuais corresponde a um aumento médio na capacidade produtiva da área de 18,3% por turno.

Tabela 3.4 – Comparativo entre o Total Produzido atual e no caso da melhoria de todos os fatores

Experimentos	Média	Desvio Padrão	Fatores						Intervalo de Confiança da Média
			A	B	C	D	E	F	
64	153719	3759	+	+	+	+	+	+	[149051; 158387]
1	181834	2567	-	-	-	-	-	-	[178647; 185021]

Na Tabela 3.5, dado que o fator A (tempo de setup) é o que mais impacta o Total Produzido, conforme apresentado na Figura 3.11, toma-se na matriz experimental (APÊNDICE A - Resultados replicados na matriz experimental para o Total Produzido) o experimento 63 no qual somente o fator A está no estado de melhoria (nível -) e os demais fatores se mantêm no seu estado atual (nível +), na média, o Total Produzido é 172043 peças por turno, que em valores percentuais corresponde a um aumento médio na capacidade produtiva da área, também por turno, de 11,9%, apenas investindo na redução do tempo de *setup*.

Tabela 3.5 – Comparativo entre o Total Produzido atual e no caso de melhoria do fator A

Experimentos	Média	Desvio Padrão	Fatores						Intervalo de Confiança da Média
			A	B	C	D	E	F	
64	153719	3759	+	+	+	+	+	+	[149051; 158387]
63	172043	3267	-	+	+	+	+	+	[167987; 176100]

b) DO

Agora considerando a resposta DO, tendo já verificada a validade dos resíduos, pode-se analisar estatisticamente os resultados do DOE, na mesma sequência realizada para o Total Produzido.

Dessa forma, a Tabela 3.6 apresenta a análise de variâncias, na qual nota-se que as interações de 2^a, 4^a e 6^a ordem podem ser desconsideradas, pois como afirmado anteriormente, uma vez que o *P-Value* está acima de 0,05, essas interações não são significativas. Ainda é possível notar que os efeitos principais são todos significativos. Esta informação foi verificada e se encontra no APÊNDICE D - Efeitos Estimados e Coeficientes para a DO - por meio do

qual se pode concluir que dos 64 cenários testados, apenas nove são significativos, para 95% de confiança, aqui englobando os seis fatores principais (destaque para A, C, D e E, com *P-value* iguais à zero) e algumas interações de 3ª e 5ª ordens. Os fatores B e F, por sua vez, apresentaram *P-value* menores que 0,05, mas um pouco maiores que os demais efeitos principais.

Na Figura 3.12 observa-se a análise dos efeitos principais para cada fator, considerando a saída DO, onde ocorre o que já era esperado, da mesma forma que para o Total produzido: os efeitos principais, ou seja, os tempos de paradas não programadas, afetam negativamente a DO da área de corte. Além disso, é possível notar que os tempos de parada “manutenção” (fator B) e “abastecimento” (fator F) afetam a DO em menores proporções, quando comparados aos outros tipos de paradas. Tal conclusão pode ser observada tanto no APÊNDICE D - Efeitos Estimados e Coeficientes para a DO quanto na Figura 3.13.

Tabela 3.6 – Análise de variâncias considerando a saída DO

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Média quadrática	F	<i>P-Value</i>
Efeitos principais	6	0,875949	0,145991	605,69	0,000
Interações de 2ª ordem	15	0,004478	0,000299	1,24	0,243
Interações de 3ª ordem	20	0,007998	0,000400	1,66	0,040
Interações de 4ª ordem	15	0,004585	0,000306	1,27	0,222
Interações de 5ª ordem	6	0,003565	0,000594	2,46	0,025
Interações de 6ª ordem	1	0,000603	0,000603	2,50	0,115
Erro residual	256	0,061705	0,000241		
Total	319				

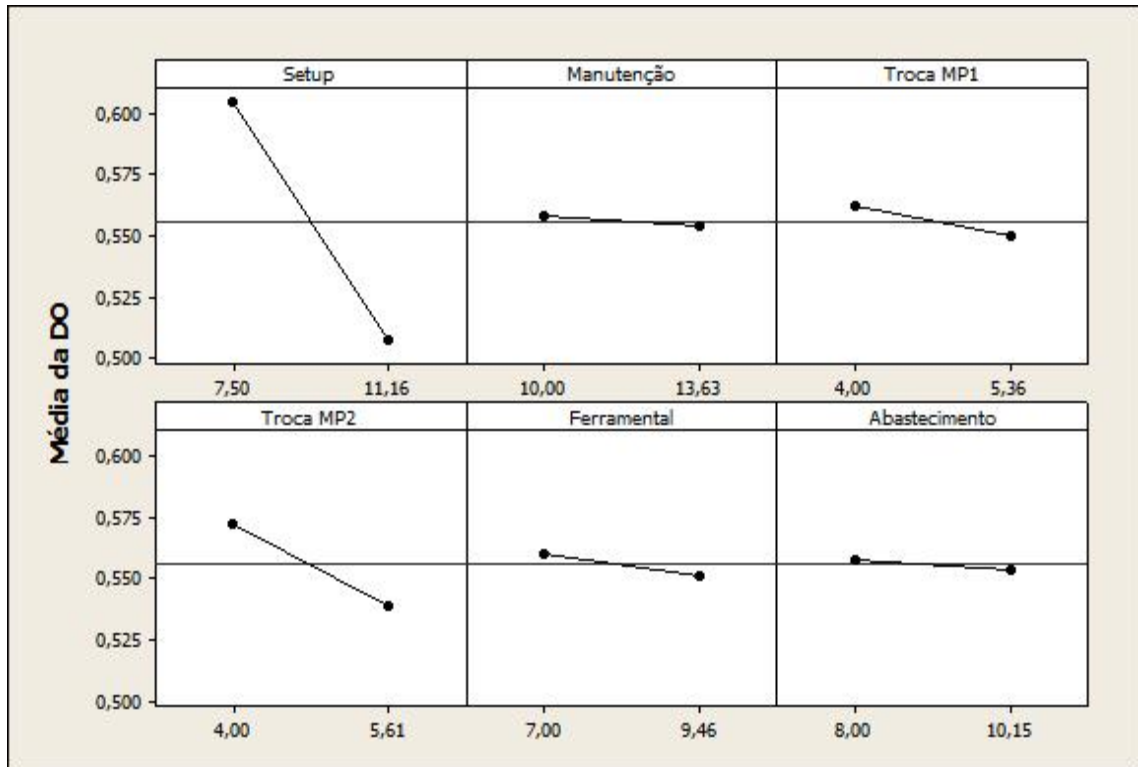


Figura 3.12 - Efeito dos tempos de parada não programadas sobre a DO da área de corte

Na Figura 3.13, tem-se o gráfico de Pareto com o peso dos 30 maiores efeitos dos fatores e suas interações, sendo que eles estão ordenados em função do impacto que causam na variável de resposta DO. Analisando-o e tendo como base a linha vertical, é possível notar que os seis fatores possuem efeitos significativos na DO das oito máquinas de corte, em um turno de produção. Nota-se que o fator A (tempo de *setup*) é o que possui maior importância relativa sobre a saída DO, o que confirma a afirmação de Ruiz-Torres e Mahmood (2008), de que o desempenho de sistemas celulares flexíveis tende a cair rapidamente conforme aumenta o tempo de *setup*, o que se aplica às máquinas de corte. Na sequência vêm, os fatores D (tempo de troca no término da MP2), C (tempo de troca no término de MP1) e o fator E (problemas com ferramental), nessa ordem, enquanto a interação de terceira ordem, BDE (tempo de manutenção, tempo de troca no término da MP2 e problemas com ferramental), ocupa a quinta colocação em importância relativa. Vale destacar que, pelas análises anteriores, apenas algumas interações de terceira e quinta ordem são significativas e percebe-se que os fatores B e F têm menos impacto sobre a DO, quando comparados aos demais efeitos principais.

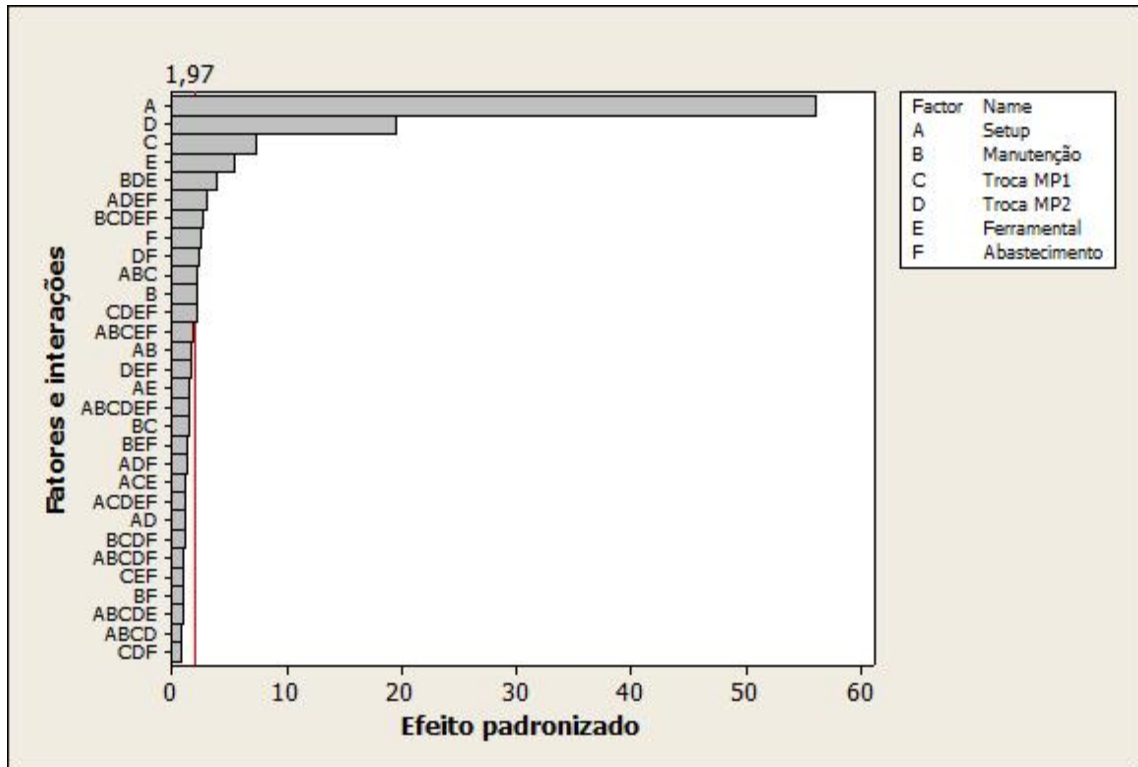


Figura 3.13 - Ordenação dos fatores e interações que mais impactam na DO da área de corte

Na Tabela 3.7, para a resposta DO, considerando o experimento 64 da matriz experimental (APÊNDICE B - Resultados replicados na matriz experimental para a DO), nota-se que, em média, com todos os fatores no nível (+) - estado atual -, a DO é de 47%, enquanto que para o experimento 1, com todos os fatores no nível (-) - estado de melhoria em todos os seis fatores -, na média, a DO seria de 65%, o que corresponderia a um aumento médio de 38,3% no indicador.

