

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ  
CAMPUS CURITIBA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E  
SISTEMAS**

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE MANUFATURA EM REDE DE  
PETRI COLORIDA**

**CURITIBA**

**2011**

RODRIGO PIEREZAN

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE MANUFATURA EM REDE DE  
PETRI COLORIDA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, PPGEPS, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, CCET, da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, PUCPR, como requerimento para título de Mestre.

Orientador: Prof. Eduardo Alves Portela Santos

CURITIBA

2011



## RESUMO

Para se adequar aos novos cenários impostos as organizações precisaram rever as suas medidas de desempenho, tradicionalmente financeiras. Tal necessidade de adaptação demanda, até hoje, por trabalhos que indiquem como medir o desempenho das firmas. Além disso, estão sendo elaboradas novas metodologias de simulação para avaliação de processos em curto prazo, a utilização destas ferramentas pode melhorar a tomada de decisão no nível operacional. Esta pesquisa propõe uma metodologia para a simulação de eventos relativos ao desempenho de um processo produtivo de chão de fábrica, utilizando o CPN Tools. A realização de uma revisão bibliográfica mostra os modelos conceituais utilizados para a elaboração de um modelo de simulação. Assim, esta metodologia propõe um modelo formal para a simulação de eventos de máquinas e recursos de processos produtivos, com um mecanismo de escrita em arquivo para o armazenamento destes eventos, de forma que eles possam ser utilizados no cálculo de índices de desempenho. Assim podem ser aplicadas ferramentas de software para minerar os eventos e avaliar o desempenho do sistema simulado. Ao final do processo de elaboração da metodologia inicia-se o processo de validação da proposta através da execução de rodadas de simulação. Futuramente, o modelo proposto pode passar por um processo de certificação, no qual diversos especialistas avaliam o modelo em busca de possíveis falhas.

**PALAVRAS-CHAVES:** Sistemas de Manufatura, OEE, Simulação no CPN Tools

## **ABSTRACT**

Adapting to new economic scenarios requires organizations to review their traditional performance measures. It demands, up to date, work to indicate how to measure the performance of firms. In addition, new methodologies have being developed for simulating processes in short-term, the use of these tools can improve decision making at operational level. This research proposes a methodology for simulating events related to performance of factory production process, by using the CPN Tools. A literature review shows the conceptual models used for developing a simulation model. The framework proposes a formal model for simulating machine events and productive processes resources, with a logging mechanism to storage these events. The log file should be used due to performance indicators calculation. Software tools can also be applied for mining events and evaluating the performance of the simulated system. Since the methodology is proposed, the validation process starts performing simulation rounds. A future work can drive the proposed model through a certification process, allowing many specialists to analyze the model looking for possible failures.

**Key-Words:** Manufacturing Systems, OEE, CPN Tools Simulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Objetivos de simulação para processos de negócio .....	16
Figura 2 - Modelo da Pesquisa.....	17
Figura 3 - Exemplo de visualização dos objetivos estratégicos.....	25
Figura 4 - Objetivos de desempenho estratégicos e subcategorias .....	25
Figura 5 - Estrutura dos tempos de produção .....	27
Figura 6 - Distribuição dos tempos de máquina .....	27
Figura 7 - Relacionamento entre os sub-índices do OEE e as seis grandes perdas.	30
Figura 8 - Principais causas do fracasso em cumprir o planejamento. ....	30
Figura 9 - Planilha para o cálculo do mix ótimo de produtos com o OEE.....	32
Figura 10 - Configurações da ferramenta Solver para o problema.....	32
Figura 10 - Estados e transições de máquina. ....	35
Figura 11 - Estrutura das perdas pelo índice OEEML. ....	37
Figura 12 - Exemplo de um sistema de manufatura em CPN .....	39
Figura 13 - Exemplo de um log de eventos .....	41
Figura 14 - Padrão MXML .....	41
Figura 15 - Exemplo de conversão utilizando o software ProMimport.....	42
Figura 16 - Ciclo de utilização da informação de um FIS .....	43
Figura 17 - Ciclo de geração e uso dos dados de chão de fábrica.....	44
Figura 18 - Representação do Processo de Produção Produzir .....	45
Figura 20 - Metodologia de simulação proposta.....	46
Figura 21 - Arquitetura Proposta .....	48
Figura 20 - Detalhe do modelo da base de dados (para os dados reais).....	49
Figura 21 - Tabela para o armazenamento dos eventos simulados.....	50
Figura 22 - Processo Produzir.....	52
Figura 23 - Processo “Produzir” no CPN Tools .....	54
Figura 24 - Sub-Rede “Iniciar_Ordens_de_Producao” .....	55
Figura 25 - Sub-Rede “Verificar_Recursos” .....	57
Figura 26 - Sub-Rede “Trabalhar” .....	59
Figura 27 - Sub-Rede “Maquina_Inativa” .....	62
Figura 28 - Sub-Rede Retirar_Produto.....	63

Figura 29 - Sub-Rede “Inspeccionar_Produto”.....	65
Figura 30 - Sub-Rede Transportar_Produto.....	67
Figura 31 - Tela da Interface CPN/FIS.....	68
Figura 32 - Plugin do ProM para análise de padrões de sequências de eventos.....	69
Figura 33 - Passos executados para a validação do modelo.....	70
Figura 34 - Tela de cálculo do OEE na interface CPN/FIS.....	74
Figura 35 - Comportamento do OEE ao longo das replicações de simulação, com o Produto 1.....	75
Figura 36 - Precisão dos intervalos de confiança para 95% de significância para o Produto 1.....	76
Figura 37 - Comportamento do OEE ao longo das replicações de simulação, com o Produto 2.....	77
Figura 38 - Precisão dos intervalos de confiança para 95% de significância para o Produto 2.....	77
Figura 39- Detalhe da tela do sistema de monitoramento instalado na empresa do estudo de caso.....	78
Figura 40 - Evolução da precisão dos intervalos de confiança para o Caso 1.....	79
Figura 41 - Valores do OEE para as replicações do Caso 1.....	80
Figura 42 - Valores do OEE para as replicações do Caso 2.....	81
Figura 43 - Evolução da precisão dos intervalos de confiança para o Caso 2.....	81
Figura 44 - Valores do OEE para as replicações do Caso 3.....	82
Figura 45 - Evolução da precisão dos intervalos de confiança para o Caso 3.....	83
Figura 46 - Valores do OEE para as replicações do Caso 4.....	84
Figura 47 - Evolução da precisão dos intervalos de confiança para o Caso 4.....	84
Figura 48 - Valores do OEE para as replicações do Caso 5.....	85
Figura 49 - Evolução da precisão dos intervalos de confiança para o Caso 5.....	86
Figura 50 - Valores do OEE para as replicações do Caso 6.....	87
Figura 51 - Evolução da precisão dos intervalos de confiança para o Caso 6.....	87
Figura 52 - Planilha de calculo do mix ótimo com OEE adaptada para o caso 7.....	88
Figura 53 - Tela de análise do software ProM com tempos de atravessamento.....	90
Figura 54 - Tela do <i>plugin</i> “Basic Log Statistics” com os tempos médios dos eventos.....	91

Figura 55 - Tela do *plugin* “*Basic Log Statistics*” com os tempos acumulados por evento .....91

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo entre os formatos de Log de Eventos .....	51
Tabela 2 - Parâmetros de tempo obtidos a partir dos dados coletados .....	71
Tabela 3 - Probabilidades obtidas para a ocorrência dos eventos do processo produtivo .....	72
Tabela 4 - Tipos de eventos gerados pelo modelo após as simulações para o Torno CNC .....	73
Tabela 5 - Ganhos estimados para as melhorias realizadas.....	89
Tabela 6 - Parâmetros para a simulação inicial.....	90

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CPN - *Colored Petri Net*

E - *Equipment Effectiveness*

FIS - *Factory Information System*

MD - *Medição de Desempenho*

OEE - *Overall Equipment Effectiveness*

OEEML - *Overall Equipment Effectiveness of a Manufacture Line*

OFE - *Overall Factory Efficiency*

OLE - *Overall Line Efficiency*

OTE - *Overall Throughput Effectiveness*

SMD - *Sistema de Medição de Desempenho*

TEEP - *Total Effectiveness Equipment Performance*

TOEE - *Total Overall Equipment Effectiveness*

TPM - *Total Productive Maintenance*

XES - *Extensible Event Stream*

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1 PROBLEMA.....	13
1.2 OBJETIVO .....	14
1.2.1 Objetivos Específicos .....	14
1.3 JUSTIFICATIVA.....	14
1.4 CONTEXTUALIZAÇÃO .....	16
1.5 MÉTODO DE PESQUISA.....	16
1.5.1 Unidade de Análise.....	17
1.5.2 Delimitação do Trabalho.....	17
1.5.3 Justificativa da estratégia de pesquisa .....	18
1.5.4 Testes de validade.....	19
1.5.5 Seleção da amostra.....	19
1.6 PROTOCOLO DE COLETA DE DADOS .....	19
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>21</b>
2.1 MEDIÇÃO DE DESEMPENHO.....	21
2.1.1 O formalismo da área de medição de desempenho .....	21
2.2 MEDIÇÃO DE DESEMPENHO E ALINHAMENTO ESTRATÉGICO.....	22
2.3 ESTRATÉGIAS DE OPERAÇÕES .....	24
2.4 ÍNDICE DE DESEMPENHO OEE.....	26
2.4.1 Tempos de Parada .....	28
2.4.2 Tempos de Atividade .....	28
2.4.3 Taxa de Qualidade .....	29
2.4.4 Disponibilidade .....	29
2.4.5 Velocidade .....	29
2.4.6 As seis grandes perdas .....	30
2.4.7 Aplicação do OEE no cálculo do mix ótimo de produtos .....	31
2.5 OUTROS ÍNDICES DE DESEMPENHO DE CHÃO DE FÁBRICA.....	33
2.5.1 Produtividade Efetiva Total dos Equipamentos (TEEP).....	33
2.5.2 Eficácia do Equipamento (E) .....	34
2.5.3 Eficácia Global dos Equipamentos de uma Linha de Produção (OEEML) .....	35

2.6	REDES DE PETRI E RDP COLORIDAS PARA SISTEMAS DE MANUFATURA	38
2.7	MODELAGEM E SIMULAÇÃO NO CPN TOOLS .....	39
2.7.1	Geração de logs de eventos com o CPN Tools .....	40
2.8	FIS e Modelos de Operação de Sistemas de Manufatura .....	43
<b>3</b>	<b>VISÃO GERAL DA PROPOSTA .....</b>	<b>46</b>
3.1	BASE DE DADOS E LOG DE EVENTOS.....	49
3.2	MODELO DESENVOLVIDO EM REDE DE PETRI COLORIDA.....	51
3.3	UTILIZAÇÃO DO MODELO NO CPN TOOLS .....	53
3.3.1	Sub-Rede “Iniciar_Ordens_de_Producao” .....	54
3.3.2	Sub-Rede “Verificar_Recursos” .....	56
3.3.3	Sub-Rede “Trabalhar” .....	59
3.3.4	Sub-Rede “Maquina_Inativa” .....	60
3.3.5	Sub-Rede Retirar_Produto .....	63
3.3.6	Sub-Rede “Inspeccionar_Produto” .....	64
3.3.7	Sub-Rede Transportar_Produto.....	66
3.4	INTERFACE DESENVOLVIDA EM C++.....	67
3.5	FERRAMENTAS DE ANÁLISE.....	69
<b>4</b>	<b>SIMULAÇÃO .....</b>	<b>70</b>
4.1	VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO .....	70
4.1.1	Coleta de Dados .....	71
4.1.2	Análise dos dados coletados .....	71
4.1.3	Parametrização do modelo com os dados coletados .....	72
4.1.4	Simulações com os dados coletados.....	72
4.1.5	Cálculo do índice OEE a partir dos eventos gerados durante as simulações.....	73
4.1.6	Análise dos valores do OEE obtidos para o Produto 1 .....	74
4.1.7	Análise dos valores do OEE obtidos para o Produto 2 .....	76
4.1.8	Comparação com os valores reais do OEE da empresa .....	78
4.2	CASO 1 - SIMULAÇÃO DE UMA REDUÇÃO DE PARADAS OPERACIONAIS PARA O PRODUTO 1 .....	79
4.3	CASO 2 - SIMULAÇÃO DE UMA REDUÇÃO DE PARADAS OPERACIONAIS PARA O PRODUTO 2.....	80

4.4	CASO 3 - SIMULAÇÃO DE UMA REDUÇÃO DO TEMPO MÉDIO DE CICLO PARA O PRODUTO 1 .....	82
4.5	CASO 4 - SIMULAÇÃO DE UMA REDUÇÃO DO TEMPO MÉDIO DE CICLO PARA O PRODUTO 2.....	83
4.6	CASO 5 - SIMULAÇÃO DE UMA REDUÇÃO DO TEMPO SETUP PARA O PRODUTO 1 .....	85
4.7	CASO 6 - SIMULAÇÃO DE UMA REDUÇÃO DO TEMPO SETUP PARA O PRODUTO 2 .....	86
4.8	CASO 7 - LUCROS ESTIMADOS PARA AS MELHORIAS SIMULADAS .....	88
4.9	EXEMPLOS DE ANÁLISES COM O SOFTWARE PROM.....	89
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>93</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>95</b>
	<b>APENDICE A – LISTA DE DECLARAÇÕES DO MODELO .....</b>	<b>101</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O contexto histórico dos mercados mundiais estabeleceu diferentes padrões de competitividade entre as empresas. Para se adequar aos novos cenários impostos as organizações precisaram rever as suas medidas de desempenho, tradicionalmente financeiras. Tal necessidade de adaptação demanda, até hoje, por trabalhos que indiquem como medir o desempenho das firmas, conforme foi apontado por Neely (2005). Atualmente, tem-se empregado técnicas computacionais para aprimorar a medição de desempenho, o que pode ser observado em (AMIRAN, RADFAR e ZOLFANI, 2011).

Para a medição de desempenho de processos produtivos de chão de fábrica, utilizam-se como modelos estruturais os índices de desempenho, eles são valores numéricos que visam representar o desempenho do processo produtivo analisado. Dentre eles, o índice mais utilizado para estas avaliações é o OEE, *Overall Equipment Effectiveness* (Eficácia Global dos Equipamentos). Na prática, ele é utilizado por montadoras automobilísticas e por seus fornecedores para medir ações de melhoria contínua, na academia, ele é o índice de desempenho com maior número de citações nas publicações.

Apesar da grande utilização do índice OEE, a tomada de decisão em relação ao foco das ações de melhoria contínua é, de certa forma, caótico. As publicações voltadas a esta área dificilmente apontam uma justificativa numérica para a necessidade de realização de uma determinada ação de melhoria. Ou ainda, não permitem visualizar a priori o retorno que seria proporcionado por aquela melhoria. Ao mesmo tempo, na indústria ainda há muita dificuldade no entendimento da estrutura do OEE.

### 1.1 PROBLEMA

Esta pesquisa pretende buscar a resposta para o problema representado pela questão a seguir. Como modelar e simular eventos relacionados ao desempenho de um processo produtivo de chão de fábrica?

## 1.2 OBJETIVO

Esta pesquisa tem como objetivo principal propor uma metodologia para a simulação de eventos relativos ao desempenho de um processo produtivo de chão de fábrica, utilizando Rede de Petri Colorida.

### 1.2.1 Objetivos Específicos

Com o intuito de se atingir o objetivo principal desta pesquisa, foram estabelecidos alguns objetivos específicos:

- Buscar, na literatura, modelos conceituais de estados de máquinas e processos produtivos de manufatura para serem utilizados como modelos de referência;
- Conceber modelos formais de máquinas e equipamentos;
- Conceber um mecanismo de armazenamento em arquivo dos eventos usados no cálculo de índices de desempenho;
- Simular cenários de melhoria específica no processo produtivo
- Utilizar programas de computador para minerar os eventos e avaliar o desempenho do sistema simulado.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Uma ferramenta de simulação pode auxiliar o processo de tomada de decisão em relação aos resultados apontados por um FIS, *Factory Information System*, (Sistema de Informação de Fábrica). Se este auxílio ocorrer no nível operacional, então ações de curto prazo podem ser tomadas para manter a unidade de negócios no rumo proposto pela estratégia corporativa. Logo, pode-se minimizar os impactos das perdas de desempenho, internas ao processo de manufatura, sobre as estratégias competitivas da organização, como por exemplo os prazos de entrega.

Os modelos conceituais encontrados na literatura tratam apenas as sequências de operação da máquina, sendo particulares a cada máquina. Assim, um modelo que seja capaz de representar, da forma mais padronizada possível, as possibilidades de ocorrência de falhas e perdas de desempenho nestes sistemas, poderá ser reaproveitado para outros casos.

Conforme é mostrado a Figura 1, de Veldhoen (2011), quando a simulação é direcionada a ações de curto prazo, como suporte à tomada de decisão operacional,

a utilização da modelagem manual não é recomendada. As ações de melhoria de processos produtivos de sistemas de manufatura ocorrem em curto prazo, então uma metodologia semelhante à *Short-term Simulation* se faz necessária. Esta metodologia propõe a geração automatizada de modelos a partir de arquivos com registros de eventos dos processos em estudo. De forma semelhante à metodologia citada, o modelo proposto neste trabalho deve ter uma estrutura padronizada para alguns sistemas de manufatura, de forma que apenas os seus parâmetros numéricos sejam adaptados a cada caso, os quais poderiam ser informados facilmente de forma automatizada.

Para que seja possível avaliar cenários de simulação envolvendo ações de melhoria, é necessário utilizar uma ferramenta que possibilite modelar os possíveis eventos relativos às perdas de desempenho de um processo produtivo. A aplicação de Redes de Petri Coloridas no desenvolvimento de modelos de fluxo de trabalho já é significativamente demonstrada na literatura. Assim como as simulações deste tipo de modelo no software CPN Tools, (CPN Tools, 2011).

Pela possibilidade de integração e customização dos modelos desenvolvidos no CPN Tools é, ele será utilizado como ferramenta principal de desenvolvimento do trabalho. Da mesma forma, pode ser visto o software ProM, (ProM, 2011), nas análises de Logs de eventos. Por serem aplicativos de códigos abertos e livres de licenças, não acumulam custos para a pesquisa e estão em um constante processo de atualização. Processo este desenvolvido, principalmente, pela área acadêmica, o que confere maior fundamentação teórica e prática às ferramentas de modelagem e análise que estes aplicativos oferecem.

Figura 1 - Objetivos de simulação para processos de negócio

		Propostas para a simulação de processos de negócio	
Mineração de Processos	Manualmente Construídos	X	Tomada de decisão estratégica (proposta tradicional de simulação de processos de negócio)
	Processos	Suporte à decisão operacional	Tomada de decisão estratégica
		Curto Prazo	Longo Prazo

Fonte: Veldhoen, 2011

De outro ponto de vista, o desenvolvimento de um modelo conceitual padronizado, para processos produtivos de sistemas de manufatura, permitirá padronizar a visão que se tem sobre estes processos. Desta forma, testes de aplicações de novos índices de desempenho poderiam ser realizados no próprio modelo, reduzindo o tempo de desenvolvimento de algumas pesquisas realizadas nesta área.

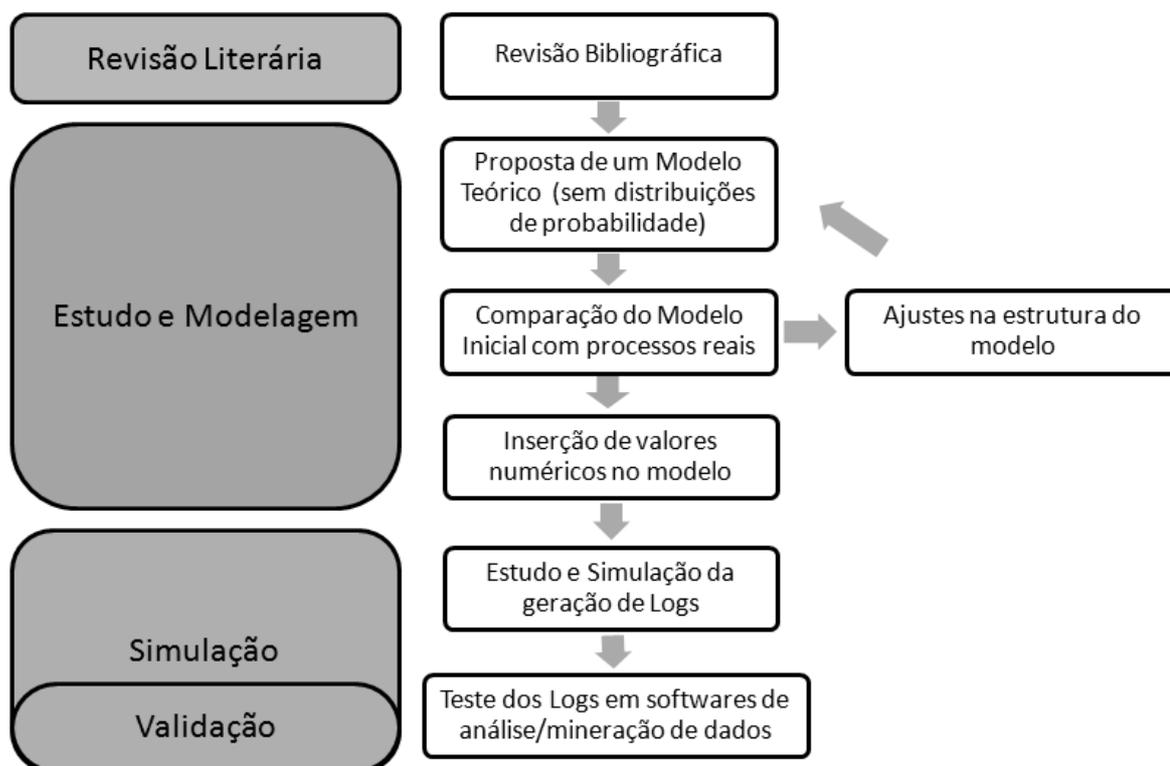
#### 1.4 CONTEXTUALIZAÇÃO

Tradicionalmente a simulação de processos era aplicada para o auxílio na tomada de decisão no longo prazo, visando o alinhamento da visão estratégica da unidade de negócios. Conforme foi proposto por Reijers e Aalst (1999), a simulação de curto prazo pode auxiliar a tomada de decisão no nível operacional, com o auxílio de sistemas de monitoramento e controle do fluxo de trabalho.

#### 1.5 MÉTODO DE PESQUISA

Nos itens a seguir será estruturada a estratégia de pesquisa utilizada durante o desenvolvimento do trabalho. As principais ferramentas utilizadas neste processo serão a modelagem e a simulação, com foco em sistemas produtivos. Como instrumento auxiliar será utilizada a Revisão Bibliográfica, dela deverão ser obtidas as informações básicas para composição da estrutura do modelo que será proposto.

Figura 2 - Modelo da Pesquisa



Fonte: o autor, 2011

### 1.5.1 Unidade de Análise

Para avaliar os efeitos das alterações dos parâmetros do modelo nas rodadas de simulação serão calculados os índices OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) para cada máquina simulada no modelo, com os eventos gerados pela simulação. Na sequência, estes índices serão avaliados em uma função custo que vise um ótimo global para o processo produtivo analisado. Os arquivos com registros de eventos gerados também serão analisados com o auxílio do software ProM.

### 1.5.2 Delimitação do Trabalho

Primeiramente, o estudo conceitual de caráter exploratório estará restrito ao levantamento dos principais modelos de medição de desempenho em formato de índice e referentes a processos produtivos de chão de fábrica. Nesta mesma etapa, serão levantadas as principais informações referentes aos estados de operação dos processos produtivos de um sistema de manufatura. Assim como as principais fontes de perda de desempenho encontradas neste contexto.

Ainda na fase conceitual, serão levantadas as principais formas de caracterização da estratégia da manufatura. Neste processo, não será abordado o tratamento dado a estratégia de manufatura em modelos que não sejam enquadrados como índices de desempenho de processos produtivos de chão de fábrica.

Os dados que serão levantados em campo devem ser fornecidos por empresas do Paraná e de Santa Catarina, próximas à região de Curitiba. Pois, devido à interatividade das etapas da pesquisa, é interessante que se possa visitar as empresas frequentemente. Além, disso, as empresas que forem estudadas devem possuir sistemas de banco de dados com as informações relativas aos eventos de máquina, as quais devem estar acessíveis ao pesquisador.

### **1.5.3 Justificativa da estratégia de pesquisa**

A estratégia de pesquisa é, basicamente, fundamentada na modelagem e simulação, entretanto, a metodologia de pesquisa fará uso de um padrão flexível. Devido à falta de um modelo de referência para a simulação dos eventos relativos à máquina e ao sistema de manufatura na qual ela se encontra, inicialmente, o trabalho será realizado no formato de uma revisão bibliográfica, um perfil exploratório.

Após o levantamento dos principais requisitos do modelo que será proposto, a modelagem poderá ser iniciada, juntamente com algumas simulações parciais do modelo, conforme é recomendado por Chwif e Medina (2006). De forma a se realizar um refinamento do modelo, alguns casos (processos produtivos de um sistema de manufatura) deverão ser observados, e assim, o modelo será realimentado.

O estudo de múltiplos casos ainda se faz necessário para o levantamento de diferentes curvas de eventos estocásticos. Estas informações serão carregadas no modelo de forma que se possa trabalhar de forma mais aproximada da realidade. Estes dados também podem ser utilizados para uma posterior validação do modelo. Isto confere maior robustez à metodologia de simulação proposta, uma vez que se pretende não restringir o modelo de simulação à um sistema de manufatura em particular.

#### **1.5.4 Testes de validade**

A validação do modelo proposto será iniciada com a verificação do atendimento dos requisitos de medição de desempenho propostos pela literatura. Na sequência, será verificada capacidade de simulação de eventos a partir do modelo proposto, com base na coleta de dados históricos de sistemas de medição de desempenho de chão de fábrica. Estas informações servirão como base para o cálculo dos índices de desempenho citados na Unidade de Análise. A eficiência dos modelos será dada pelo desempenho refletido nos indicadores da análise.

#### **1.5.5 Seleção da amostra**

Os dados que serão utilizados na pesquisa deverão ser relativos a uma empresa localizada no território nacional, de forma a viabilizar os custos da pesquisa, e que possua um sistema de medição de desempenho de processos produtivos de chão de fábrica. Dentro dela será avaliada uma máquina e alguns dos produtos que são processados por ela. De forma que seja possível observar a influência destes diferentes produtos no valor do OEE calculado para estas máquinas.

Desta forma, a amostra não poderá ser escolhida de forma totalmente aleatória. Pois na região delimitada pelo escopo de trabalho não há muitas empresas que dispõem de sistemas de medição de desempenho de acordo com o que foi especificado. Ficando definido como critério de escolha, a facilidade de acesso à informação requerida.

### **1.6 PROTOCOLO DE COLETA DE DADOS**

Para a coleta de dados serão selecionadas as empresas que atenderem às especificações anteriores. Na sequência será feito um contato inicial para conhecimento do processo e dos sistemas que fazem o registro dos eventos de chão de fábrica que estão relacionados ao desempenho dos seus processos produtivos. Se os sistemas de manufatura avaliados possibilitarem a realização do estudo, então, um novo contato será feito com o intuito de se obter uma autorização para o acesso e utilização das informações na pesquisa.

Algumas das informações necessárias à pesquisa não estão disponíveis nos softwares de interface dos FIS, então em alguns casos talvez seja necessário possuir autorização para acessar a base de dados onde os dados se encontram.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos teóricos envolvidos na pesquisa. Inicialmente será abordada a medição de desempenho. Seguindo-se com o alinhamento estratégico, indicadores de desempenho processos produtivos e modelagem e simulação de sistemas de manufatura com a ferramenta CPN Tools, (CPN Tools, 2011).

### 2.1 MEDIÇÃO DE DESEMPENHO

A medição de desempenho, MD, há algum tempo é uma área em expansão para pesquisas, entre 1994 e 1996, 3615 artigos foram publicados a respeito deste assunto, e em 1996, dois livros eram publicados por semana apenas nos EUA (NEELY, 1999). Este assunto é considerado multidisciplinar o que resulta no aumento do grau de complexidade para o desenvolvimento de pesquisas, além disso, a expansão inter-organizacional tem se apresentado como a próxima fronteira para a evolução deste tema. A seguir são apresentadas as principais fases da concepção de um sistema de MD, Medição de Desempenho, e o formalismo existente entre elas.

#### 2.1.1 O formalismo da área de medição de desempenho

Neste item será apresentado o formalismo proposto por Folan e Browne (2005). Inicialmente são estabelecidos os requisitos de MD, que têm por objetivo definir as questões em torno da medição de desempenho e da concepção de modelos e sistemas de medição de desempenho. As medidas que devem ser selecionadas, antes de tudo, devem ser discutidas com a alta administração, para que haja um alinhamento com as estratégias da empresa.

Das recomendações que são encontradas na literatura podem-se citar duas como exemplos de requisitos de MD. A primeira, medidas de desempenho “devem ser quantitativas” e a segunda, “devem utilizar técnicas não financeiras”. Em relação às recomendações para modelos e sistemas de MD, pode-se utilizar como exemplo a seguinte, “devem medir por completo o sistema de transferência do produto, do fornecedor ao consumidor”, o autor apresenta uma tabela com outras trinta e uma.

A partir do momento em que os requisitos estão definidos, os modelos de MD podem ser definidos, a modelagem pode ser tanto de natureza estrutural quanto processual. Na primeira, é definida a tipologia para as medidas de desempenho, a passo que, na segunda, são definidas as etapas a serem cumpridas durante a MD. A “Matriz de MD”, proposta por Keegan, Eiler e Jones (1989), e o “Balance Scorecard”, proposto por Kaplan e Norton (1996), são exemplos de *framework* (modelos) estruturais, e o “10 Step Model” de Medori e Steeple (2000) é um *framework* processual.

O passo seguinte é a elaboração de sistemas de medição de desempenho, SMDs, a partir dos requisitos e modelos definidos anteriormente. Para que os SMDs sejam bem sucedidos, é necessário que sejam compostos por, no mínimo, um *framework* estrutural e um processual em conjunto. Onde, o primeiro estabelece o que é medido e o segundo como são realizadas as MDs. Pode-se citar o “Balanced Scorecard” como SMD também, sendo este uma aplicação do modelo estrutural citado anteriormente.

Outro campo de rápido crescimento na literatura é a MD inter-organizacional (NEELY, 2005), onde diferentes unidades produtivas compõem o desenvolvimento do produto. Os arranjos destas podem seguir o modelo de cadeia de suprimentos ou de empreendimento expandido, sendo que a aplicação de cada um depende da natureza do negócio. Por exemplo, o modelo *extended enterprise* é adequado quando se trata de empresas de serviços, mas não quando se fala em uma metalúrgica.