Tabela 3.7 – Comparativo entre a DO atual e no caso de melhoria de todos os fatores

Experimentos	Média	Desvio Padrão	Fatores						Intervalo de Confiança da Média
			A	B	C	D	E	F	
64	0,47	0,01	+	+	+	+	+	+	[0,46; 0,49]
1	0,65	0,02	-	-	-	-	-	-	[0,63; 0,67]

Na Tabela 3.8, dado que o fator A (tempo de *setup*), também nesse caso, é o que mais impacta a DO, conforme apresentado na Figura 3.13, toma-se então o experimento 63, onde somente o fator A está no nível (-) e os demais se mantêm no seu estado atual (nível +). Nessa situação, é possível alcançar uma DO média de 57%, o que em termos percentuais significaria

um aumento médio de 21,3% no indicador, apenas investindo-se na redução do tempo de *setup*.

Tabela 3.8 – Comparativo entre a DO atual e no caso de melhoria do fator A

Experimentos	Média	Desvio Padrão	Fatores						Intervalo de Confiança da Média
			A	B	C	D	E	F	
64	0,47	0,01	+	+	+	+	+	+	[0,46; 0,49]
63	0,57	0,02	-	+	+	+	+	+	[0,55; 0,59]

c) Otimização

Nessa etapa pode-se utilizar uma ferramenta de otimização, a Função Desejabilidade, que possibilita analisar se as metas estabelecidas, pela gerência da empresa em questão, para as variáveis de resposta Total Produzido e a DO são possíveis de serem alcançadas e direcionar políticas de redução da duração das paradas não programadas.

Utilizando-se inicialmente a Função Desejabilidade, via Minitab[®], encontram-se os valores apresentados na Tabela 3.9, que correspondem a todos os fatores no nível (+) e nível (-) para as variáveis de resposta Total Produzido e DO. Nota-se que as respostas são muito próximas ou idênticas aos valores médios encontrados utilizando apenas o DOE e a SED, no item anterior.

Ainda utilizando-se a Função Desejabilidade, porém agora para analisar se é possível atingir metas estabelecidas pela empresa para as variáveis de resposta simultaneamente, utilizando os seis fatores apresentados. As metas foram calculadas pela empresa com o intuito de atender a uma previsão de aumento de demanda para o próximo semestre, chegando-se aos alvos de 170000 peças/turno para Total Produzido e 60% para a DO.

Tabela 3.9 – Resultados da Função Desejabilidade para variáveis de resposta, considerando nível (+) e (-) para os todos os fatores

Variáveis de Resposta	Nível (+)	Nível (-)	Unidades
Total Produzido	152208	181834	Peças/turno
DO	47	65	%

Empregando-se a Função Desejabilidade para tais alvos, os resultados encontrados são apresentados na Tabela 3.10. Nota-se que o Total Produzido encontrado supera a meta,

enquanto a DO encontrada não atinge a meta estabelecida. Entretanto, é importante ter consciência que não é sempre que se pode atingir dois alvos simultâneos, o que leva a conclusão de que para a meta de Total Produzido estipulada pela empresa, não é necessário que o DO atinja 60%. O que vem confirmar a afirmação de Sharma, Shudhanshu e Bhardwaj (2012) que o volume de produção desejado será alcançado através da alta DO, que por sua vez é influenciada pela confiabilidade de equipamentos e manutenção. No tocante às soluções encontradas para as variáveis de resposta, é necessário que os fatores atinjam os tempos mostrados Tabela 3.11.

Tabela 3.10 – Soluções encontradas para ambas as variáveis de resposta utilizando Função Desejabilidade

Variáveis de Resposta	Alvos	Solução Encontrada	Unidades
Total Produzido	170000	170033	Peças/turno
DO	60	58,8	%

Na Tabela 3.11, para ambas as soluções encontradas da Tabela 3.10, o fator F permanece no nível (+), os fatores B, D, E e F devem estar no nível (-) e o fator A sofre pequenas reduções de tempo em relação ao estado atual.

Tabela 3.11 – Tempo de duração dos fatores para atingir as soluções encontradas no Função Desejabilidade para ambas variáveis de resposta

Fatores	Tempo necessário aos fatores para atingir a meta para cada variável de resposta (min)
A (<i>setup</i>)	9,61
B (manutenção)	10
C (troca MP1)	4
D (troca MP2)	4
E (ferramental)	7
F (abastecimento)	10,15

Com o intuito de testar os valores encontrados pela Função Desejabilidade (Tabela 3.10), os tempos de paradas não programadas (Tabela 3.11) foram inseridos no modelo de

simulação e o mesmo foi rodado em um total de 5 réplicas em um turno de produção. O resultado final é apresentado na Tabela 3.12, considerando um nível de confiança de 95%.

Tabela 3.12 – Resultado da simulação para os parâmetros de otimização

Variáveis de Resposta	Média	Desvio Padrão	Intervalo de Confiança da Média
Total Produzido	169846	3304	[165744; 173948]
DO	0,57	0,01	[0,56; 0,58]

O resultado alcançado pela DO, utilizando o modelo de simulação, diverge do encontrado com a Função Desejabilidade, pois esse método utiliza a interpolação entre os valores dos níveis (+) e (-), já no modelo de simulação os resultados levam em consideração a característica estocástica dos fatores envolvidos.

3.2 Considerações finais

Este capítulo apresentou a aplicação do método de SED associado ao DOE e a Função Desejabilidade em uma área de corte de uma empresa de autopeças, com o intuito de apoio à tomada de decisão dessa área.

4 CONCLUSÕES

Nesse trabalho, foi possível perceber a importância do uso da SED na tomada de decisão. A SED também permitiu e tornou viável a análise de um sistema complexo (a área de corte), que envolvia variáveis estocásticas, dinâmicas e interdependentes, o que dificulta a utilização direta de soluções algébricas, além de ter a grande vantagem de não necessitar que o sistema real seja alterado para que seja realizada a avaliação do sistema de produção.

A SED pôde ser combinada ao projeto de experimentos (DOE), o que resultou na hierarquização dos tempos de paradas não programadas (fatores) do objeto de estudo, por meio da determinação da magnitude dos efeitos nas variáveis de resposta Total Produzido e DO. Essa hierarquização se deu a partir da medição das variáveis de resposta desejadas, através do estabelecimento de cenários experimentais no modelo de simulação, no qual os fatores são controláveis e podem ser analisados segundo a técnica do DOE. Além disso, a técnica DOE permite analisar possíveis interações entre os fatores e suas consequências nas variáveis de resposta. Assim, os experimentos apresentados no Capítulo 3 deste trabalho não poderiam ser realizados no ambiente real, pois haveria necessidade de parar as oito máquinas de corte em horário produtivo, o que seria indesejável, improdutivo e de alto custo para a empresa. Então, foi possível prever, em ambiente simulado, quais fatores terão maior impacto nas variáveis de resposta (DO e Total Produzido), auxiliando na tomada de decisão no direcionamento dos investimentos em melhorias.

No tocante aos gráficos de Pareto, apresentados também no Capítulo 3 (Figura 3.11 e Figura 3.13), pôde-se notar que em algumas situações os fatores podem interagir, o que não é fácil de ser identificado apenas com base na opinião dos especialistas do processo ou por observações da área de corte durante a produção. Por consequência, tais situações podem acabar sendo ignoradas.

A dificuldade se torna ainda maior quando se tem o intuito de observar o efeito dessas interações nas variáveis de resposta. No caso da variável de resposta Total Produzido, como apresentado no trabalho, essa interação é pouco relevante, pois apenas uma interação de quarta ordem é significativa, ao passo que, para a DO, uma maior diversidade de interações dos fatores, incluindo as de terceira ordem, são significativas. Desta maneira, conhecendo-se o efeito significativo da interação dos fatores, se faz necessário tomar ações preventivas para estas paradas: se uma máquina da área de corte estiver sob efeito de uma destas paradas, deve-se evitar que outra máquina também pare no mesmo momento, o que aumentaria ainda mais o impacto negativo sobre a produção da área.

Nessa etapa do estudo, foi possível notar ainda que com todos os fatores no nível (-), máximo estado de melhoria, é possível um aumento médio do Total Produzido e da DO de 18,3 % e 38,3%, respectivamente. Assim, a gerência poderá estabelecer novos níveis (-) ou manter os atuais para os fatores no semestre seguinte, de forma a obter ganhos ainda mais expressivos nas variáveis de resposta.