Contudo, um sistema de MD de *extended enterprise* necessita de um *framework* robusto de cadeia de suprimentos. Entretanto, a forma como os sistemas são concebidos permitirá, ou não, a implementação da gestão de desempenho. Esta é responsável pela utilização das medidas de desempenho para uma mudança positiva na cultura, sistemas e negócios organizacionais.

## 2.2 MEDIÇÃO DE DESEMPENHO E ALINHAMENTO ESTRATÉGICO

De acordo com Kathuria, Joshi e Porth (2007), o alinhamento da estratégia com muitas atividades é fundamental para alcançar e manter a vantagem competitiva. Ele possui tanta importância na formulação de estratégias quanto na implementação das mesmas. O livro “*In Search of Excellence*” de Peters e Waterman (1988), mostra que quando as empresas conseguem harmonizar

estratégia, estrutura e sistemas e os fatores mais flexíveis, elas apresentam maior desempenho. Ou ainda, atingem a excelência. Para que o alinhamento possa existir é necessário que os gestores de diversos níveis e diversas unidades da mesma empresa compartilhem o conhecimento das metas e objetivos da organização. Na literatura, podem-se encontrar dois tipos de alinhamento. O vertical, que define as configurações de estratégia e objetivos ao longo de todos os níveis organizacionais. E o horizontal (ou lateral), que requer comunicação e cooperação entre várias atividades funcionais.

A literatura mais antiga de Likert (1961) apresentou trabalhos conceituais e teóricos a respeito do alinhamento organizacional. Por exemplo, enfatizando a importância de coordenar as prioridades e estratégias da organização em três níveis hierárquicos, corporação, negócios e funcional. Ainda neste contexto, a manufatura era mal entendida, e esquecida ou inconsistente com a estratégia de negócios.

Um pouco mais tarde, de acordo com Miller (1986), entendeu-se que havia uma leve inconsistência da missão da área de manufatura e da estratégia de negócios. Este conflito pode ser atribuído à falta de uma medida de alinhamento refinada, tal fato foi solucionado ainda nos anos 90 (MILLER, 1996).

Estudos foram realizados para identificar a relação entre o desempenho e o alinhamento e coerência de forma vertical, através dos quais, foi encontrada uma relação monotônica entre coerência e desempenho, em um dos estudos de caso realizados (NATH e SUDHARSHAN, 1994). Outros estudos revelaram que o alinhamento entre os aspectos estratégicos e operacionais foram mais evidentes em empresas de sucesso e ainda, que na medida em que o alinhamento era mais expressivo o desempenho também aumentava. Portanto, o desempenho foi considerado positivamente proporcional ao alinhamento vertical da organização (CHAN, SABHERWAL e THATCHER, 2006).

Outros estudos foram realizados no sentido de verificar a relação existente entre o alinhamento horizontal e o desempenho. Um dos resultados encontrados apontou que o sucesso de uma empresa necessariamente depende do alinhamento entre a inovação do produto e as prioridades competitivas da área de fabricação. A partir da observação da empresa "*Southwest Airlines*", pode ser observado o alinhamento horizontal não alcançado pela concorrência. É possível dizer que há a necessidade de se desenvolver estudos para determinar a relação existente entre desempenho e alinhamento horizontal (KATHURIA, JOSHI e PORTH, 2007).

Apesar de alguns estudos apontarem a relação existente entre desempenho e alinhamento, ainda não é possível dizer que fatores, pertinentes ao contexto de alinhamento, estão diretamente ligados ao desempenho. Apenas há a indicação da presença de algumas variáveis que agem indiretamente sobre o desempenho.

A cooperação entre os gerentes gerais e os gerentes de manufatura pode retornar resultados positivos e que a descentralização foi negativa. Assim como o alinhamento pode ser especialmente crítico na presença de novos gestores. Na área de negócios, verificou-se que o alinhamento vertical dos sistemas de informação com as estratégias de negócios contribui positivamente no desempenho da organização (KATHURIA, JOSHI e PORTH, 2007).

### 2.3 ESTRATÉGIAS DE OPERAÇÕES

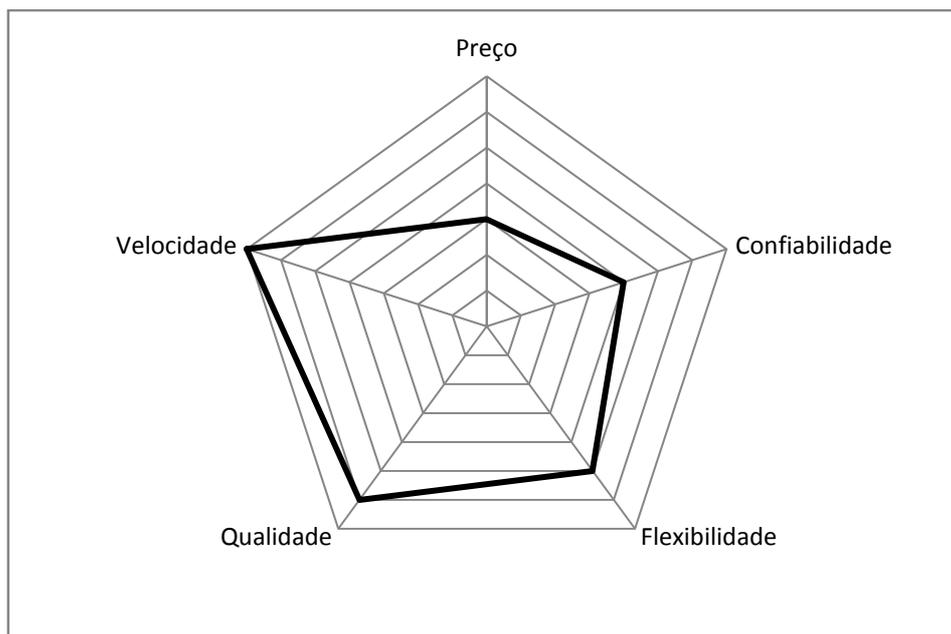
O que caracteriza a forma como uma empresa irá planejar os seus produtos e serviços, de forma que eles se adaptem ao mercado, são os objetivos de desempenho. Conforme é mostrado por Slack, Chambers e Johnston (2002), há cinco objetivos principais. São eles: preço, confiabilidade (entrega), flexibilidade, qualidade e velocidade.

Frohlich e Dixon (2001) mostram como os três principais perfis estratégicos<sup>1</sup> “marqueteiros”, “conservadores” e “inovadores” das empresas se moldam a estes objetivos. Na Figura 3 é mostrado um exemplo de visualização dos objetivos estratégicos de desempenho, a partir de um gráfico de radar, no qual é possível observar que qualidade e velocidade possuem maior peso sobre a estratégia da empresa em relação aos demais objetivos. Frohlich e Dixon (2001) também propõem algumas subdivisões para estes critérios, conforme a Figura 4.

---

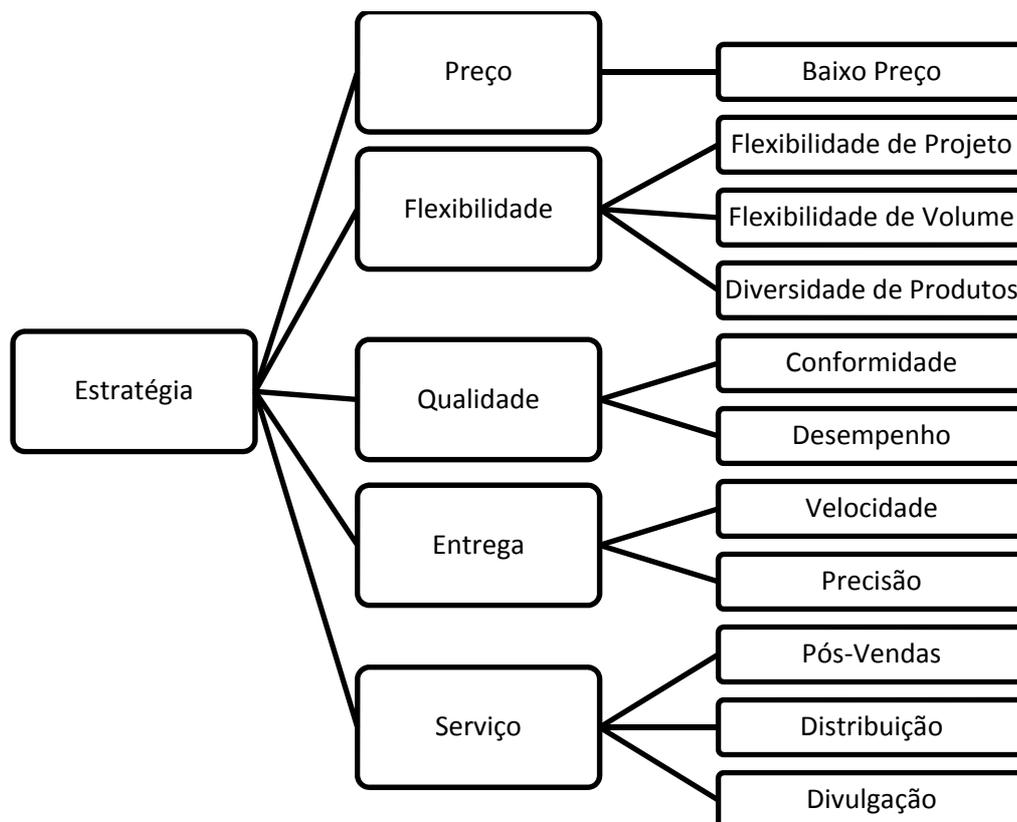
<sup>1</sup>Os três perfis estratégicos foram identificados por Miller e Roth no final da década de 80 e publicados por Miller e Roth (1994).

Figura 3 - Exemplo de visualização dos objetivos estratégicos



Fonte: Adaptado de SLACK, CHAMBERS e JOHNSTON, 2002.

Figura 4 - Objetivos de desempenho estratégicos e subcategorias



Fonte: Adaptado de FROHLICH e DIXON, 2001.

Não foi encontrado algum material que relacionasse estes objetivos de desempenho com os índices de desempenho apresentados a seguir. Há apenas um relacionamento entre os índices e os custos de produção. Um exemplo disto é a

pesquisa de Juric, Sánchez e Goti (2006), onde a componente de custo de cada sub-índice do OEE é analisada.

## 2.4 ÍNDICE DE DESEMPENHO OEE

Com o objetivo de aumentar a competitividade, as empresas passaram a adotar novos métodos para identificar as perdas ocorridas durante os processos de fabricação, onde se destaca a Eficiência Global dos Equipamentos (OEE), proposto por Nakajima (1988). Para a obtenção deste índice, é necessário quantificar tempos de parada, tempos de atividade e taxa de qualidade dos equipamentos e linhas de produção.

A principal aplicação do OEE consiste, de forma resumida, em promover a melhoria contínua no sistema produtivo. A maneira pela qual isto deve ocorrer consiste, inicialmente, em medir o desempenho do equipamento para identificar as suas ineficiências. Na sequência são aplicados os conceitos defendidos pela TPM, *Total Productive Maintenance* (Manutenção Produtiva Total). E, novamente, o desempenho do equipamento é quantificado, como forma de avaliar as ações tomadas.

De acordo com Hansen (2006), o OEE tem como função medir a efetividade das programações de produção planejadas, indicando fatores de produtividade, desempenho e qualidade. Ele é o produto entre disponibilidade, eficiência e taxa de qualidade do equipamento ou da linha de produção.

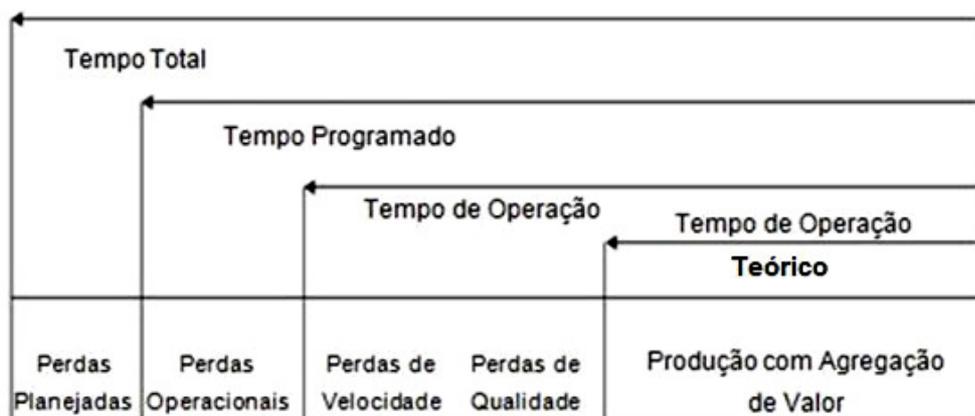
$$\text{OEE} = \text{Disponibilidade} \times \text{Taxa de Velocidade} \times \text{Taxa de Qualidade}$$

Ele também pode ser calculado como a relação entre o tempo teórico e o tempo real para a produção de uma determinada quantidade de produtos. Esta relação é mostrada a seguir.

$$\text{OEE} = \frac{\text{Tempo de Operação Teórico}}{\text{Tempo Programado}}$$

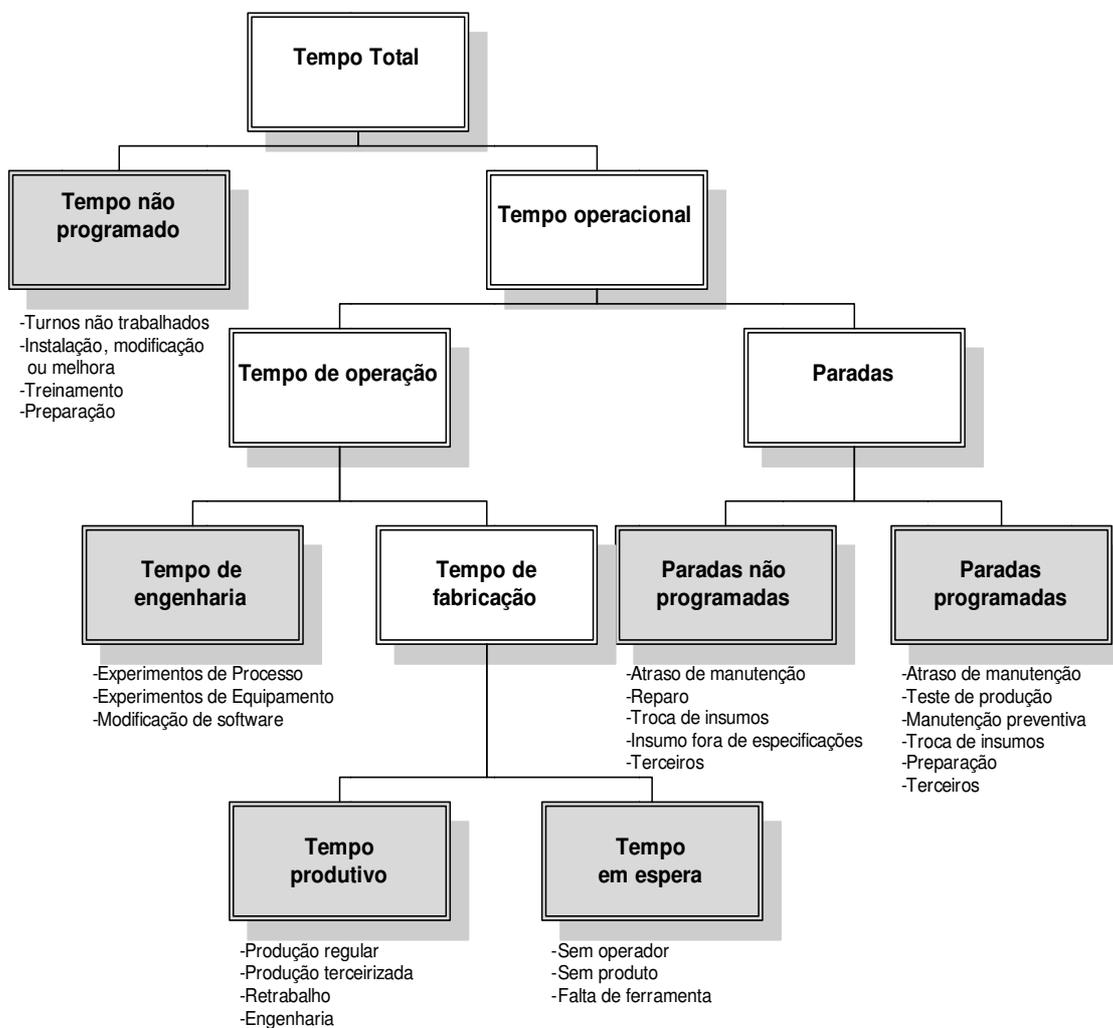
A Figura 5 mostra a estrutura dos tempos relacionados aos processos produtivos, assim como as perdas relacionadas a eles de acordo com a visão de Hansen (2006). De forma semelhante, os tempos de máquina são representados de acordo com o padrão proposto em SEMI E10 (2001). Esta estrutura é mostrada na Figura 6, neste caso estão contidos alguns exemplos dos eventos que compõem estes tempos.