Também se conclui que se apenas o fator A (tempo de *setup*) for melhorado, sendo esse o fator que causa o maior impacto em ambas as variáveis de resposta, é possível atingir um aumento médio de 11,9% e 21,3%, no Total Produzido e na DO, respectivamente. Assim, apenas priorizando a melhoria do tempo do fator A, pode-se alcançar um resultado expressivo, em um espaço curto de tempo, sem a necessidade de investir em melhorias do tempo de todas as paradas, ao menos em um primeiro momento.

A integração das duas técnicas (SED e DOE) revelou-se eficiente e eficaz no auxílio à gestão, aumentando a gama de possibilidades de tomada de decisão. Estas técnicas podem ser combinadas com ferramentas de otimização, tais como a Função Desejabilidade, por meio da qual foi possível avaliar se as metas estabelecidas para as variáveis de resposta eram possíveis de serem alcançadas simultaneamente, bem como encontrar soluções relativas à duração das paradas que possibilitassem o alcance desses alvos. Sendo assim, nesse trabalho foi possível verificar que a meta de DO estabelecida pela gerência não pode ser atingida simultaneamente à meta do Total Produzido por turno. Para que se atinja a meta estabelecida para este último, não é necessário atingir 60% para a DO. Entretanto, se as metas não fossem simultâneas, ambas poderiam ser atingidas, pois como pode ser notado na Tabela 3.9, com todos os fatores no nível (-), os valores médios encontrados para a DO e o Total Produzido são superiores às metas estabelecidas pela empresa.

Na visão dos gestores, os resultados obtidos com a integração das ferramentas SED, DOE e Função Desejabilidade não poderiam ser obtidos com as ferramentas utilizadas anteriormente pela empresa. Conforme citado anteriormente, a empresa direcionava as melhorias para as paradas de maior ocorrência. Entretanto, é possível notar na Figura 3.2 que a troca de MP1 é a segunda parada não programada em número de ocorrências na máquina, mas se observarmos os Paretos do capítulo 3 (Figura 3.11 e Figura 3.13), nota-se que esta parada é a terceira no impacto no Total Produzido e na DO. Isto quer dizer que a empresa estava direcionando esforços em melhorias de maneira equivocada, pois deveria ser a troca de MP2 o foco das atenções, após tratar o *setup*. Com a hierarquização das paradas através da integração da SED e do DOE é possível focar esforços nas variáveis na ordem de impacto nos resultados, levando-se em conta o *ranking* de dificuldade de implantação de melhorias

apresentado no Quadro 3.2. Além disso, é possível perceber interações entre tipos específicos de paradas que causam impacto negativo nas variáveis de resposta, que era impossível de prever em um ambiente dinâmico, apenas trabalhando com os dados históricos. Outra questão é que não se sabia quanto melhorar na duração das paradas para atingir as metas estabelecidas pela empresa e se estas poderiam ser atingidas. Neste caso a Função Desejabilidade, integrada as outras duas ferramentas mostrou a resposta. E isto tudo pode ser obtido sem a necessidade de parar a produção. E ainda, o modelo de simulação, o DOE e a Função Desejabilidade poderão ser utilizado para análises futuras.

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se a utilização desse modelo para avaliar metas individuais ou simultâneas para outros indicadores, como OEE, WIP (*Working in Process*), MTTR (*Mean Time To Repair*), MTBF (*Mean Time Between Failure*), MTTF (*Mean Time To Failure*) e FIT (*Failure In Time*), dentre outros de interesse para a companhia, bem como aplicar a junção dessas ferramentas para outros objetos de estudo. Por fim, recomenda-se utilizar as informações geradas neste estudo, implantá-las no sistema real e, a partir disso, realizar uma nova coleta de dados, a fim de verificar a variabilidade da duração dos tempos de parada após as melhorias.

APÊNDICE A - Resultados replicados na matriz experimental para o Total Produzido

Tabela A - Resultados replicados na matriz experimental para o Total Produzido

Exp	Fatores						Réplicas (peças)				
	A	B	C	D	E	F	R1	R2	R3	R4	R5
1	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	179512	181221	186126	181946	180367
2	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	159940	163097	160247	166313	160162
3	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	177373	179807	180788	182579	185252
4	(+)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	152585	160210	164831	158292	166328
5	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	178271	178713	183021	183514	181071
6	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	149506	162059	156496	160083	160961
7	(-)	(+)	(+)	(-)	(-)	(-)	181722	181227	180562	177066	177536
8	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)	(-)	156368	159161	163756	159815	154669
9	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)	175212	176443	178175	162388	175066
10	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)	156478	153500	155939	158580	155666
11	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	173610	184981	176326	179967	175805
12	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	158985	154480	151007	159146	154356
13	(-)	(-)	(+)	(+)	(-)	(-)	175733	169000	180674	170419	172770
14	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(-)	153735	156593	152528	152035	153695
15	(-)	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)	173177	179419	172332	175557	175349
16	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)	151286	157357	157732	155822	155618
17	(-)	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)	180434	182115	177032	183612	181745
18	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)	160847	156940	161656	161058	161284
19	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	180106	183706	178897	174598	184793
20	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	160823	163453	163280	153720	167445
21	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	180023	175541	180097	179684	174576
22	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	164934	154738	157153	155014	158977
23	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	183875	175835	177587	183001	179046
24	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	162791	155092	150813	164717	163109
25	(-)	(-)	(-)	(+)	(+)	(-)	176620	179989	179957	175873	176566
26	(+)	(-)	(-)	(+)	(+)	(-)	158138	161388	152903	155765	153696
27	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	174334	166044	174964	176864	172915
28	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	155800	156551	160366	155415	161870
29	(-)	(-)	(+)	(+)	(+)	(-)	174124	172170	170017	179506	172874

Tabela A - Resultados replicados na matriz experimental para o Total Produzido (Cont.)

Exp	Fatores						Réplicas (peças)				
	A	B	C	D	E	F	R1	R2	R3	R4	R5
30	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(-)	159543	149852	156475	156709	146985
31	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	169094	177195	174569	173278	172089
32	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	144919	155178	152509	158462	156005
33	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(+)	184049	180973	178770	181793	183237
34	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	(+)	163488	162861	165596	158474	156528
35	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)	182710	182583	179314	178523	177539
36	(+)	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)	161521	159455	159879	159146	165528
37	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)	171208	182262	185648	176535	184589
38	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)	153820	157492	150343	153589	158661
39	(-)	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)	176852	178094	180797	178008	176687
40	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)	156984	155847	160374	159251	159580
41	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)	177562	172112	178603	175193	176889
42	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)	157507	160580	157292	155848	154118
43	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	173643	172195	177021	173570	174219
44	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	154725	156723	150437	158351	149392
45	(-)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	172569	170716	175043	176365	171697
46	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	152010	150318	151957	157566	152648
47	(-)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	174746	181561	176756	168436	170720
48	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	157866	153163	154030	149727	155322
49	(-)	(-)	(-)	(-)	(+)	(+)	179586	184245	175275	181290	185186
50	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)	(+)	158037	165609	160524	150871	157381
51	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)	(+)	174263	183032	180070	176413	179904
52	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)	(+)	158267	156256	160514	164527	155662
53	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	181201	181211	178101	182734	181000
54	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	156014	160760	162986	155944	159526
55	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	176862	181222	179258	182703	177720
56	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	163379	157914	147924	162267	156413
57	(-)	(-)	(-)	(+)	(+)	(+)	170272	176484	170497	177799	175630
58	(+)	(-)	(-)	(+)	(+)	(+)	147872	152546	148321	160620	156764
59	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	170832	172276	178251	174048	175555
60	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	152467	155596	151037	152711	157557
61	(-)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	172223	173125	173005	164123	175013
62	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	156732	151412	150125	153420	149349
63	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	175475	166785	171459	173325	173173
64	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	157474	153106	147589	155129	155297

APÊNDICE B - Resultados replicados na matriz experimental para a DO

Tabela B - Resultados replicados na matriz experimental para a DO

Exp	Fatores						Réplicas				
	A	B	C	D	E	F	R1	R2	R3	R4	R5
1	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	0,66	0,66	0,65	0,66	0,62
2	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	0,53	0,52	0,52	0,54	0,54
3	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	0,62	0,61	0,64	0,64	0,63
4	(+)	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	0,51	0,54	0,53	0,53	0,54
5	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	0,61	0,63	0,63	0,62	0,64
6	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	0,53	0,53	0,52	0,53	0,53
7	(-)	(+)	(+)	(-)	(-)	(-)	0,63	0,65	0,62	0,62	0,62
8	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)	(-)	0,51	0,50	0,51	0,53	0,49
9	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)	0,61	0,58	0,59	0,60	0,60
10	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)	0,51	0,52	0,49	0,51	0,51
11	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	0,59	0,63	0,57	0,58	0,61
12	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	0,52	0,50	0,51	0,52	0,48
13	(-)	(-)	(+)	(+)	(-)	(-)	0,58	0,57	0,58	0,57	0,57
14	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(-)	0,49	0,51	0,48	0,49	0,49
15	(-)	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)	0,59	0,59	0,59	0,58	0,60
16	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)	0,50	0,50	0,47	0,51	0,50
17	(-)	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)	0,62	0,62	0,64	0,66	0,62
18	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)	0,52	0,54	0,54	0,54	0,53
19	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	0,63	0,62	0,62	0,63	0,63
20	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	0,54	0,50	0,51	0,52	0,53
21	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	0,59	0,60	0,60	0,60	0,63
22	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	0,54	0,47	0,51	0,50	0,50
23	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	0,61	0,61	0,60	0,59	0,60
24	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	0,51	0,50	0,53	0,52	0,53
25	(-)	(-)	(-)	(+)	(+)	(-)	0,59	0,60	0,61	0,60	0,61
26	(+)	(-)	(-)	(+)	(+)	(-)	0,51	0,48	0,52	0,48	0,49
27	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	0,58	0,58	0,61	0,59	0,60
28	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	0,47	0,46	0,48	0,52	0,51
29	(-)	(-)	(+)	(+)	(+)	(-)	0,60	0,61	0,60	0,57	0,60
30	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(-)	0,51	0,52	0,49	0,51	0,48

Tabela B - Resultados replicados na matriz experimental para a DO (Cont.)