Figura 5 - Estrutura dos tempos de produção



Fonte: Adaptado de HANSEN, 2006.

Figura 6 - Distribuição dos tempos de máquina



Fonte: Adaptado de SEMI E10, 2001.

### 2.4.1 Tempos de Parada

Os tempos de parada são gerados pelo somatório entre paradas programadas, quando a interrupção foi prevista durante o planejamento, e não-programadas, geradas por falhas técnicas ou operacionais, paradas induzidas ou pela falta de qualidade.

Para a medição do tempo não-produtivo do processo é feita a seguinte classificação:

- Tempo Excluído, é o tempo programado para não produzir, utilizado para manutenção preventiva, tempo livre ou falta de programação de produção. Porém deve incluir tempo não-planejado, quando os pedidos são concluídos antes do tempo previsto, com o objetivo de indicar melhorias na performance do processo.
- Tempo de Parada Operacional, parada planejada para ações operacionais como, por exemplo, a preparação do sistema para a troca de produto ou testes-padrão.
- Tempo de Parada Induzida, parada não-planejada, por razões externas à linha, como falta de pessoal, de informações ou de matéria prima.
- Falha Técnica, parada não programada por falha no equipamento.
- Falha Operacional, parada não-programada causada por erros nos procedimentos operacionais.
- Falha da Qualidade, parada não-planejada causada por matérias primas ou ferramentas fora das especificações.

### 2.4.2 Tempos de Atividade

Envolve todos os tempos de atividade da linha de produção, sejam eles medidos ou calculados teoricamente. Para o cálculo da OEE, utiliza-se tempo operacional, tempo de ciclo ideal e tempo de ciclo real.

Os tempos em que a linha apresenta atividade são classificados a seguir:

- Tempo Total é todo o tempo de calendário.
- Tempo Operacional é a porção de tempo em que o equipamento está efetivamente produzindo. É obtido retirando-se o tempo não-produtivo do tempo total.

- Tempo de Ciclo Ideal, tempo de projeto para a execução de determinada tarefa, é o melhor tempo que um equipamento pode atingir.
- Tempo de Ciclo Real, tempo gasto para a realização da tarefa. É obtido pela razão entre o tempo operacional e a quantidade total de unidades produzidas.

### 2.4.3 Taxa de Qualidade

A taxa de qualidade tem a função de qualificar a produção durante o cálculo da OEE. Ela é calculada pela razão entre a quantidade boa de produtos produzidos pela quantidade total de produtos produzidos.

$$\text{Taxa de Qualidade} = \frac{\text{Unidades Boas Produzidas}}{\text{Total de Unidades Produzidas}}$$

### 2.4.4 Disponibilidade

A disponibilidade indica a porção de tempo que o equipamento fica disponível em relação ao tempo programado. Ela pode ser calculada pela razão entre o tempo operacional e o tempo programado.

$$\text{Disponibilidade} = \frac{\text{Tempo Total} - \text{Tempo Excluído} - (\sum \text{Falhas} + \sum \text{Tempos de Paradas})}{\text{Tempo Total} - \text{Tempo Excluído}}$$

### 2.4.5 Velocidade

O indicador de eficiência de performance, ou taxa de velocidade, tem como objetivo representar a relação entre o desempenho de projeto e o desempenho real do equipamento. Ele possui como base os tempos de ciclo e pode ser calculado pela razão entre o tempo de ciclo teórico e o tempo de ciclo real.

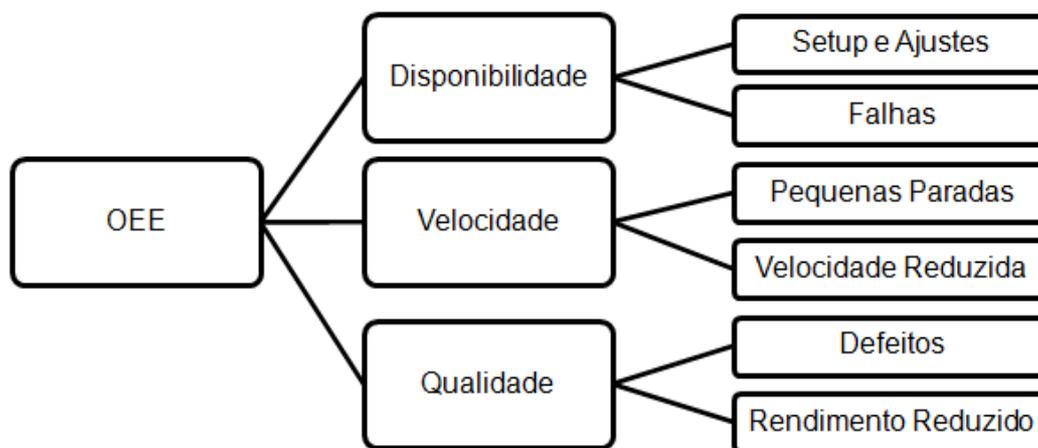
$$\text{Taxa de Velocidade} = \frac{\text{Tempo de Ciclo Teórico}}{\text{Tempo de Ciclo Real}}$$

Após o cálculo do OEE, obtém-se um valor que representa o desempenho do equipamento em relação às condições planejadas para as operações. Isto é representado através de uma taxa que varia de zero a cem por cento. Assim, a parcela que deve ser somada ao OEE para atingir o valor máximo desta escala é assumida como perda. No item a seguir serão apresentadas as seis grandes perdas.

## 2.4.6 As seis grandes perdas

De acordo com os conceitos relacionados ao OEE, as perdas encontradas em um sistema de produção em massa podem ser classificadas em seis grupos principais. Estes grupos estão relacionados aos sub-índices que compõem o OEE, conforme mostra a Figura 7.

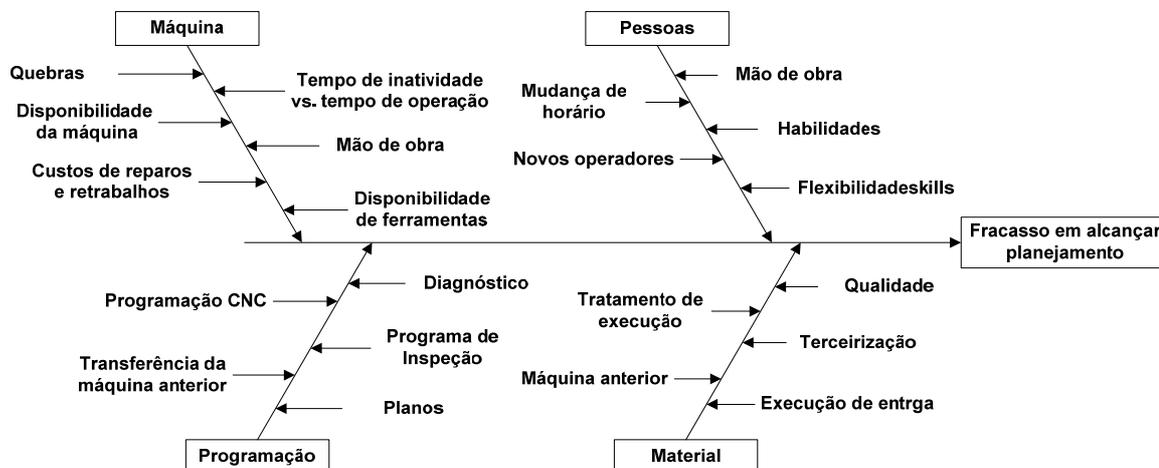
Figura 7 - Relacionamento entre os sub-índices do OEE e as seis grandes perdas.



Fonte: Adaptado de BRAGLIA, FROSOLINI e ZAMMORI, 2009.

O trabalho realizado por Bamber, et al (2003), apontou as principais fontes geradoras destas perdas de desempenho. Na Figura 8, é possível observar um diagrama de Causa e Efeito, no qual os principais responsáveis pelo não cumprimento do planejamento da produção são: máquina, programação, pessoas e material.

Figura 8 - Principais causas do fracasso em cumprir o planejamento.



Fonte: BAMBER, et al, 2003.

Também é possível observar algumas das perturbações geradas por estes agentes. Como o OEE é utilizado para avaliar o desempenho do processo produtivo em relação ao tempo programado, os problemas que atrapalham o cumprimento da produção planejada também são responsáveis pela redução do valor do índice OEE.

#### **2.4.7 Aplicação do OEE no cálculo do mix ótimo de produtos**

É comum encontrar trabalhos de aplicação do OEE com o foco na avaliação do desempenho após a realização de melhorias nos processos avaliados, mas o OEE também pode ser utilizado no planejamento do mix ótimo de produção, conforme pode ser visto em (PIEREZAN et al., 2010). Nesta aplicação foi utilizada uma planilha de cálculo do Lucro Total de uma empresa em função de um mix de produção de dois produtos.

Dadas as restrições de demanda do mercado consumidor e tempo programado para a operação das máquinas que compõem este sistema, o cálculo do mix ótimo é realizado a partir da otimização de uma função custo, com o objetivo de maximizar o Lucro Total. Esta planilha é mostrada na Figura 9. Neste caso, a estratégia utilizada para definir o mix foi apenas a maximização do Lucro Total, porém, para o cálculo do mix de produção podem ser considerados outros fatores relacionados às estratégias de operações, vistas anteriormente.

Esta aplicação visa auxiliar o planejamento da produção, ou ainda, pode ser utilizada para avaliar, de forma global, os impactos gerados por melhorias específicas nos equipamentos de um sistema de manufatura. Sabendo-se que o Lucro Total é um indicador financeiro, é possível verificar de forma objetiva custo/benefício de um projeto de melhoria de desempenho a ser realizado em um equipamento ou em um conjunto de máquinas.

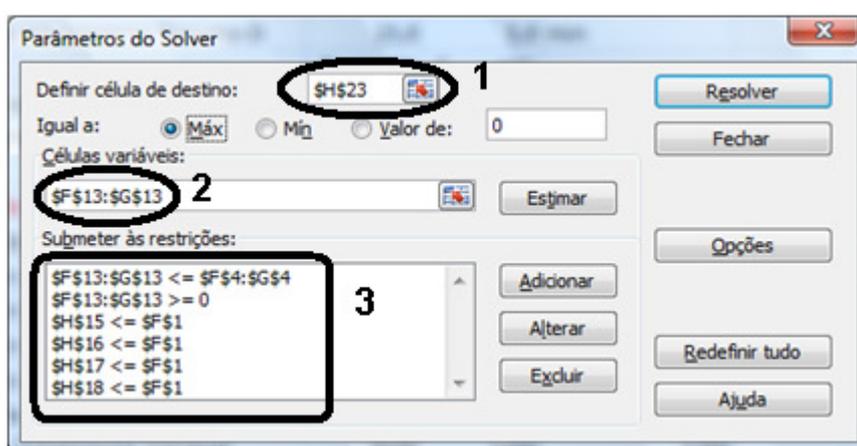
Os dados inseridos na planilha do Excel foram então relacionados com os parâmetros da ferramenta Solver, conforme a Figura 10. Nesta tela foram configurados três campos. <sup>1</sup>A variável que deveria ser otimizada, neste caso, o Lucro que deveria ser maximizado. <sup>2</sup>As células variáveis, onde estão localizadas as quantidades a serem produzidas. <sup>3</sup>As restrições lógicas, de mercado e de processo, onde produção é definida como positiva e menor que a demanda, assim como, os processos não podem exceder o tempo disponível para a produção.

Figura 9 - Planilha para o cálculo do mix ótimo de produtos com o OEE

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Tempo Teórico (min)				Restrição da Produção	2400		minutos/semana	
2		Produto P	Produto Q						
3	Recurso A	15	10			Produto P	Produto Q		
4	Recurso B	15	30		Demanda Máxima	100	50	un./semana	
5	Recurso C	15	5		Tempo em processo Recurso A	15,0	10,0	min	
6	Recurso D	15	5		Tempo em processo Recurso B	15,0	30,0	min	
7					Tempo em processo Recurso C	15,0	5,0	min	
8					Tempo em processo Recurso D	15,0	5,0	min	
9	Desempenho - OEE (%)				Preço	\$ 90	\$ 100		
10		Produto P	Produto Q		Custo var Unitário	\$ 45	\$ 40		
11	Recurso A	100%	100%		Margem de Contribuição Unitária	\$ 45	\$ 60		
12	Recurso B	100%	100%						
13	Recurso C	100%	100%		Solução (Produção)	100,00	30,00	unidades	
14	Recurso D	100%	100%		Participação no mix	76,9%	23,1%		
15					Tempo em processo Recurso A	1500,0	300,0	1800,0 min	
16					Tempo em processo Recurso B	1500,0	900,0	2400,0 min	
17	Tempo Real (min)				Tempo em processo Recurso C	1500,0	150,0	1650,0 min	
18		Produto P	Produto Q		Tempo em processo Recurso D	1500,0	150,0	1650,0 min	
19	Recurso A	15,0	10,0		Receita	9000	3000	12000	
20	Recurso B	15,0	30,0		-Custo Totalmente Variável	4500	1200	5700	
21	Recurso C	15,0	5,0		=Margem de Contribuição Líquida	4500	1800	6300	
22	Recurso D	15,0	5,0		-Despesas fixas			6000	
23					=Lucro Total			300	

Fonte: Pierezan, et al, 2010.

Figura 10 - Configurações da ferramenta Solver para o problema



Fonte: Adaptado de Pierezan et al., 2010.

A restrição da demanda é definida pelos campos ao lado de “Demanda Máxima” na planilha da Figura 9, desta forma, os valores apresentados ao lado do campo “Solução” devem ser inferiores a esta restrição. Enquanto que a restrição da capacidade produtiva é calculada em função do tempo programado para a produção,

2400 minutos, ou cinco dias de trabalho com oito horas programadas, neste caso. Assim, a soma do “Tempo em Processo” dos dois produtos em cada recurso não pode ser superior a 2400 minutos. O “Tempo em Processo” do produto em um determinado recurso é definido pela multiplicação do “Tempo Real” deste produto neste recurso, pela quantidade de peças do mesmo produto no campo “Solução”.

O *mix* ótimo calculado foi de 100 unidades do produto P e 30 do produto Q. Com isso, a participação P na produção seria de 76,9% restando 23,1% para Q. O Lucro obtido para este mix seria de \$300.

Além do OEE outros índices de desempenho já foram propostos para serem utilizados no chão de fábrica. As definições e aplicações de alguns deles serão discutidas no item a seguir.

## 2.5 OUTROS ÍNDICES DE DESEMPENHO DE CHÃO DE FÁBRICA

Após a proposta do OEE foram publicados outros índices de desempenho fundamentados na estrutura de cálculo deste índice. De acordo com os materiais encontrados, as novas propostas têm como objetivo melhorar alguns aspectos relativos ao conceito do OEE. As melhorias em questão serão apresentadas nos itens a seguir, juntamente com os índices propostos.

### 2.5.1 Produtividade Efetiva Total dos Equipamentos (TEEP)

O índice TEEP, *Total Effectiveness Equipment Performance*, mede a efetividade total do equipamento em relação ao tempo total. Ele possui uma estrutura de cálculo muito semelhante ao OEE. Para o cálculo deste, utiliza-se a disponibilidade do equipamento, e para aquele, a atividade. Enquanto o OEE quantifica o desempenho do equipamento durante o período programado, o TEEP considera também o período perdido por falta de programação, conforme mostrado por Hansen (2006).

TEEP = Atividade x Taxa de Velocidade x Taxa de Qualidade

$$\text{TEEP} = \frac{\text{Tempo de Operação Teórico}}{\text{Tempo Total}}$$

Esta forma de quantificar o desempenho dos equipamentos já havia sido apontada por Ljungberg (1998). A atividade do equipamento é definida como razão entre o tempo de operação teórico e o tempo total, conforme é mostrado a seguir.

$$\text{Atividade} = \frac{\text{Tempo de Operação}}{\text{Tempo Total}}$$

Por incorporar as perdas por falta de programação, o TEEP apresentará um valor menor ou igual ao OEE. Na sequência é apresentado um índice que apresenta valores maiores ou iguais ao OEE, pois ele não agrega algumas perdas. Deve-se observar que a condição de igualdade seria verificada, nos dois casos, apenas quando as perdas adicionadas ou retiradas dos índices fossem nulas.

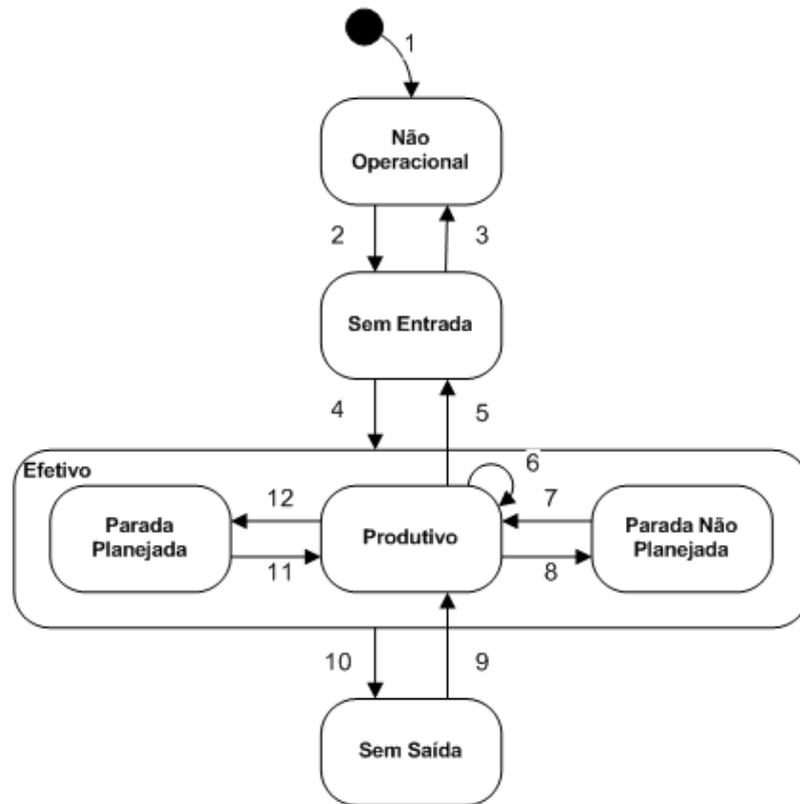
### **2.5.2 Eficácia do Equipamento (E)**

Este índice foi proposto com a finalidade de se isolar o cálculo do desempenho de uma máquina, dos outros fatores ligados ao contexto em que ela se encontra. Eles geram eventos que reduzem o valor obtido com o cálculo do OEE. Isto pode induzir a pensar que o desempenho da máquina é inferior ao que ela é realmente capaz de trabalhar. Este foi o principal argumento utilizado por Ron e Rooda (2005) na proposta da Eficácia do Equipamento (E).

Entretanto, isto não torna incorreto o cálculo do OEE. Neste caso, o que se busca é um ponto de vista diferente àquele proposto por Nakajima, com o qual se pretendia avaliar o processo de forma global. Dada a importância desta visão generalizada do processo para a verificação das ações de melhoria contínua, as quais afetam, também, os elementos da linha de produção externos à máquina.

Além de apresentar o cálculo deste novo índice, Ron e Rooda (2006) apresentam um modelo de estados e transições que visa representar o comportamento genérico de uma máquina de um sistema de manufatura. O diagrama da Figura 11 mostra os estados nos quais o tempo de máquina é efetivo ou não e, abaixo dele, estão listadas as transições responsáveis pelas alternâncias entre os estados. É importante observar que não foram encontrados outros modelos de representação dos estados de máquina genéricos como este. A seguir é apresentado o índice OEEML.

Figura 11 - Estados e transições de máquina.



- 1 – Equipamento inicializado
- 2 – Equipamento colocado em modo de operação
- 3 – Equipamento colocado em modo não operacional
- 4 – Item presente na entrada
- 5 – Item não presente na entrada
- 6 – Item presente na entrada após a realização da tarefa anterior
- 7 – Condições de parada eliminadas
- 8 – O equipamento ficou improdutivo por erros de máquina
- 9 – O equipamento pode liberar a peça
- 10 – O equipamento não pode liberar a peça
- 11 – Condições de parada eliminadas (com peça na entrada)
- 12 – Fim do período programado

Fonte: Adaptado de (RON e ROODA, 2005).

### 2.5.3 Eficácia Global dos Equipamentos de uma Linha de Produção (OEEML)

De forma semelhante ao índice anterior, o OEEML foi proposto com a finalidade de separar do cálculo do OEE as perdas relacionadas à linha de produção (BRAGLIA, FROSOLINI E ZAMMORI, 2009). Nesta proposta, é abordado o fato de que o OEE foi idealizado para analisar máquinas isoladas. Isto dificultaria a análise de equipamentos alocados em uma linha de produção.

De acordo com o trabalho de Bonal et al (1996), o OEE sozinho não fornece informações suficientes para a tomada de decisão. É necessário adicionar

elementos de considerar fatores financeiros neste processo. Neste caso, a tomada de decisão está relacionada a aplicação da Teoria das Restrições e da TPM, com o intuito de melhorar o desempenho do sistema.

Apesar do OEEML estar relacionado ao desempenho da linha de produção, ele carrega uma visão diferente das perdas de um sistema produtivo. Elas são classificadas como dependentes ou independentes do equipamento. Esta estrutura ainda pode ser utilizada para calcular o TOEE, Eficácia Global Total dos Equipamentos, relativa ao processo. E, também, o OEEM, tido como indicador real da eficiência da máquina.

$$\text{TOEE} = \text{Disponibilidade}_{\text{Manutenção Planejada}} \times \text{Disponibilidade}_{\text{Externa}} \times \text{OEE}$$

O TOEE contabiliza as perdas em função de todos os eventos relacionados à linha de produção. Ou seja, ela considera tanto as perdas dependentes das máquinas como as independentes. Enquanto que o OEEM agrega apenas as perdas dependentes do equipamento.

$$\text{OEEM} = \text{Disponibilidade}_{\text{Manutenção Planejada}} \times \text{OEE}$$

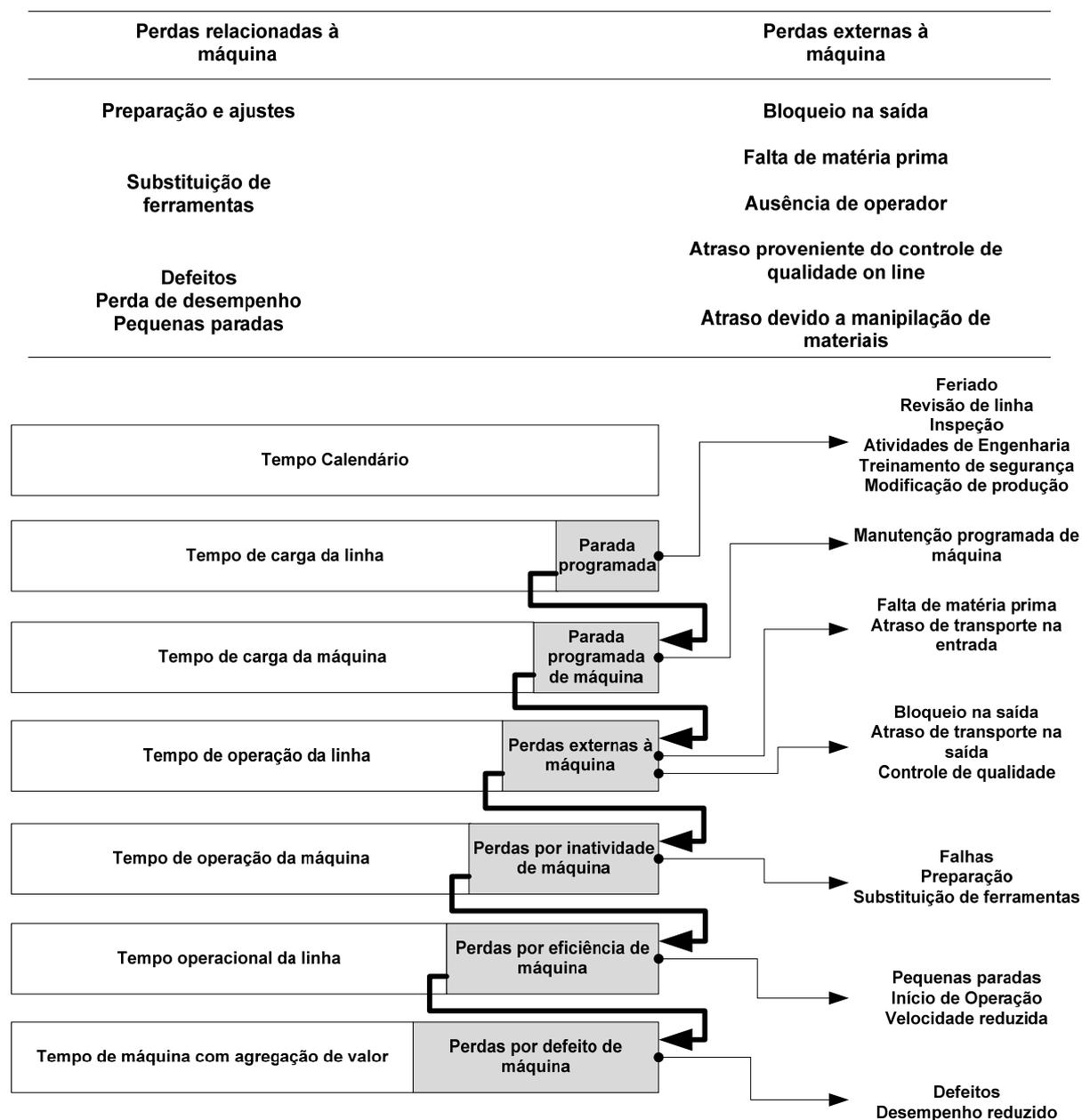
Assim, o OEEML é calculado pela taxa de atravessamento da linha em relação a um referencial teórico. A qual, é definida pelo TOEE do último equipamento da linha.

$$\text{OEEML} = \text{TOEE}_{\text{Última máquina da linha}}$$

O TOEE calculado para cada máquina da linha possibilita identificar a degradação da taxa de atravessamento ao longo do sistema produtivo. Este valor deveria ser igual ao do equipamento gargalo. Entretanto, as ineficiências relacionadas à linha de produção fazem com que os equipamentos subsequentes ao gargalo apresentem taxas de transferências menores que o gargalo.

Há mais alguns índices de desempenhos com aplicação voltada ao chão de fábrica. Um deles é o OTE, Eficácia Global de Atravessamento, (MUTHIAH e HUANG, 2007). Outro é o OFE, Eficiência Global da Fábrica, descrito por (BONAL et al, 1996) e (OECHSNER, 2003). E, também, o OLE Eficiência Global da Linha, (NACHIAPPAN e ANANTHARAMAN, 2006). Entretanto, estes indicadores não serão explorados por considerar a avaliação do desempenho de um conjunto de processos produtivos. Mas ambos utilizam os conceitos do OEE para compor os seus cálculos.

Figura 12 - Estrutura das perdas pelo índice OEEML.



Fonte: Adaptado de BRAGLIA, FROSOLINI e ZAMMORI, 2009

Na Figura 12, é apresentada a nova estrutura das perdas de desempenho elaborada por Braglia, Frosolini e Zammori (2009). É importante ressaltar como é feita a separação entre as perdas geradas pela máquina e aquelas geradas pelos elementos que compõem a linha de produção na qual o equipamento se encontra (divisão herdada da proposta do índice de desempenho E).

## 2.6 REDES DE PETRI E RDP COLORIDAS PARA SISTEMAS DE MANUFATURA

Na literatura, podem ser encontrados alguns modelos em RdP voltados para a simulação de sistemas de manufatura. Desrocher e Al-Jaar (1995) mostram algumas destas aplicações. Entretanto, os modelos em RdP encontrados estão mais focados na simulação de eventos discretos de baixo nível como, por exemplo, a lógica de controle de um braço robótico responsável por alimentar diversas máquinas ao mesmo tempo.