Exp	Fatores						Réplicas				
	A	B	C	D	E	F	R1	R2	R3	R4	R5
31	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	0,56	0,60	0,55	0,59	0,60
32	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	0,50	0,47	0,46	0,47	0,47
33	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(+)	0,62	0,63	0,65	0,65	0,65
34	(+)	(-)	(-)	(-)	(-)	(+)	0,55	0,56	0,57	0,53	0,54
35	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)	0,62	0,64	0,61	0,64	0,58
36	(+)	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)	0,52	0,55	0,52	0,53	0,55
37	(-)	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)	0,60	0,64	0,63	0,60	0,59
38	(+)	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)	0,51	0,54	0,52	0,53	0,54
39	(-)	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)	0,61	0,62	0,62	0,61	0,59
40	(+)	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)	0,51	0,50	0,54	0,51	0,53
41	(-)	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)	0,59	0,61	0,59	0,59	0,57
42	(+)	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)	0,51	0,52	0,50	0,48	0,51
43	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	0,62	0,58	0,59	0,58	0,62
44	(+)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	0,51	0,52	0,48	0,50	0,49
45	(-)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	0,57	0,58	0,60	0,58	0,57
46	(+)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	0,50	0,47	0,49	0,49	0,49
47	(-)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	0,58	0,62	0,60	0,58	0,58
48	(+)	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	0,47	0,49	0,49	0,50	0,47
49	(-)	(-)	(-)	(-)	(+)	(+)	0,63	0,61	0,62	0,64	0,61
50	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)	(+)	0,52	0,51	0,53	0,48	0,51
51	(-)	(+)	(-)	(-)	(+)	(+)	0,64	0,62	0,62	0,61	0,63
52	(+)	(+)	(-)	(-)	(+)	(+)	0,52	0,51	0,54	0,55	0,52
53	(-)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	0,62	0,60	0,64	0,61	0,58
54	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	0,50	0,52	0,54	0,52	0,51
55	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	0,62	0,61	0,66	0,64	0,62
56	(+)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	0,52	0,53	0,49	0,51	0,49
57	(-)	(-)	(-)	(+)	(+)	(+)	0,59	0,59	0,60	0,60	0,60
58	(+)	(-)	(-)	(+)	(+)	(+)	0,50	0,51	0,46	0,52	0,47
59	(-)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	0,56	0,57	0,57	0,60	0,59
60	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	0,46	0,47	0,48	0,47	0,49
61	(-)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	0,56	0,57	0,56	0,56	0,55
62	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	0,50	0,49	0,45	0,47	0,48
63	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	0,55	0,57	0,57	0,59	0,56
64	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	0,48	0,48	0,45	0,48	0,48

APÊNDICE C - Efeitos Estimados e Coeficientes para o Total Produzido

Tabela C - Efeitos estimados e coeficientes para o Total Produzido

Termos	Efeitos	Coef	SE Coef	T	P
Constante		167080	204,6	816,7	0,000
A	-20288	-10144	204,6	-49,59	0,000
B	-5	-3	204,6	-0,01	0,990
C	-1824	-912	204,6	-4,46	0,000
D	-5307	-2654	204,6	-12,97	0,000
E	-556	-278	204,6	-1,36	0,175
F	-981	-490	204,6	-2,4	0,017
A*B	447	223	204,6	1,09	0,276
A*C	-384	-192	204,6	-0,94	0,349
A*D	630	315	204,6	1,54	0,125
A*E	242	121	204,6	0,59	0,554
A*F	-293	-147	204,6	-0,72	0,475
B*C	519	259	204,6	1,27	0,206
B*D	215	108	204,6	0,53	0,600
B*E	-127	-64	204,6	-0,31	0,756
B*F	-299	-149	204,6	-0,73	0,466
C*D	45	22	204,6	0,11	0,913
C*E	236	118	204,6	0,58	0,564
C*F	203	101	204,6	0,49	0,621
D*E	-245	-122	204,6	-0,6	0,550
D*F	-280	-140	204,6	-0,68	0,495
E*F	-209	-105	204,6	-0,51	0,609
A*B*C	67	33	204,6	0,16	0,871
A*B*D	-323	-161	204,6	-0,79	0,431
A*B*E	299	149	204,6	0,73	0,466
A*B*F	179	90	204,6	0,44	0,662
A*C*D	332	166	204,6	0,81	0,418
A*C*E	251	125	204,6	0,61	0,541
A*C*F	73	36	204,6	0,18	0,859
A*D*E	47	24	204,6	0,12	0,908
A*D*F	94	47	204,6	0,23	0,818
A*E*F	-279	-139	204,6	-0,68	0,496
B*C*D	103	51	204,6	0,25	0,802
B*C*E	-220	-110	204,6	-0,54	0,591

Tabela C - Efeitos estimados e coeficientes para o Total Produzido (Cont.)

Termos	Efeitos	Coef	SE Coef	T	P
B*C*F	191	96	204,6	0,47	0,640
B*D*E	-255	-128	204,6	-0,62	0,533
B*D*F	85	42	204,6	0,21	0,836
B*E*F	204	102	204,6	0,5	0,619
C*D*E	-564	-282	204,6	-1,38	0,169
C*D*F	12	6	204,6	0,03	0,976
C*E*F	595	298	204,6	1,46	0,147
D*E*F	-358	-179	204,6	-0,87	0,383
A*B*C*D	-26	-13	204,6	-0,06	0,949
A*B*C*E	-807	-403	204,6	-1,97	0,050
A*B*C*F	100	50	204,6	0,24	0,808
A*B*D*E	571	285	204,6	1,4	0,164
A*B*D*F	-264	-132	204,6	-0,65	0,519
A*B*E*F	-384	-192	204,6	-0,94	0,349
A*C*D*E	-148	-74	204,6	-0,36	0,717
A*C*D*F	232	116	204,6	0,57	0,572
A*C*E*F	331	165	204,6	0,81	0,420
A*D*E*F	135	67	204,6	0,33	0,742
B*C*D*E	38	19	204,6	0,09	0,926
B*C*D*F	278	139	204,6	0,68	0,497
B*C*E*F	-439	-220	204,6	-1,07	0,284
B*D*E*F	874	437	204,6	2,14	0,034
C*D*E*F	-194	-97	204,6	-0,47	0,637
A*B*C*D*E	12	6	204,6	0,03	0,976
A*B*C*D*F	51	26	204,6	0,13	0,900
A*B*C*E*F	298	149	204,6	0,73	0,467
A*B*D*E*F	-136	-68	204,6	-0,33	0,741
A*C*D*E*F	218	109	204,6	0,53	0,594
B*C*D*E*F	-132	-66	204,6	-0,32	0,748
A*B*C*D*E*F	398	199	204,6	0,97	0,332

APÊNDICE D - Efeitos Estimados e Coeficientes para a DO

Tabela D - Efeitos estimados e coeficientes para a DO

Termos	Efeitos	Coef	SE Coef	T	P
Constante		0,55588	0,000868	640,5	0,000
A	-0,09754	-0,04877	0,000868	-56,2	0,000
B	-0,00389	-0,00195	0,000868	-2,24	0,026
C	-0,01275	-0,00638	0,000868	-7,35	0,000
D	-0,03387	-0,01694	0,000868	-19,52	0,000
E	-0,0095	-0,00475	0,000868	-5,47	0,000
F	-0,00438	-0,00219	0,000868	-2,52	0,012
A*B	-0,00291	-0,00145	0,000868	-1,67	0,095
A*C	0,00116	0,00058	0,000868	0,67	0,503
A*D	0,00206	0,00103	0,000868	1,19	0,236
A*E	-0,00279	-0,00139	0,000868	-1,61	0,109
A*F	0,00113	0,00056	0,000868	0,65	0,516
B*C	0,0027	0,00135	0,000868	1,55	0,121
B*D	0,0001	0,00005	0,000868	0,06	0,952
B*E	-0,00025	-0,00012	0,000868	-0,14	0,886
B*F	0,00173	0,00086	0,000868	1	0,320
C*D	0,00147	0,00073	0,000868	0,85	0,399
C*E	0,00088	0,00044	0,000868	0,51	0,613
C*F	0,0006	0,0003	0,000868	0,35	0,728
D*E	0,00031	0,00015	0,000868	0,18	0,860
D*F	-0,00424	-0,00212	0,000868	-2,44	0,015
E*F	-0,00107	-0,00054	0,000868	-0,62	0,538
A*B*C	-0,00396	-0,00198	0,000868	-2,28	0,023
A*B*D	-0,00143	-0,00072	0,000868	-0,82	0,410
A*B*E	0,00009	0,00005	0,000868	0,05	0,957
A*B*F	-0,00087	-0,00043	0,000868	-0,5	0,618
A*C*D	0,00016	0,00008	0,000868	0,09	0,927
A*C*E	0,00216	0,00108	0,000868	1,25	0,214
A*C*F	-0,00084	-0,00042	0,000868	-0,48	0,630
A*D*E	-0,00061	-0,0003	0,000868	-0,35	0,727
A*D*F	-0,0023	-0,00115	0,000868	-1,33	0,186
A*E*F	-0,00127	-0,00064	0,000868	-0,73	0,465
B*C*D	0,00011	0,00006	0,000868	0,06	0,949
B*C*E	-0,00084	-0,00042	0,000868	-0,48	0,630
B*C*F	0,00093	0,00046	0,000868	0,54	0,593

Tabela D - Efeitos estimados e coeficientes para a DO (Cont.)