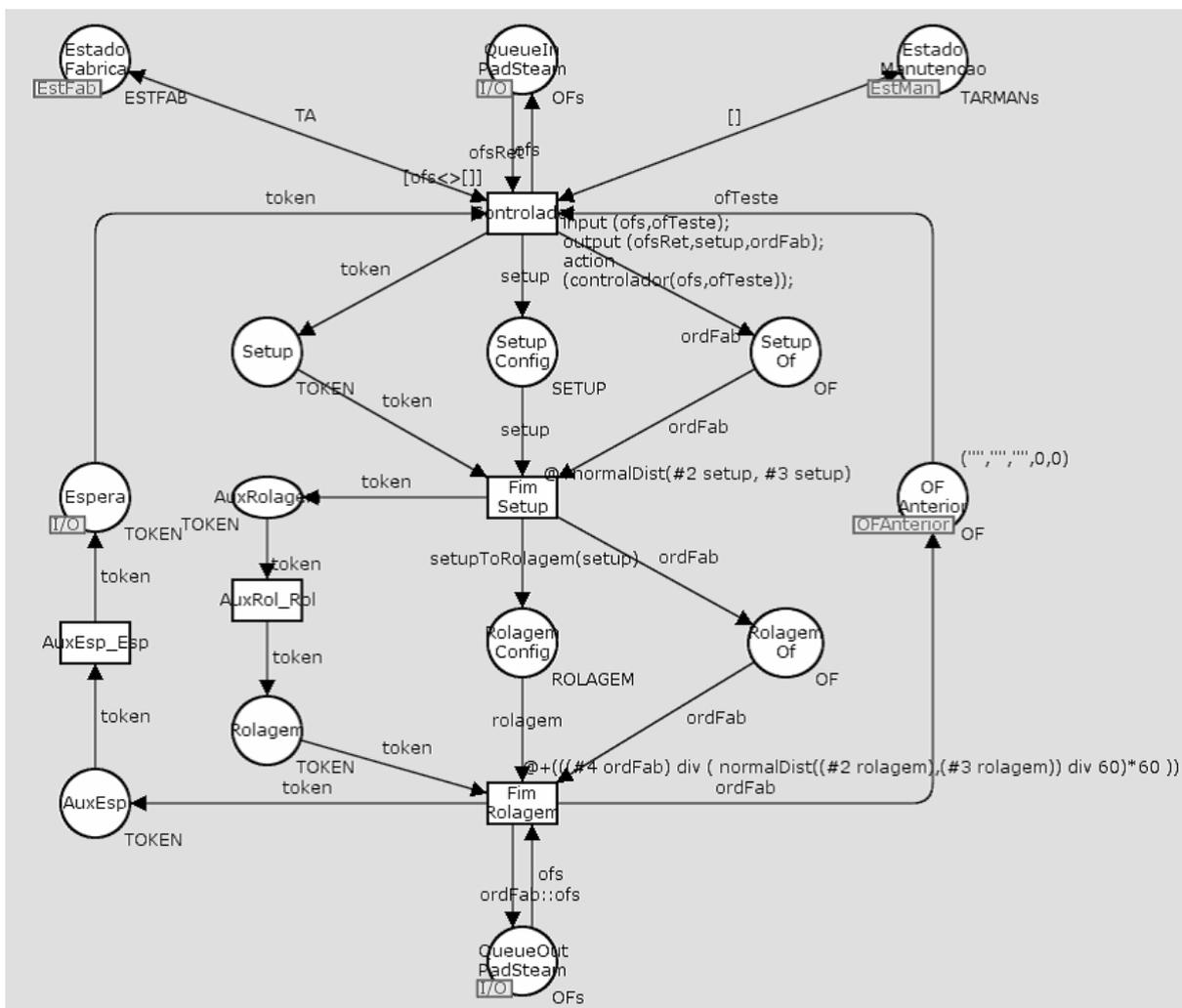
Há também algumas aplicações que visam simular a operação de um conjunto predefinido de recursos que formam uma determinada combinação sequencial para produzir um determinado produto. Porém, estes modelos em RdP acabam sendo menos flexíveis em relação à chegada de novos produtos, por exemplo. Este tipo de situação abre espaço para aplicações utilizando modelos de Rede de Petri Colorida.

Com uma RdP Colorida é possível criar diferentes cores, *colorsets*, para os estados contidos em um mesmo modelo. Logo, pode-se utilizar a mesma estrutura de um modelo, contendo um determinado conjunto de máquinas, para simular o atravessamento de diferentes produtos.

Em (CPNETS, 2011) é possível encontrar diversas aplicações de RdP voltadas ao contexto industrial, porém, não foram encontrados exemplos de modelos em RdP colorida para simular um fluxo de trabalho de um sistema de manufatura. É possível encontrar modelos de simulação workflow voltados apenas para casos diferentes do sistema de manufatura, um deles é mostrado por Mans (2007).

Além disso, foi possível encontrar um exemplo de aplicação de RdP Colorida em um sistema de manufatura, conforme mostra Figura 13. Pode-se observar o modelo completo em (LEAL, 2007).

Figura 13 - Exemplo de um sistema de manufatura em CPN



Fonte: LEAL, 2007.

Esta parte do modelo representa duas máquinas preparadas para trabalhar em alguns turnos com diferentes ordens de produção. Este modelo é dedicado a somente um caso, ou seja, apenas para o processo de fabricação estudado naquela pesquisa. Os *tokens* que percorrem esta rede carregam as informações referentes às ordens de produção, durante o percurso, estes dados são interpretados e alterados pelos elementos da rede. No item a seguir será discutido o software CPN Tools e algumas possibilidades de aplicações que podem ser desenvolvidas com esta ferramenta.

## 2.7 MODELAGEM E SIMULAÇÃO NO CPN TOOLS

Para simular os eventos de um sistema produtivo é necessário formular um modelo conceitual que possa ser implementado em uma ferramenta de simulação. Conforme pode ser acompanhado em (CHWIF e MEDINA, 2006), há algumas

formas de se implementar um modelo teórico em um software de simulação como, por exemplo, a elaboração de códigos em linguagens de programação, porém há outras soluções disponíveis.

O software CPN Tools (CPN Tools, 2011) é uma ferramenta para a implementação e simulação de Redes de Petri Colorida, RdP colorida ou CPN, (*Colored Petri Nets*), (JENSEN, 1992); (JENSEN, 1994) e (KRISTENSEN, CHRISTENSEN e JENSEN, 1998). Esta metodologia de modelagem é baseada nas Redes de Petri, RdP, estes modelos gráficos possuem uma estrutura matemática que gerencia a simulação de eventos discretos através de fichas, *tokens*, que transitam pelos estados e transições destas redes. Mais informações sobre RdP podem ser acompanhadas em (REISIG, 1985).

### 2.7.1 Geração de logs de eventos com o CPN Tools

O CPN Tools possui algumas interfaces que possibilitam a interação com outros softwares de análise, como o ProM. Através da linguagem ML (ULLMAN, 1998), é possível desenvolver, por exemplo, funções de escrita em arquivo. Isto é utilizado para armazenar um histórico de eventos gerados durante a simulação do modelo em CPN. Este arquivo gerado é chamado de Log de Eventos e possui as informações respectivas a cada um dos eventos que é armazenado durante a simulação. Um exemplo de quais podem ser estas informações é mostrado na Figura 14.

Em (MEDEIROS e GÜNTHER, 2005) é proposta uma metodologia para geração de Logs para análise no software ProM (PROM, 2011), de acordo com o padrão Mining XML, ou MXML, mostrado na Figura 15. Atualmente, o padrão MXML está sendo substituído pelo XES, *Extensible Event Stream*, (XES 1.0, 2010), porém o ProM interpreta ambos os padrões.

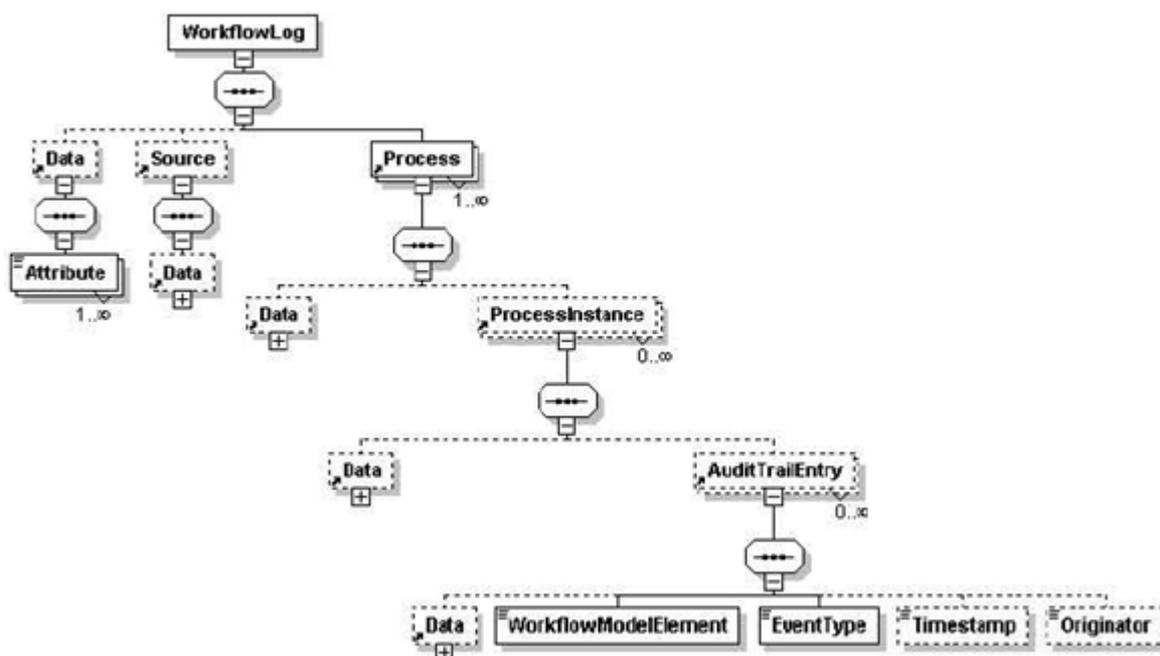
Basicamente, os dois padrões procuram estabelecer como as informações do Log de Eventos devem estar dispostas de forma que os softwares de análise possam interpretá-las. A metodologia proposta por Medeiros e Günther (2005) apresenta um código ML para a geração de arquivos com registros de eventos no formato CPNXML, para cada uma das rodadas de simulação, ou seja, um arquivo por *case*, ou *token*.

Figura 14 - Exemplo de um log de eventos

Case ID	Task Name	Event Type	Originator	Timestamp	Extra Data
1	File Fine	Completed	Anne	20-07-2004 14:00:00	...
2	File Fine	Completed	Anne	20-07-2004 15:00:00	...
1	Send Bill	Completed	system	20-07-2004 15:05:00	...
2	Send Bill	Completed	system	20-07-2004 15:07:00	...
3	File Fine	Completed	Anne	21-07-2004 10:00:00	...
3	Send Bill	Completed	system	21-07-2004 14:00:00	...
4	File Fine	Completed	Anne	22-07-2004 11:00:00	...
4	Send Bill	Completed	system	22-07-2004 11:10:00	...
1	Process Payment	Completed	system	24-07-2004 15:05:00	...
1	Close Case	Completed	system	24-07-2004 15:06:00	...
2	Send Reminder	Completed	Mary	20-08-2004 10:00:00	...
3	Send Reminder	Completed	John	21-08-2004 10:00:00	...
2	Process Payment	Completed	system	22-08-2004 09:05:00	...
2	Close case	Completed	system	22-08-2004 09:06:00	...
4	Send Reminder	Completed	John	22-08-2004 15:10:00	...
4	Send Reminder	Completed	Mary	22-08-2004 17:10:00	...
4	Process Payment	Completed	system	29-08-2004 14:01:00	...
4	Close Case	Completed	system	29-08-2004 17:30:00	...
3	Send Reminder	Completed	John	21-09-2004 10:00:00	...
3	Send Reminder	Completed	John	21-10-2004 10:00:00	...
3	Process Payment	Completed	system	25-10-2004 14:00:00	...
3	Close Case	Completed	system	25-10-2004 14:01:00	...

Fonte: MEDEIROS e GÜNTER, 2005.

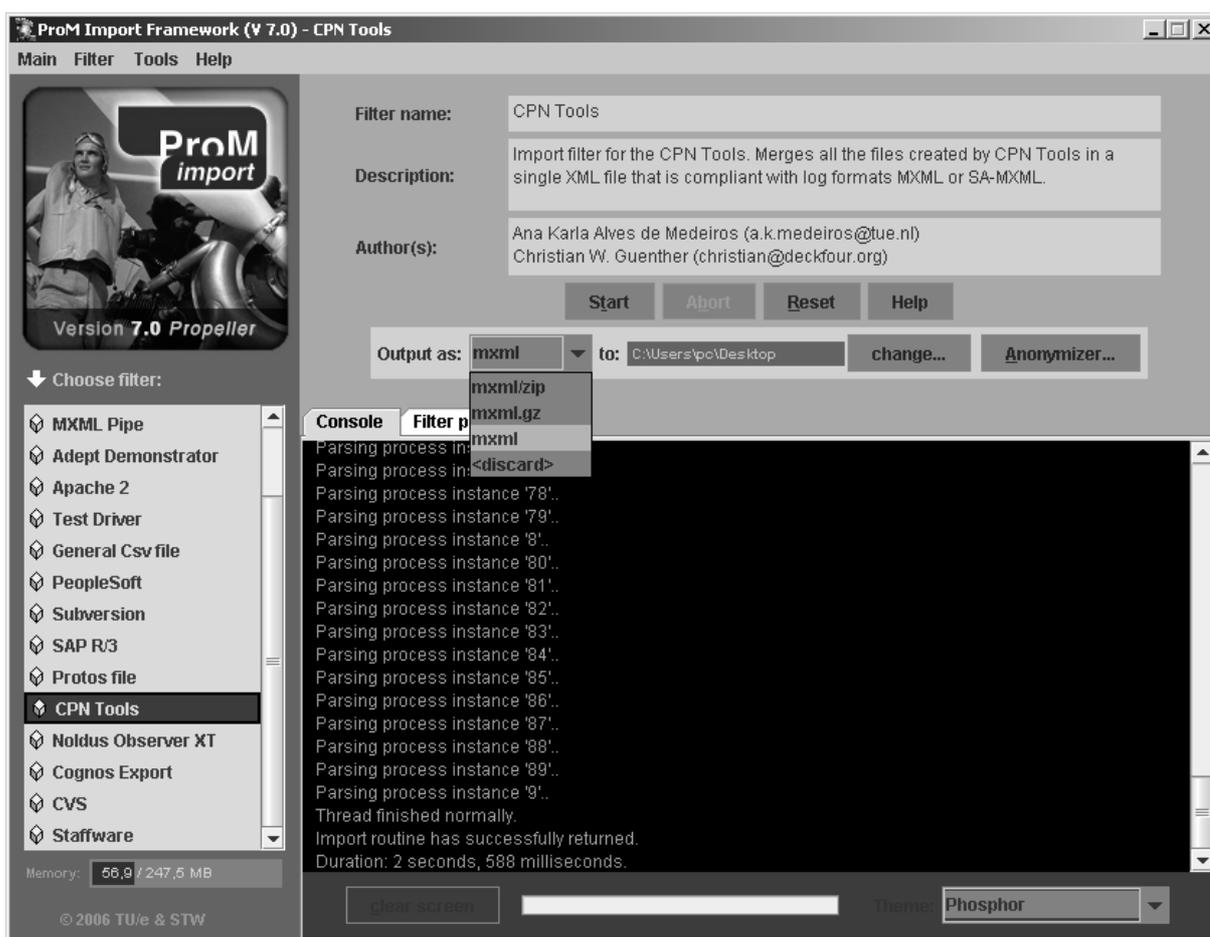
Figura 15 - Padrão MXML



Fonte: MEDEIROS e GÜNTER, 2005

Após a simulação no CPN Tools os arquivos gerados no formato CPNXML devem ser convertidos para o formato MXML, para esta tarefa utiliza-se o software ProMimport (ProMimport, 2011). Na Figura 16, é apresentada a tela de conversão do ProMimport, nela pode-se observar que há um filtro específico para os Logs do CPN Tools, ainda neste exemplo, foram convertidos cerca de 90 arquivos que estavam no formato CPNXML para o formato MXML.

Figura 16 - Exemplo de conversão utilizando o software ProMimport



Fonte: o autor.