Termos	Efeitos	Coef	SE Coef	T	P
B*D*E	-0,0069	-0,00345	0,000868	-3,97	0,000
B*D*F	-0,00008	-0,00004	0,000868	-0,04	0,965
B*E*F	0,00246	0,00123	0,000868	1,42	0,158
C*D*E	-0,00002	-0,00001	0,000868	-0,01	0,991
C*D*F	-0,00151	-0,00075	0,000868	-0,87	0,386
C*E*F	0,00174	0,00087	0,000868	1	0,317
D*E*F	-0,00287	-0,00144	0,000868	-1,66	0,099
A*B*C*D	0,00155	0,00077	0,000868	0,89	0,374
A*B*C*E	0,00106	0,00053	0,000868	0,61	0,541
A*B*C*F	-0,00092	-0,00046	0,000868	-0,53	0,595
A*B*D*E	0,00093	0,00046	0,000868	0,53	0,593
A*B*D*F	0,00026	0,00013	0,000868	0,15	0,881
A*B*E*F	-0,00007	-0,00004	0,000868	-0,04	0,967
A*C*D*E	0,00099	0,00049	0,000868	0,57	0,569
A*C*D*F	0,00089	0,00044	0,000868	0,51	0,610
A*C*E*F	0,0003	0,00015	0,000868	0,17	0,863
A*D*E*F	0,00548	0,00274	0,000868	3,16	0,002
B*C*D*E	-0,00061	-0,0003	0,000868	-0,35	0,727
B*C*D*F	0,00205	0,00103	0,000868	1,18	0,238
B*C*E*F	0,0009	0,00045	0,000868	0,52	0,604
B*D*E*F	-0,00005	-0,00002	0,000868	-0,03	0,978
C*D*E*F	-0,00384	-0,00192	0,000868	-2,21	0,028
A*B*C*D*E	-0,00167	-0,00084	0,000868	-0,96	0,336
A*B*C*D*F	0,00179	0,0009	0,000868	1,03	0,303
A*B*C*E*F	-0,00313	-0,00157	0,000868	-1,8	0,072
A*B*D*E*F	0,00068	0,00034	0,000868	0,39	0,694
A*C*D*E*F	0,00216	0,00108	0,000868	1,24	0,215
B*C*D*E*F	0,00486	0,00243	0,000868	2,8	0,006
A*B*C*D*E*F	0,00275	0,00137	0,000868	1,58	0,115

APÊNDICE E – Artigos Gerados

Artigo originado desta dissertação já publicado:

- MACIEL, A. C.; MONTEVECHI, J. A. B.; MIRANDA, R. C.; FAGUNDES, L. D. Análise do Impacto dos Tempos de Setup na Disponibilidade Operacional de uma Máquina de Corte através da Simulação a Eventos Discretos. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 19., 2012, **Anais...** Bauru, SP, 2012.

Artigo originado desta dissertação aprovados, mas ainda não publicados:

- MACIEL, A. C.; QUEIROZ, J. A.; FAVARETTO, F.; PEREIRA, T. Análise do impacto dos tempos de setup na eficiência global do equipamento por meio da simulação a eventos discretos. Artigo aprovado no **XLV SBPO**.
- MACIEL, A. C.; MONTEVECHI, J. A. B.; PEREIRA, T. Análise da alteração de leiaute em uma linha de manufatura de um componente automotivo através da simulação a eventos discretos. Artigo aprovado no **ENEGEP 2013**.

Artigo submetido a um *Journal* B1:

- MACIEL, A. C.; MONTEVECHI, J. A. B.; LEAL, F.; MIRANDA, R. C. Evaluation of the integrated use of discrete events simulation, design of experiments, and desirability function to verify the viability of the established goals for availability efficiency for a manufacturing cell. Artigo submetido ao **International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice**.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDULMALEK, F.A.; RAJGOPAL, J. Analyzing the benefits of lean manufacturing and value stream mapping via simulation: a process sector case study. **International Journal of Production Economics**, v. 107, p. 223–236, 2007.
- AGUILAR-SAVÉN, R.S. Business process modeling: Review and framework. **International Journal of Production Economics**, v.90, p.129–149, 2004.
- AL-MUBARAK, F.; CANELB, C.; KHUMAWALA, B. M. Verification and validation of simulation models. **International Journal of Production Economics**, v. 83, n. 2, p. 123-138, 2003.
- AL-REFAIE, A.; RAWABDEH, I.; JALHAM, I.; BATA, N.; ABU-ALHAJ, R. Optimization of multiple responses in the taguchi method using desirability function and fuzzy regression. In: INTERNATIONAL MULTICONFERENCE OF ENGINEERS AND COMPUTER SCIENTISTS, **Proceedings...** Hong Kong, China, 2013.
- AMIRI M.; MOHTASHAMI, A. Buffer allocation in unreliable production lines based on design of experiments, simulation, and genetic algorithm. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 62, p.371–383, 2012.
- ANG, A. T. H.; SIVAKUMAR, A. I. Online multiobjective single machine dynamic scheduling with sequence-dependent setups using simulation-based genetic algorithm with desirability function. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, **Proceedings...** Washington, DC, USA, 2007.
- ASIM E. F.; MAHMOOD, M.; SIDDIQUI, M. A. Optimization of process parameters for simultaneous fixation of reactive printing and crease resistant finishing using desirability function. **Journal of Textile and Apparel, Technology and Management**, v. 7, n. 3, 2012.
- BAESLER, F.; BASTÍAS, A.; NEMETH, M.; MARTINEZ, C. Blood centre inventory analysis using discrete simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, **Proceedings...** Berlin, Germany, 2012.
- BANKS, J. **Handbook of simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- BANKS, J.; CARSON II, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M. **Discrete-event simulation**. 4th. Ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2005.
- BANKS, J.; CARSON II, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M. **Discrete-event simulation**. 4th. Ed. Nova Delhi: Prentice-Hall, 2008.
- BANKS, J.; CARSON II, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M. **Discrete-event Simulation**. 5th. Ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2009.
- BEKKER, J.; VIVIERS, L. Using computer simulation to determine operations policies for a mechanised car park. **Simulation Modelling Practice and Theory**, n.16, p.613–625, 2008.
- BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Modelling and simulation: operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v .22, n. 2, p. 241-264, 2002.
- BOX, G. E. P., DRAPER, N. R. **Empirical Model-Building and Response Surfaces**. 1st. Ed. New York: John Wiley & Sons, 1987.

- BOX, G. E. P., HUNTER, W. G., HUNTER, J. S. **Statistics for Experimenters**. 1st. Ed. New York: John Wiley & Sons, 1978.
- BRAGLIA, M.; FRONSOLINI, M.; ZAMMORI, F. Overall equipment effectiveness of a manufacturing line (OEEML) - An integrated approach to assess systems performance. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 20, n.1, 2009.
- BRANCO FILHO, G. **Indicadores de Manutenção**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, Ltda., 2006.
- BRYMAN, A.; BELL. E. **Business research methods**. 2nd. Ed. New York: Oxford University Press, 2007.
- CAMPOS, V. F. **TQC – Controle da qualidade total: no estilo japonês**. 5^o ed. Minas Gerais, 1992.
- CAN, B.; HEAVEY, C. Comparison of experimental designs for simulation-based symbolic regression of manufacturing systems. **Computers & Industrial Engineering**, v. 61, p. 447–462, 2011.
- CAN, B.; HEAVEY, C. A comparison of genetic programming and artificial neural networks in metamodeling of discrete-event simulation models. **Computers & Operations Research**, v. 39, p. 424–436, 2012.
- CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br.ez38.periodicos.capes.gov.br>>. Acesso em: 23/03/2013.
- CAPETTI, E. J. **O papel da gestão da manutenção no desenvolvimento da estratégia de manufatura**. 2005. 168 p. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2005.
- CARSON II, J. S. M. Model Verification and Validation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, **Proceedings...** San Diego, CA, USA, 2002.
- CHO, S. A distributed time driven simulation method for enabling real time manufacturing shop floor control. **Computers & Industrial Engineering**, n.49, p.572-590, 2005.
- CHUNG, C. A. **Simulation Modeling Handbook. A Practical Approach**. London, New York: CRC Press, 2004.
- CHWIF, L. **Redução de modelos de simulação de eventos discretos na sua concepção: uma abordagem causal**. Tese (Doutorado) - Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.151 p.
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações**. São Paulo: Editora dos Autores, 2006.
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações**. 2.ed. São Paulo: Editora dos autores, 2007.
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações**. 3^a. Ed. São Paulo: Editora dos Autores, 2010.
- CHWIF, L.; PAUL, R.J.; BARRETTO, M.R.P. Combining the best of the two: an activity cycle diagram/condition specification approach. **Proceedings of the Fourth National Conference of the UK Simulation Society**, Nottingham Trent University, Nottingham, UK, p. 93–98,1999.
- CHWIF, L.; PAUL, R.J.; BARRETTO, M.R.P. Discrete event simulation model reduction: A causal approach. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v.14, p. 930–944, 2006.

- COSTA, R. F. S. **Abordagem sistemática para avaliação econômica de cenários para modelos de simulação discreta em manufatura**. 2010. 139 p. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.
- COSTA, R.F.S.; MONTEVECHI, J. A. B.; PAMPLONA, M. S. F.; MEDEIROS, A. L.; SILVA, A. L. F.; FRIEND, J. D. Discrete-event simulation and activity-based costing to aid the decision making process in a manufacturing cell. In: **The International Workshop on Applied Modelling & Simulation**, Búzios, RJ, 2010.
- COX, D.R.; REID, N. **The Theory of the Design of Experiments**. Chapman & Hall/CRC, 2000.
- DABBAS, R. M.; CHEN, H.; FOWLER, J. W.; SHUNK, D. A combined dispatching criteria approach to scheduling semiconductor manufacturing systems. **Computers & Industrial Engineering**, n.39, p.307-324, 2001.
- DAHL, O.-J.; NYGAARD K.. Simula 67. In: IFIP TC 2 WORKING CONFERENCE ON SIMULATION LANGUAGES. **Proceedings...** Oslo, 1967.
- DERRINGER, G. e SUICH, R. Simultaneous optimization of several response variables. **Journal of Quality Technology**, v. 12, p. 214–219, 1980.
- FLYNN, B.B.; SCHROEDER R. G.; FLYNN E. J.; SAKAKIBARA S.; BATES K. A. World-class manufacturing project: overview and selected results. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 17, n. 7, p. 671 – 685, 1997.
- FRANCESCHINI, F.; GALETTO, M.; MAISANO, D.; MASTROGIACOMO, L. Properties of performance in operations management: a reference framework. **International Journal of Productivity and Performance Management**, v. 57, n. 2, p. 137-155, 2008.
- GARZA-REYES, J. A.; ELDRIDGE, S.; BARBER, K. D.; SORIANO-MEIER, H. Overall equipment effectiveness (OEE) and process capability (PC) measures: a relationship analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v.27, n.1, p. 48-62, 2010.
- GIFFI, C., ROTH, A.; SEAL, G. Competing in World Class Manufacturing: America's 21st Century Challenge, **Business One Irwin**, Homewood, IL, 1990.
- GOMES, J. H. F. **Análise e otimização da soldagem de revestimento de chapas de aço carbono utilizando arame tubular inoxidável austenítico**. 2010. 136 p. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Produção. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.
- GORDON, G. A general purpose systems simulation program. In: EASTERN JOINT COMPUTER CONFERENCE. **Proceedings...** Washington, D.C, 1961.
- HARREL, C.R.; BATEMAN, R.E.; GOGG, T. J.; MOTT, J.R.A. **System Improvement Using Simulation**. 3rd. Ed. ProModel Corporation, 1995.
- HARREL, C. R.; GHOSH, B. K.; BOWDEN, R. **Simulation Using ProModel**. 3rd. Ed. Boston: McGraw-Hill, 2000.
- HARREL, C. R.; GHOSH, B. K.; BOWDEN, R. O. **Simulation Using Promodel**. 2nd. ed. New York: McGraw-Hill, 2004.
- HARREL, C. R.; PRICE, R. N. Simulation modeling using ProModel. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, **Proceedings...** New Orleans, LA, USA, 2003.
- HARREL, C. R.; MOTT, J. R. A; BATEMAN, R. E.; BOWDEN, R. G.; GOGG, T. J. **Simulação: otimizando os sistemas**. 2^a Ed. São Paulo: IMAM, 2003.

- HARRINGTON, E. C. The desirability function. **Industrial Quality Control**, v. 21, p. 494-498, 1965.
- HAYES, R.H; WHEELWRIGHT, S.C. **Restoring our Competitive Edge: Competing through Manufacturing**. New York: John Wiley & Sons, 1985.
- HERCULANO, R. D.; NORBERTO, A. M. Q. Análise da produtividade científica dos docentes da Universidade Estadual Paulista, campus de Marília/SP. **Perspectivas em Ciência da Informação**, v. 17, n. 2, p. 57-70, 2012.
- HERNANDEZ-MATIAS, J.C.; VIZAN, A.; PEREZ-GARCIA, J. & RIOS, J. An integrated modeling framework to support manufacturing system diagnosis for continuous improvement. **Robotics and computer-integrated manufacturing**, v.24, n.2, p.187-199, 2008.
- HUANG, S. H. ; DISMUKES, J. P. ; SHI, J; SU, Q. ; RAZZAK, M. A.; BODHALE, R.; ROBINSON E. D. Manufacturing productivity improvement using effectiveness metrics and simulation analysis. **International Journal of Production Research** , v. 41, n. 3, p. 513-527, 2003.
- ILGIN, M. A.; GUPTA, S. M. Comparison of economic benefits of sensor embedded products and conventional products in a multi-product disassembly line. **Computers & Industrial**, v. 59, n. 4, p. 748-763, 2010.
- ISI. Web of Science. Disponível em: <<http://www.webofknowledge.com>>. Acesso em: 23/03/2013.
- ISLAM, M. A.; ALAM, R; HANNAN, O. Multiresponse optimization based on statistical response surface methodology and desirability function for the production of particleboard. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, n. 3, p. 861-868, 2012.
- JAHANGIRIAN, M.; ELDABI, T.; NASSER, A; STERGILOULAS, L. K.; YOUNG, T. Simulation in manufacturing and business: A review. **European Journal of Operational Research**, v. 203, n. 1, p. 1-13, 2010.
- JENKINS, C. M.; RICE, S. V. Resource Modeling In Discrete-Event Simulation Environments: A Fifty-Year Perspective. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, **Proceedings...** Austin, TX, USA, 2009.
- JOHN, B. Application of desirability function for optimizing the performance characteristics of carbonitrided bushes. **International Journal of Industrial Engineering Computations**, v.4, 2013.
- JORDAN J. D.; MELOUK S. H.; FAAS P. D. Analyzing production modifications of a c-130 engine repair facility using simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, **Proceedings...**, Austin, Texas, USA, 2009.
- KELTON, W.D. Designing simulation experiments. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, **Proceedings...**, Phoenix, AZ, USA, 1999.
- KELTON, W. D. Designing simulation experiments. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, **Proceedings...** New Orleans, LA, USA, 2003.
- KELTON, W. D; BARTON, R.R. Experimental Design for Simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE. **Proceedings...** New Orleans, LA, USA, 2003.
- KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P. E.; STURROCK, D. T. **Simulation with Arena**. Boston: McGraw-Hill, 1998.

- KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P. E.; STURROCK, D. T. **Simulation with Arena**. 4th.Ed. New York: McGraw-Hill, 2007.
- KENNE, J. P.; GHARBI, A. A simulation optimization approach in production planning of failure prone manufacturing systems. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 12, p. 421-431, 2001.
- KENYON, G.; CANEL, C; NEUREUTHER, B. D. The impact of lot-sizing on net profits and cycle times in the n-job, m-machine job shop with both discrete and batch processing. **International Journal Production Economics**, v. 97, p. 263-278, 2005.
- KIYAN, F.M. **Proposta para desenvolvimento de indicadores de desempenho como suporte estratégico**. 2001. 118 p. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Produção. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
- KLEIJNEN, J.P.C. Theory and Methodology: Verification and validation of simulation models. **European Journal of Operational Research**, v.82, p.145-162, 1995.
- KLEIJNEN, J.P.C. Experimental Design for Sensitivity analysis, optimization, and validation of simulation models. In: BANKS, J. The Handbook of simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications and Practice. John Wiley & Sons, Inc., cap. 6, 1998.
- KLEIJNEN, J. P. C.; SANCHEZ, S. M.; LUCAS, T. W.; CIOPPA, T. M. State-of-the-Art Review: A User's Guide to the Brave New World of Designing Simulation Experiments. **Journal on Computing**, v.17, n.3, p. 263–289, 2005.
- KLEIJNEN, J. P. C.; VAN BEERS, W.; VAN NIEUWENHUYSE, I. Constrained optimization in simulation: A novel approach. **European Journal of Operational Research**, v.202, n.1, p.164-174, 2010.
- KO, Y. H., KIM, K. J., JUN, C. H. A New Loss Function-Based Method for Multiresponse Optimization. **Journal of Quality Technology**, v. 37, n. 1, p. 50-59, 2005.
- KOTIADIS, K.; ROBINSON, S. Conceptual modeling: knowledge acquisition and model abstraction. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, **Proceedings...**, USA, 2008.
- KOUSKOURAS, K. G., GEORGIUO A. C. 2007. A discrete event simulation model in the case of managing a software project. **European Journal of Operational Research**, v. 181, p. 374–389.
- LAW A. M. How to build valid and credible simulation models. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, **Proceedings...**, Monterey, CA, USA, 2006.
- LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation modeling and analysis**. 3rd. Ed. New York: McGraw-Hill, 2000.
- LAW, A. M. How to build valid and credible simulation models. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, **Proceedings...** Austin, TX, USA, 2009.
- LAM K.; LAU R. S. M. A simulation approach to restructuring call centers. **Business Process Management Journal**, v. 10, n. 4, p. 481–494, 2004.
- LAVY, S.; GARCIA, J. A.; DIXIT, M. K. Establishment of KPIs for facility performance measurement: review of literature. **Facilities**, v. 28, n. 9, p. 440-464, 2010.
- LEAL, F. **Um diagnóstico do processo de atendimento a clientes em uma agência bancária através de mapeamento do processo e simulação computacional**. 2003. 224 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2003.