Na Figura 16 pode-se perceber que o formato do arquivo de saída marcado no campo “Output as:” deve ser o MXML, apesar de existir um novo padrão disponível, o XES. Na versão 7.0 do ProMimport, o filtro de conversão “CPN Tools” em “Choose filter:” ainda não possui a opção de saída para este formato.

Este exemplo, em que os Logs de eventos são gerados pelas simulações de um modelo predefinido no CPN Tools, pode ser utilizado para testes e validações de novos *plugins*, ou ainda, a avaliação de algumas métricas de desempenho para o modelo proposto. Porém, outro caminho pode ser assumido para o tratamento dos

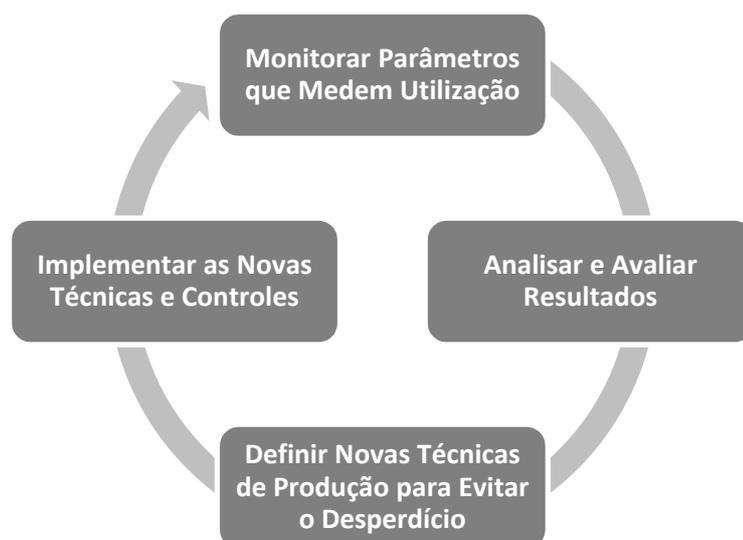
Logs de eventos, neste caso, os Logs de eventos seriam gerados por um processo real, enquanto que a função do ProM seria proporcionar algumas métricas relativas a estes Logs. Ou ainda, a partir destes arquivos de eventos, poderia ser gerado, através do ProM, um modelo empírico do processo monitorado e compará-lo com um modelo conceitual desenvolvido para aquele caso em uma espécie de auditoria, isto é mostrado por Aalst, Weijters e Maruster (2004).

No item a seguir serão abordados os Sistemas de Informação de Chão de Fábrica e os Sistemas de Manufatura.

## 2.8 FIS e Modelos de Operação de Sistemas de Manufatura

Para realizar a coleta de informações de chão de fábrica relativas aos eventos de máquinas e pessoas envolvidas neste ambiente, são utilizados os Sistemas de Informação de Fábrica, FIS (*Factory Information Systems*). Além de realizar a coleta destas informações, estes sistemas devem ser capazes de armazenar estes dados e, posteriormente, gerar análises relativas aos eventos armazenados para um determinado período. A Figura 17, proposta por Gaylord (1987), mostra como ocorre o ciclo de utilização destas informações ao longo das operações de um sistema de manufatura.

Figura 17 - Ciclo de utilização da informação de um FIS

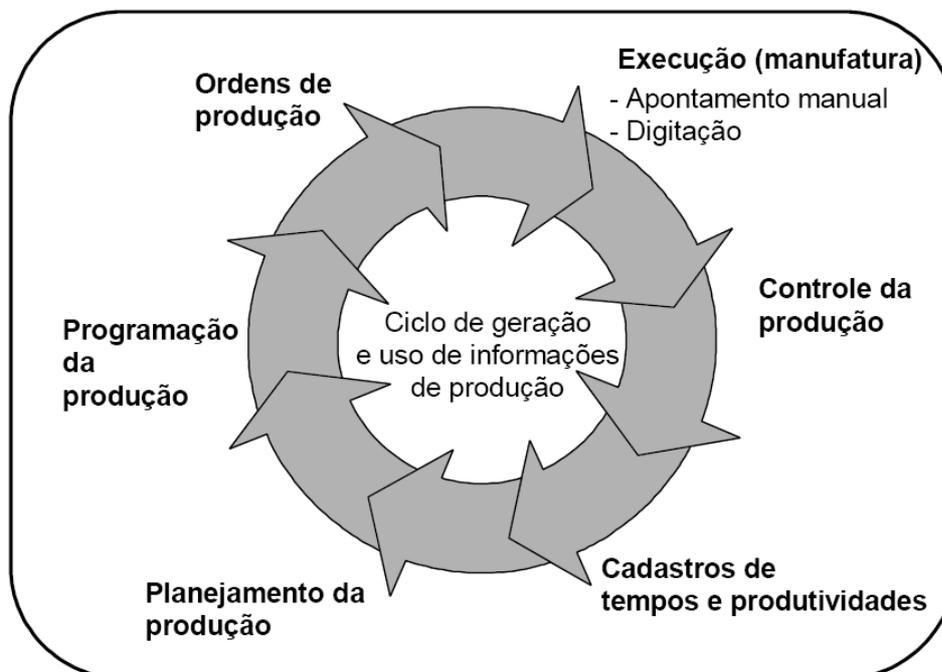


Fonte: Gaylord, 1987

De uma forma mais detalhada, Favaretto (2001) mostra o ciclo da geração e utilização dos dados do chão de fábrica, conforme a Figura 18. Através dela é

possível observar o encadeamento do planejamento e controle da produção, assim como a realimentação das informações de acompanhamento das ordens de produção que estão circulando no sistema.

Figura 18 - Ciclo de geração e uso dos dados de chão de fábrica

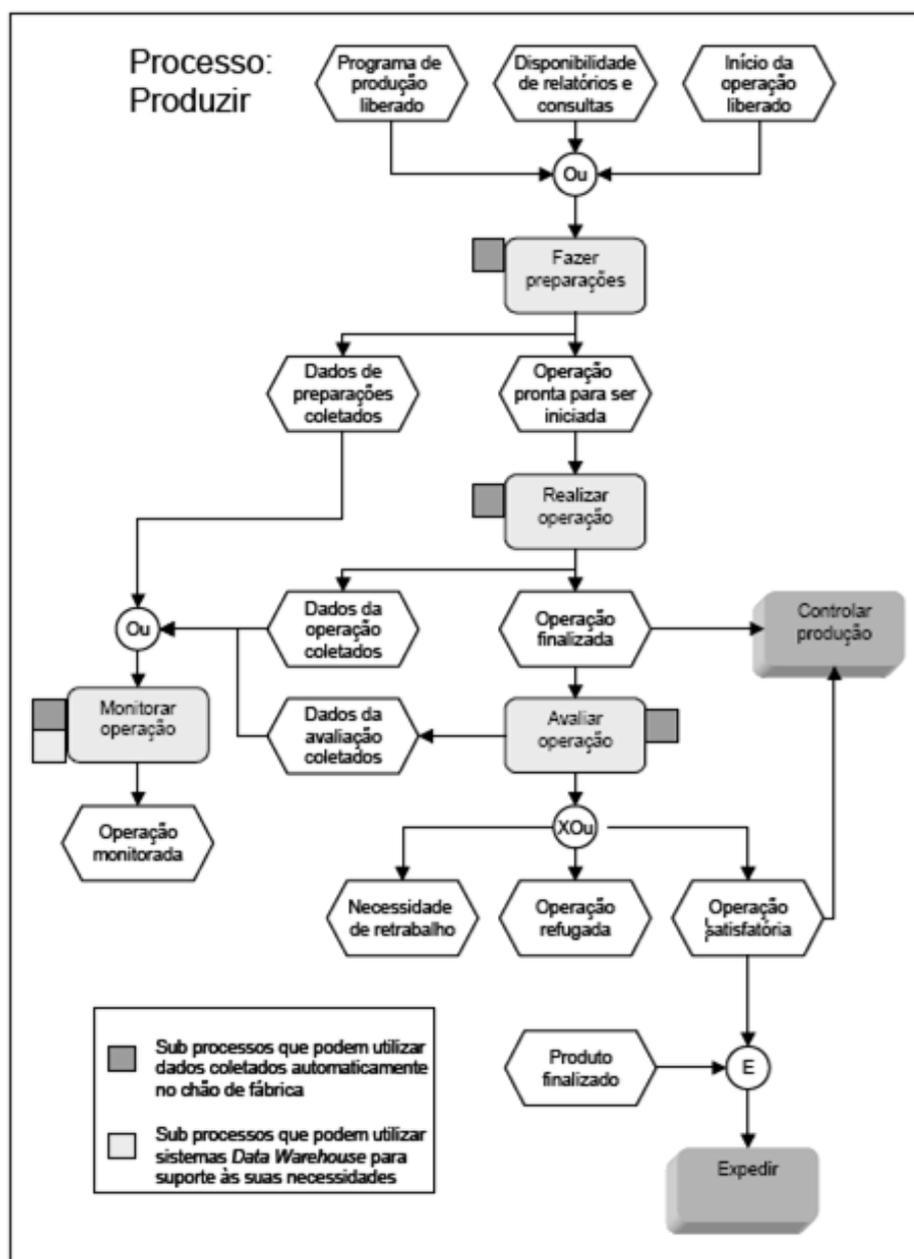


Fonte: Favaretto, 2001

Dentro dos sistemas de manufatura é possível encontrar alguns arranjos produtivos, nos quais são assumidos alguns modos de operação. Em particular, os Sistemas Flexíveis de Manufatura, FMS (*Flexible Manufacturing Systems*), são capazes de trabalhar com roteamento dinâmico das ordens de produção. Os seja, como se houvessem diversas linhas de produção virtuais, nas quais as sequências a serem seguidas pelas ordens de produção variam de acordo com os produtos que serão produzidos. Isto é possível porque os recursos instalados nestes sistemas possuem um grau de flexibilidade que permite alterações de parâmetros e ferramentas de produção dentro de um período aceitável de customização.

Na Figura 19, é mostrado o processo de produção “Produzir”, é possível perceber que há uma etapa inicial referente à liberação do programa de produção. Logo a seguir, é realizada uma etapa de preparação para que o processo possa ser realizado de acordo com um processo de controle da produção. Ao final da operação, ela passa por um ponto de avaliação que irá definir a qualidade do serviço realizado.

Figura 19 - Representação do Processo de Produção Produzir



Fonte: Favaretto, 2001

A partir dos conceitos mostrados neste item 2, será proposta uma metodologia para simular os eventos ocorridos em um processo produtivo de um sistema de manufatura. A visão geral desta metodologia é apresentada no capítulo a seguir.

### 3 VISÃO GERAL DA PROPOSTA

Anteriormente, foram vistos os conceitos que definem a operação, os eventos gerados e o desempenho de processos produtivos de sistemas de manufatura, e também, de alguns dos sistemas envolvidos nas atividades destes processos. A partir disso, foi elaborada uma metodologia para a simulação e análise dos eventos que poderiam ocorrer, futuramente, nestes processos, conforme pode ser visto na Figura 20.

Figura 20 - Metodologia de simulação proposta



Fonte: o autor, 2011

De acordo com a metodologia proposta, inicialmente, ocorre a coleta de dados dos eventos ocorridos nos processos de manufatura, como tempos de ciclo e paradas, por exemplo. Em seguida, estes dados são processados para gerar modelos numéricos, que serão utilizados como parâmetros de entrada de um modelo de simulação padronizado. A partir do modelo de simulação padronizado, podem ser simulados casos de melhorias dos processos de manufatura, sendo que para cada caso simulado, as saídas do modelo serão eventos de máquina

simulados. Através dos quais serão calculados índices de desempenho de processo de manufatura, como o OEE, para avaliação da eficácia obtida com as melhorias estipuladas. A partir da comparação entre os indicadores de desempenho calculados com os dados dos eventos reais dos processos em análise e daqueles calculados a partir dos eventos simulados podem ser definidas as prioridades das ações de melhoria a serem implementadas.

Como a metodologia especifica um modelo de simulação padronizado, a etapa de modelagem do processo é resumida apenas à geração de modelos numéricos para a alimentação do modelo de simulação. Desta forma, a Figura 21 mostra uma proposta de arquitetura para a realização das rodadas de simulação de forma automatizada. A automação proposta tem por objetivo facilitar a execução das rodadas de simulação, pois serão gerados diversos eventos ao final de cada rodada de simulação, os quais deverão ser processados para o cálculo dos indicadores de desempenho dos processos simulados.

A arquitetura proposta é definida por um modelo de simulação com uma estrutura em CPN padronizada, ou seja, a customização do modelo para um caso de estudo deve ocorrer apenas através de parâmetros numéricos, relativos aos eventos que serão gerados por este modelo. Além disso, há um padrão de arquivo de registros para o armazenamento dos eventos gerados e uma especificação de base de dados para trabalhar tanto com o armazenamento dos eventos reais quanto daqueles gerados por simulação.

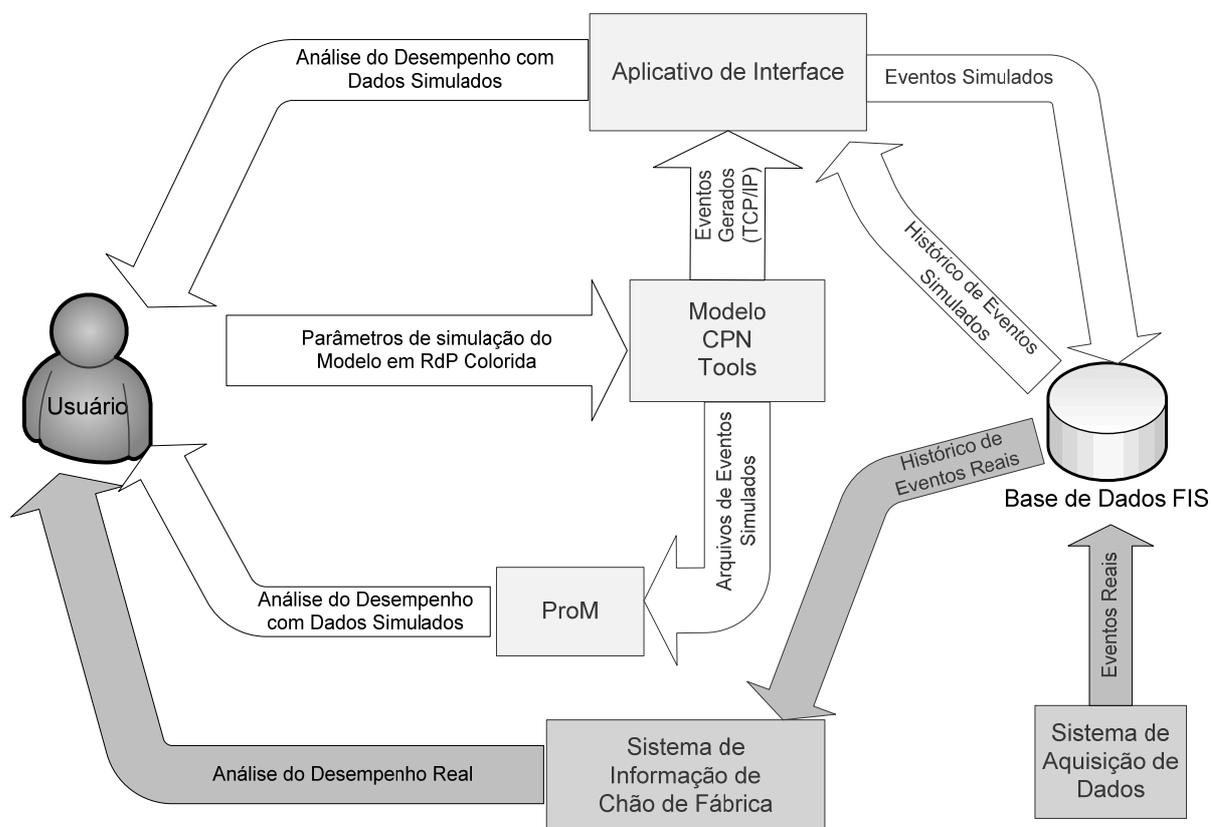
Foi desenvolvido um aplicativo de Interface capaz de interagir com a base de dados e o modelo em CPN. Além disso, a metodologia faz o uso de um sistema de aquisição de dados do tipo FIS, do CPN Tools como ferramenta de simulação, do ProM para análise e do ProMimport para a conversão de Logs. Em seguida, serão vistos cada um destes elementos individualmente.