- LEAL, F. **Análise do efeito interativo de falhas em processos de manufatura através de experimentos simulados**. 2008. 237 p. Tese (Doutorado) - Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia. Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.
- LEAL, F.; COSTA, R. F. S.; MONTEVECHI, J. A. B.; ALMEIDA, D. A. de; MARINS, F. A. S. A practical guide for operational validation of discrete simulation models. **Pesquisa Operacional**, v.31, n.1, p.01-21, 2011.
- LEAL, F.; OLIVEIRA, M. L. M.; ALMEIDA, D.A. de; MONTEVECHI, J. A. B. Desenvolvimento e aplicação de uma técnica de modelagem conceitual de processos em projetos de simulação: o IDEF-SIM. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 29., 2009, **Anais...** Salvador, BA, 2009.
- LEAL, F.; ALMEIDA, D.A.de; MONTEVECHI, J. A. B. Aplicação do IDEF-SIM na modelagem conceitual de processos de seleção de resíduos sólidos urbanos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 43., 2011, **Anais...** Ubatuba, SP, 2011.
- LIMA, J. P.; LOBATO, K. C. D.; LEAL, F. Aplicação do IDEF-SIM na modelagem conceitual de processos de seleção de resíduos sólidos urbanos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 43., 2011, **Anais...** Ubatuba, SP, 2011.
- LEAL, F.; ALMEIDA, D. A. de; MONTEVECHI, J. A. B. Uma Proposta de Técnica de Modelagem Conceitual para a Simulação através de elementos do IDEF. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 40., 2008, **Anais...** João Pessoa, PB, 2008.
- LONGO, F. Design and integration of the containers inspection activities in the container terminal operations. **International Journal of Production Economics**, article in press, 2010.
- MACIEL, A. C.; MONTEVECHI, J. A. B.; MIRANDA, R. C.; FAGUNDES, L. D. Análise do Impacto dos Tempos de Setup na Disponibilidade Operacional de uma Máquina de Corte através da Simulação a Eventos Discretos. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 19., 2012, **Anais...** Bauru, SP, 2012.
- MAHFOUZ, A.; HASSAN, S.A.; ARISHA, A. Practical simulation application: Evaluation of process control parameters in Twisted-Pair Cables manufacturing system. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v.18, p. 471–482, 2010.
- MARKOWITZ, H.; HAUSNER, B.; KARR H. **SIMSCRIPT: A simulation programming language**. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall. 1962.
- MARVEL, J. H.; SCHAUB, M. A.; WECKMAN, G. R. Assessing the availability and allocation of production capacity in a fabrication facility through simulation modeling: a case study. **International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice**, v. 14, n. 2, 2008.
- MIRANDA, R.C. **Algoritmo genético adaptativo para otimização de modelos de simulação a eventos discreto**. 2012. 149 p. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Produção. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.
- MIRANDA, A. K.; CASTILLO, E. D. Robust parameter design optimization of simulation experiments using stochastic perturbation methods. **Journal of the Operational Research Society**, v.62, n. 1, p.198-205, 2011.
- MIRANDA, R. C.; COUTINHO, B. F.; RIBEIRO, J. R.; MONTEVECHI, J. A. B.; PINHO, A. F. Avaliação da operação de setup em uma célula de manufatura de uma indústria de autopeças através da simulação a eventos discretos. **Revista Gestão Industrial**, v.6, n.3, p.01-21, 2010.

- MOELLMANN, A. H.; ALBUQUERQUE, A. S.; CONTADOR, J. L.; MARINS, F. A. S. Aplicação da teoria das restrições e do indicador de eficiência global do equipamento para melhoria de produtividade em uma linha de fabricação. **Revista Gestão Industrial**, v.2, n.1, p.89-105, 2006.
- MONTEVECHI, J. A. B.; PINHO, A. F.; LEAL, F.; MARINS, F. A. S. Application of design of experiments on the simulation of a process in an automotive industry. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, **Proceedings...** Washington, DC, USA, 2007.
- MONTEVECHI, J. A. B.; MARINS, F. A. S.; MEDINA, A. C.; PINHO, A. F.; SANCHES, A. L.; ALMEIDA, D. A.; LEAL, F.; FERNANDES, L. J.; CHWIF, L.; RODRIGUEZ, L. A. O. Aplicação integrada de projeto de experimentos, simulação de eventos discretos e otimização na manufatura. Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 28., 2008. **Anais...** Rio de Janeiro, 2008a.
- MONTEVECHI, J. A. B.; PINHO, A. F. DE; LEAL, F.; MARINS, F. A. S.; COSTA, R. F. DA S. Improving a process in a brazilian automotive plant applying process mapping, design of experiments and discrete events simulation. In: SYMPOSIUM EUROPEO DE MODELADO Y SIMULACION (SCS), **Proceedings...** Briatico, Itália, 2008b.
- MONTEVECHI, J. A. B.; LEAL, F.; PINHO, A. F.; COSTA, R. F. S.; OLIVEIRA, M. L. M.; SILVA, A. L. F. Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted IDEF: an application in a Brazilian tech company. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, **Proceedings...** Baltimore, MD, USA, 2010.
- MONTEVECHI, J. A. B.; MIRANDA, R. C.; FRIEND, J. D. Sensitivity Analysis in Discrete-Event Simulation Using Design of Experiments. In: LIM, E. W. C. (Org). Discrete Event Simulations - Development and Applications. Rijeka: Intech, p. 63-102, 2012.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 2ª. Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2003.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 5th. Ed. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 6th. Ed. New York: Wiley, 2005.
- MONTGOMERY, D. C. Introdução ao controle estatístico da qualidade. 4ª. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- MORABITO NETO, R.; PUREZA, V. Modelagem e Simulação. In: MIGUEL, P. A. C. (Org). Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações. Rio de Janeiro: Elsevier, p. 170-196, 2012.
- MORETTIN, P.A.; BUSSAB, W.O. **Estatística Básica**. 6ª. Ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2010.
- MOREIRA, E. **Proposta de uma sistemática para o alinhamento das ações operacionais aos objetivos estratégicos, em uma gestão orientada por indicadores de desempenho**. 2002. 204 p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- MURPHY, T. E.; TSUI, K. L.; ALLEN, J. K. A review of robust design methods for multiple responses. **Research in Engineering Design**, v. 15, p. 201-215, 2005.

- MURUGESAN, T. K.; KUMAR, B.S.; KUMAR, M. S. Manufacturing system (WCMS) - A study of manufacturing companies in South India. **European Journal of Social Sciences**, v. 29, n.2, p. 295-311, 2012.
- MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C. **Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments**. 2nd. Ed. New York: J. Wiley, 2002.
- NACHIAPPAN, R.M.; ANANTHARAM, N. Evaluation of overall line effectiveness (OLE) in a continuous product line manufacturing system. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 17, n. 7, p. 987-1008, 2006.
- NAGAO, S. K. **Manutenção Industrial – Análise, Diagnóstico, Propostas de Melhoria de Performance em Indústrias de Processo**. 1998. 231 p. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1998.
- NAKAJIMA, S. **Introdução ao TPM – Total Productive Maintenance**. São Paulo: IMC, Internacional Sistemas Educativos Ltda., 1989.
- NANCE, R. E. Simulation Programming Languages: An Abridged History. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, **Proceedings...** Arlington, VA, USA, 1995.
- NANCE, R. E.; SARGENT, R. Perspectives on the evolution of simulation. **Operations Research**, v.50, n.1, p.161-172, 2002.
- NAZZAL, D.; MOLLAGHASEMI, M.; ANDERSON, D. A. Simulation-based evaluation of the cost of cycle time reduction in Agere Systems wafer fabrication facility: a case study. **International Journal of Production Economics**, v.100, p. 300-313, 2006.
- NUNES, A. F. **Aspectos da aplicação do IDEF-SIM na construção e documentação de modelos conceituais em projetos de simulação**. 2010. 191 p. Dissertação (Mestrado em Pesquisa Operacional e Inteligência Computacional) - Universidade Candido Mendes, Campos dos Goytacazes, RJ, 2010.
- NUNES, A. F.; RANGEL, J. J. A. Uma proposta de documentação para modelos conceituais de simulação em IDEF-SIM. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 29., 2009, **Anais...** Salvador, BA, 2009a.
- NUNES, A. F.; RANGEL, J. J. A. Aspectos da aplicação do IDEF-SIM na construção de modelos de simulação com Arena. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 41., 2009, **Anais...** Porto Seguro, BA, 2009b.
- OKHMATOVSKAIA, A.; BUCKERIDGE, D.; SHABAN-NEJAD, A.; SUTCLIFFE, A.; KOPEC, J. A.; FINÈS, P.; WOLFSON, M. C. SIMPHO: an ontology for simulation modeling of population health. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, **Proceedings...** Berlin, Germany, 2012.
- OLIVEIRA, C. S. Aplicação de Técnicas de Simulação em Projetos de Manufatura Enxuta. **Estudos Tecnológicos**, v. 4, n. 3, p. 204-217, 2008.
- OLIVEIRA, M. L. M. **Análise da aplicabilidade da técnica de modelagem IDEF-SIM nas etapas de um projeto de simulação a eventos discretos**. 2010. 168 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2010.
- OLIVEIRA, M. L. M.; COSTA, R. F. S.; XAVIER, A. F.; ALMEIDA, D. A.; MONTEVECHI, J. A. B. Ensino do mapeamento Lean utilizando como recurso didático a simulação computacional a eventos discretos. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 16., 2009, **Anais...** Bauru, SP, 2009.

- OLIVEIRA, M.L.M. de; MIRANDA, R. de C.; MONTEVECHI, J.A.B.; LEAL, F. Desenvolvimento de um projeto de simulação a eventos discretos em uma célula de controle de qualidade de uma empresa de alta tecnologia. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 42., 2010, **Anais...**, Bento Gonçalves, RS, 2010.
- ORTIZ, F. Jr.; SIMPSON, J. R.; PIGNATIELLO, J. J. Jr.; HEREDIA-LANGNER, A. A Genetic Algorithm approach to multiple-response optimization. **Journal of Quality Technology**, v. 36, n. 4, p. 432-450, 2004.
- OSBORNE, D. M., ARMACOST, R. L., PET-EDWARDS, J. State of the art in multiple response surface methodology. **IEEE International Conference on Computational Cybernetics and Simulation**, v. 4, p. 3833-3838, 1997.
- PAIVA, A. P. **Metodologia de superfície de resposta e análise de componentes principais em otimização de processos de manufatura com múltiplas respostas correlacionadas**. 2006. 257 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.
- PAIVA, E. J. **Otimização de processos de manufatura com múltiplas respostas baseada em índices de capacidade**. 2008. 118 p. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Produção. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2008.
- PAIVA, C. N. **A relevância do fator humano na simulação computacional**. 2010. 166 p. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Produção. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.
- PEGDEN, C. D.; SHANNON, R. E.; SADOWISK, R.P. **Introduction to Simulation Using SIMAN**. 2nd. Ed. New York: McGraw-Hill, 1995.
- PEGDEN, C. D. Advanced Tutorial: Overview Of Simulation World Views. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, **Proceedings...** Austin, TX, USA, 2010.
- PEREIRA, I. C. **Proposta de sistematização da simulação para fabricação em lotes**. 2000. 154 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2000.
- PINHO, A. F. **Proposta de um método de otimização de modelos de simulação a eventos discretos**. 2008. 189 p. Tese (Doutorado) - Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP, 2008.
- PINHO, A. F.; LEAL, F.; MONTEVECHI, J. A. B.; ALMEIDA, D. A. de. Combinação entre as técnicas de fluxograma e mapa de processo no mapeamento de um processo produtivo. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 27., 2007, **Anais...** Foz do Iguaçu, PR, 2007.
- PINHO, A. F.; MORAIS, N. S. Utilização da simulação computacional combinada à técnica de otimização em um processo produtivo. **Revista P&D em Engenharia de Produção**, v.8, n.2, p.88-101, 2010.
- POTTER, A.; YANG, B.; LALWANI, C. A simulation study of despatch bay performance in the steel processing industry. **European Journal of Operational Research**, v.179, p. 567–578, 2007.
- PPGEP – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção. Disponível em: <<http://www.unifei.edu.br/pg/pos-graduacao-inicial?c=040&m=ME&p=0>>. Acesso em 14/04/2013.
- PROMODEL USER GUIDE. ProModel Corporation: Orem, UT. USA. 2011.

- PROTIL, R. M. Otimização do processo decisório utilizando simulação computacional. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 33., 2001. **Anais...** Campos do Jordão, SP, p.1535-1546, 2001.
- QUEIROZ, J. A.; MIRANDA, R. C.; TORRES, A. F.; PINHO, A. F. Proposta de uma metodologia para utilização da simulação no planejamento e implantação dos sistemas de produção enxuta. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 44., 2012, **Anais...**, Rio de Janeiro, RJ, 2012.
- ROBINSON, S. Conceptual modeling for simulation: issues and research requirements. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, **Proceedings...** Monterey, CA, USA, 2006.
- ROBINSON, S. Conceptual modelling for simulation Part I: definition and requirements. **Journal of the Operational Research Society**, v.59, n.3, p.278-290, 2008.
- RODRIGUES, U.; MONTEVECHI, J. A. B.; MIRANDA, R. de C; PEREIRA, L. F. Aplicação de simulação a eventos discretos e arranjo ortogonal de Taguchi na otimização de uma célula de manufatura. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 44., 2012, **Anais...**, Rio de Janeiro, RJ, 2012.
- RON, A. J.; ROODA, J. E. Equipment Effectiveness: OEE Revised. **IEEE Transactions on semi-conductor manufacturing**, v. 18, n.1, 2005.
- ROSSI, F. Blending Response Surface Methodology and Principal Components Analysis to match a target product. **Food Quality and Preference**, v. 12, p. 457- 465, 2001.
- ROY, J.; BARMA, J. D.; SAHA, S. C. The use of Taguchi method based on desirability function approach for optimization of process parameters in submerged arc welding. **Advanced Materials Research**, v. 622-623, p. 319-322, 2013.
- RUIZ-TORRES, A. J.; MAHMOODI, F. Analysis of Multi-Cell Production Systems Considering Cell Size and Worker Flexibility. **International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice**, v. 15, n. 4, p. 360-372, 2008.
- RYAN, J.; HEAVEY, C. Process modeling for simulation. **Computers in Industry**, v.57, p. 437- 450, 2006.
- SAIF, A. W. A.; SELIAMAN, M. E.; AHMAD, A. R. Simulation Optimization of a Four-Stage Supply Chain System. **Information and Communication Technologies**, v. 2, p. 2798-2802, 2006.
- SANCHES, A. L.; MONTEVECHI, J. A. B.; MARINS, F. A. S. A Compatibilidade entre técnicas de otimização e simulação de eventos discretos. Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 28., 2008. **Anais...** Rio de Janeiro, 2008.
- SANCHEZ, S.M. Work smarter, not harder: guidelines for designing simulation experiments. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, **Proceedings...** Monterey, CA, USA, 2006.
- SANCHEZ, S. M.; WAN, H. Better than a petaflop: the power of efficient experimental design. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, **Proceedings...** Phoenix, AZ, USA, 2011.
- SANTOS, A. C. O. **Análise do Indicador de Eficiência Global de Equipamentos para Elevação de Restrições Físicas em Ambientes de Manufatura Enxuta**. 2009. 118 p. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Produção. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2009.

- SANTOS, T. A.; RANGEL, J. J. A. Modelo de simulação de um processo de requisições em um servidor web de alta disponibilidade. **Revista Eletrônica Produção & Engenharia**, v.3, n.1, p. 248-254, 2010.
- SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, **Proceedings...** Miami, FL, USA, 2008.
- SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, **Proceedings...** Austin, TX, USA, 2009.
- SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE. **Proceedings...** Baltimore, MD, USA, 2010.
- SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE. **Proceedings...** Phoenix, AZ, USA, 2011.
- SCOPUS. Disponível em: <<http://www.scopus.com/home.url>>. Acesso em: 23/03/2013.
- SEMICONDUCTOR EQUIPMENT AND MATERIAL INTERNATIONAL. SEMI E10-0699: standard for definition and measurement of equipment reliability, availability, and maintainability (RAM). 2009.
- SEMICONDUCTOR EQUIPMENT AND MATERIAL INTERNATIONAL. SEMI E79-0200: standard for definition and measurement of equipment productivity. 2000.
- SHARMA, A. K.; SHUDHANSHU; BHARDWAJ, A. Manufacturing performance and evolution of TPM. **International Journal of Engineering Science and Technology**, v.4, n. 3, 2012.
- SILVA, W. A. **Otimização de parâmetros da gestão baseada em atividades aplicada em uma célula de manufatura**. 2005. 120 p. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Produção. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2005.
- SINGH, A.; DATTA, S.; MAHAPATRA, S. S. Optmization of bead geometry of submerged are weld using fuzzy basead desirability function. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v.44, p. 24-35, 2013.
- SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Operations Management**. 6th. Ed. FT - Prentice Hall, 2010.
- SUBRAMANYA, K. N.; SHOBHA, N. S. Machine Capacity Estimation in a Process Industry Modeling – A Case Study. **International Journal of Social Sciences and Humanities**, v.1, p. 8-12, 2012.
- TANGEN, S. An overview of frequently used performance measures. **Work Study**, v. 52, n. 7, p.347–354, 2003.
- TARGINO, M., GARCIA, J. C. R. Ciência brasileira na base de dados do Institute for Scientific Information (ISI). **Ciência da Informação**, v. 29, n. 1, p. 103-117, 2000.
- THE PRODUCTIVITY DEVELOPMENT TEAM, OEE for operators. Shopfloor Series; University Press, 1999.
- TORGA, B. L. M. **Modelagem, simulação e otimização em sistemas puxados de manufatura**. 2007. 126 p. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Produção. Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá, MG, 2007.

TORRES, I. **Integração de Ferramentas Computacionais aplicadas ao Projeto e Desenvolvimento de Arranjo Físico de Instalações Industriais**. 2001. 154 p. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Produção. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2001.

VAN GYSEGHEM, E., JIMIDAR, M., SNEYERS, R., REDLICH, D., VERHOEVEN, E., MASSART, D. L., VANDER HEYDEN, Y. Selection of reversed-phase liquid chromatographic columns with diverse selectivity towards the potential separation of impurities in drugs. **Journal of Chromatography A**, v. 1042, p. 69-80, 2004.

VAN VOLSEM, S.; DULLAERT, W.; VAN LANDEGHEM, H. An evolutionary algorithm and discrete event simulation for optimizing inspection strategies for multi-stage processes. **European Journal of Operational Research**, v.179, p. 621–633, 2007.

VINOD, V.; SRIDHARAN, R. Dynamic job-shop scheduling with sequence-dependent setup times: simulation modeling and analysis. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 36, n. 3-4, p. 355-372, 2008.

WANG, T.; PAN, H. Improving the OEE and UPH data quality by automated data collection for the semiconductor assembly industry. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 5, p. 5764-5773, 2011.




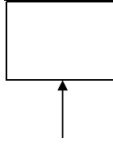
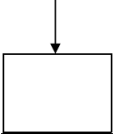



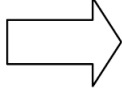
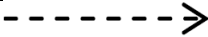



WU, F. C. Optimization of correlated multiple quality characteristics using desirability function. **Quality Engineering**, v. 17, n. 1, p. 119-126, 2005.

YILMAZ, I. O.; GUNTHER, H.O.; JAIN, S. Simulation of mixed-model PCB assembly lines with group setup and bypass conveyors. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 42, n. 3-4, p. 335-347, 2009.

ZHANG, H.; JIANG, Z.; GUO, C. Simulation-based optimization of dispatching rules for semiconductor wafer fabrication system scheduling by the response surface methodology. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 41, p. 110-121, 2009.

ANEXO A - Símbolos do IDEF-SIM

Quadro A – Símbolos do IDEF-SIM

Elementos	Simbologia		Técnica de origem
Entidade			IDEF3 (modo descrição das transições)
Funções			
Fluxo da entidade			IDEF0 e IDEF3
Recursos			IDEF0
Controles			IDEF0
Regras para fluxos paralelos e/ou alternativos		Regra E	IDEF3
		Regra OU	
		Regra E/OU	
Movimentação			Fluxograma
Informação explicativa			IDEF0 e IDEF3
Fluxo de entrada no sistema modelado			
Ponto final do sistema			
Conexão com outra figura			

Fonte: Adaptado de Leal (2008) e Montevechi *et al.* (2010)