As informações podem seguir por dois caminhos, Figura 21, o de tonalidade mais escura mostra os dados reais coletados e armazenados em uma base de dados para o cálculo de indicadores de desempenho por um Sistema de Informação de Chão de Fábrica. As setas de tonalidade mais clara mostram os caminhos percorridos pelas informações utilizadas na simulação. Neste caso, o usuário informa os parâmetros numéricos ao modelo no CPN Tools, realiza a simulação e envia os eventos simulados para um aplicativo que as armazena na base de dados.

Neste caso o aplicativo consulta a base de dados para o cálculo dos indicadores de desempenho a partir dos eventos simulados.

O CPN Tools também armazena os eventos gerados durante a simulação em arquivos, desta forma, pode-se optar por obter algumas métricas de desempenho a partir do aplicativo ProM. Porém, neste caso, os indicadores de desempenho calculados pelo FIS a partir dos dados reais não serão os mesmos gerados pelo ProM. Portanto, para efeito de comparação entre o desempenho real e o simulado, é necessário realizar a simulação inicialmente apenas com parâmetros reais, ou seja, sem inserir as melhorias desejadas. Então, os dados gerados por esta simulação podem ser inseridos no ProM de forma a se obter as métricas relativas ao processo antes das melhorias. Na sequência, as melhorias podem ser inseridas no modelo e os resultados obtidos com as simulações destas melhorias podem ser utilizados no ProM para a comparação com a simulação realizada anteriormente, apenas com dados dos eventos reais.

Figura 21 - Arquitetura Proposta



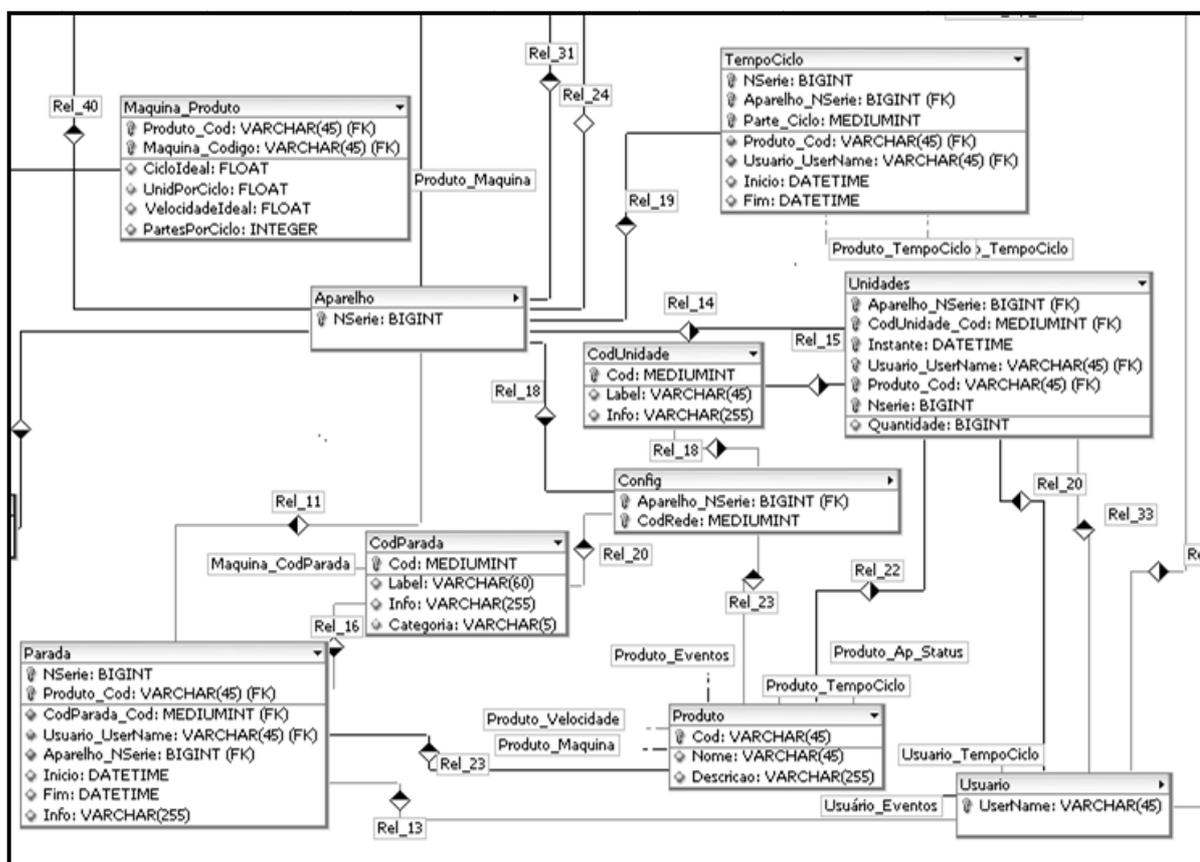
Fonte: o autor, 2011

### 3.1 BASE DE DADOS E LOG DE EVENTOS

O modelo de base de dados utilizado para o armazenamento dos eventos de máquina seguiu o padrão proposto por Santos et al (2008), pois este modelo foi desenvolvido e proposto como foco nas aplicações de coletas de dados de chão de fábrica. Além disso, estrutura definida por este modelo é pública e é atualizada constantemente pelos pesquisadores do Grupo de Integração, Avaliação e Automação de Sistemas da PUCPR.

Um detalhe do modelo Entidade-Relacionamento, MER, utilizado para o armazenamento das informações dos eventos reais ocorridos no chão de fábrica é mostrado na Figura 22. A partir da estrutura de dados definida neste modelo, devem ser retiradas as informações para parametrizar o modelo de simulação em RdP Colorida.

Figura 22 - Detalhe do modelo da base de dados (para os dados reais)



Fonte: o autor, 2011

Deve ser observado na estrutura do modelo que os eventos monitorados são armazenados em três tabelas principais: “TempoCiclo”, “Unidades” e “Parada”. Os eventos inseridos em “Unidades” contêm as informações acerca da quantidade de

peças produzidas, da qualidade destas peças, do instante no qual foram informadas, do operador que as produziu, das máquinas e dos produtos aos quais estão vinculadas. As tabelas “TempoCiclo” e “Parada” seguem praticamente a mesma estrutura, porém, possuem tempos de início e fim. Na tabela “Parada” deve ser inserido o motivo da parada, neste caso, um código numérico, cuja descrição está declarada na tabela “CodUnidade”.

Para armazenar os eventos gerados pelo modelo de simulação em uma base de dados, foi criado um modelo específico de tabela para esta função. A Figura 23 mostra a disposição destas informações na tabela elaborada. Para cada evento adicionado é criado um número de série único, e são inseridos: número do case que estava circulando no modelo de simulação; evento e tipo de evento; máquina, operador e produto que originaram o evento; instantes de início e fim em segundos.

No Log de eventos são registrados os instantes do formato de data, porém, como o CPN Tools gera tempos absolutos em segundos, estes tempos foram mantidos neste formato evitando conversões de padrões. Isto é porque o software de análise destes eventos deve ser customizado para ler esta tabela, então, optou-se por esta solução mais simples.

Figura 23 - Tabela para o armazenamento dos eventos simulados



Eventos_Simulados	
PK	NSerie: BIGINT
	CaseNum: BIGINT
	Evento: VARCHAR(45)
	TipoEvento: VARCHAR(20)
	Maquina: VARCHAR(45)
	Operador: VARCHAR(45)
	Produto: VARCHAR(45)
	Tempo_Inicio: BIGINT
	Tempo_Fim: BIGINT

Fonte: o autor, 2011

Outra forma de saída das informações de eventos simulados pelo modelo foi elaborada a partir do padrão de Log proposto por Medeiros e Günther (2005) (ver Figura 14). A estrutura adaptada segue o padrão mostrado na Tabela 1, onde a estrutura original do Log é mostrada. Como os eventos dos sistemas de manufatura estão relacionados aos produtos, máquinas e operadores de um sistema produtivo, foi necessário inserir estes dados na estrutura do Log.

Na linha 2 é mostrado como ficaria a estrutura do Log considerando os três “Originators”. Porém, para que o ProM interprete os dados relativos ao “Originator1”

e ao “Originator2”, é preciso declará-los como “ExtraData”. Então, na linha 3, é mostrada a estrutura dos elementos relativos ao modelo de simulação de processos produtivos de sistemas de manufatura. Na linha 4, é apresentado um exemplo das informações a serem armazenadas durante a simulação.

Tabela 1 - Comparativo entre os formatos de Log de Eventos

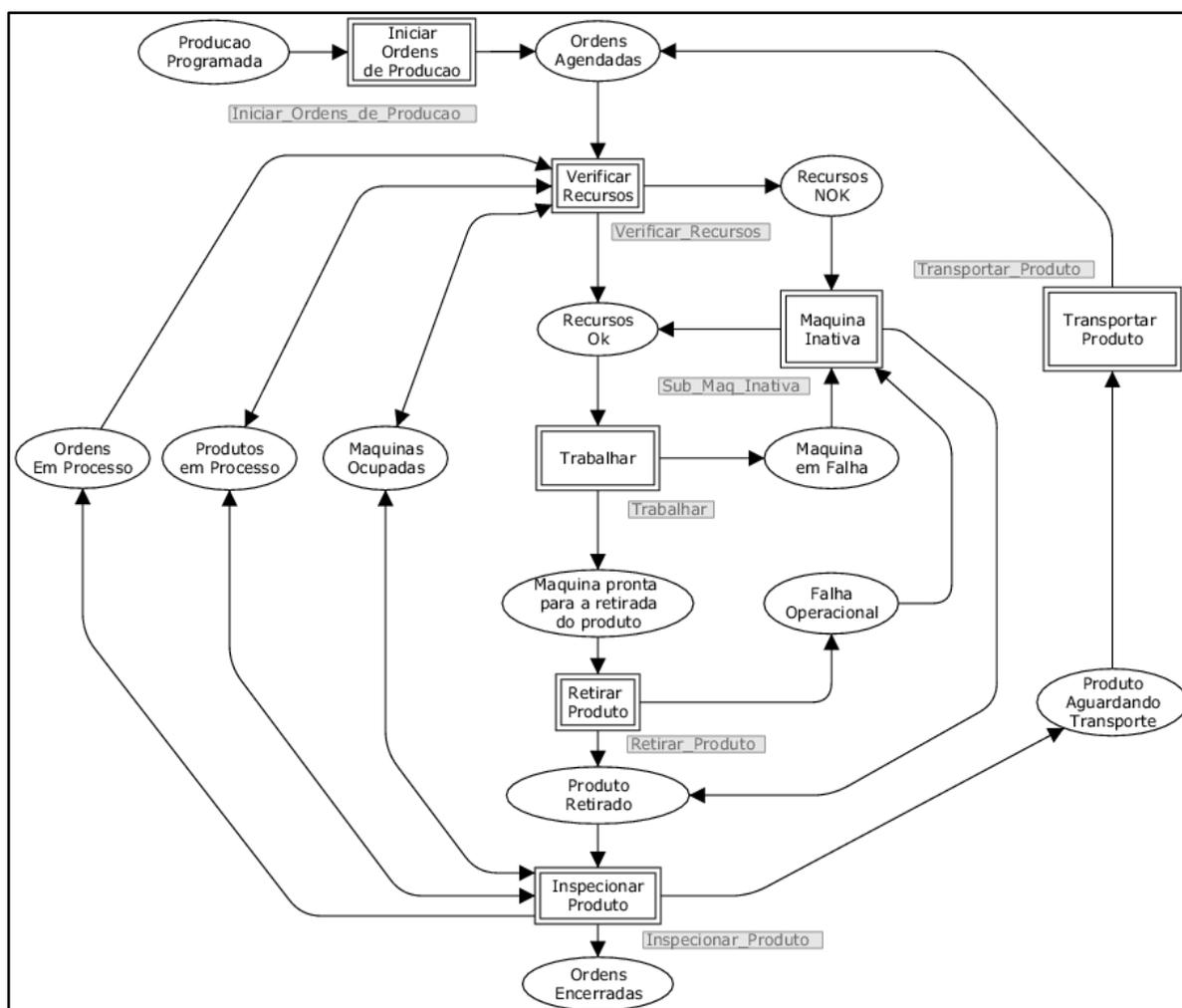
1	file_id	workflowModelElement	EventType	TimeStamp	Originator	ExtraData	ExtraData
2	file_id	workflowModelElement	EventType	TimeStamp	Originator	Originator1	Originator2
3	CaseNum	Evento	TipoEvento	Instante	Maquina	Operador	Produto
4	1	Falha	Inicio	2011-01...	Maquina1	José	Parafuso
Fonte: o autor, 2011							

### 3.2 MODELO DESENVOLVIDO EM REDE DE PETRI COLORIDA

O modelo de simulação foi elaborado em RdP Colorida no software CPN Tools. Para isto, utilizou-se como referência o modelo de estados e transições da Figura 11. Deve-se lembrar que o modelo proposto por Ron e Rooda (2005) visa representar os estados relativos apenas à máquina. No modelo proposto para as simulações foram considerados os eventos externos à máquina, como a falta de matéria prima, ou ainda, a falta de mão de obra. Na Figura 24 é mostrada a RdP Colorida desenvolvida para modelar o processo Produzir.

Os elementos ovais que compõem o modelo são os lugares, os elementos de conexão entre as formas são os arcos e os retângulos são as transições. Estas últimas representam as atividades que ocorrem dentro de um processo, neste caso, o macro-processo “Produzir”. Os lugares representam os estados das ordens de produção e dos recursos que fazem parte do processo “Produzir”. Desta forma, as ordens de produção percorrem o modelo, saindo de um lugar para o outro nos sentidos indicados pelos arcos no momento em que ocorre o disparo de uma transição. As ordens não param sobre as transições, elas podem permanecer apenas nos lugares do modelo.

Figura 24 - Processo Produzir



Fonte: o autor, 2011.

O modelo proposto possui uma estrutura hierárquica de tal forma que o processo “Produzir” está no topo desta estrutura. Outras sete sub-redes estão situadas abaixo do processo “Produzir”, com o intuito de realizar funções mais específicas.

De forma geral: as ordens são agendadas; passam por uma verificação de recursos; entram no estado produzir; a partir do qual pode ocorrer uma falha que deixa a máquina inativa; ou o produto pode ser retirado da máquina, também sujeito a uma falha; uma inspeção é realizada; e o produto pode ser transportado para ser processado em outra máquina. No item a seguir, será apresentada a utilização do modelo e serão detalhadas cada uma das suas sub-redes.

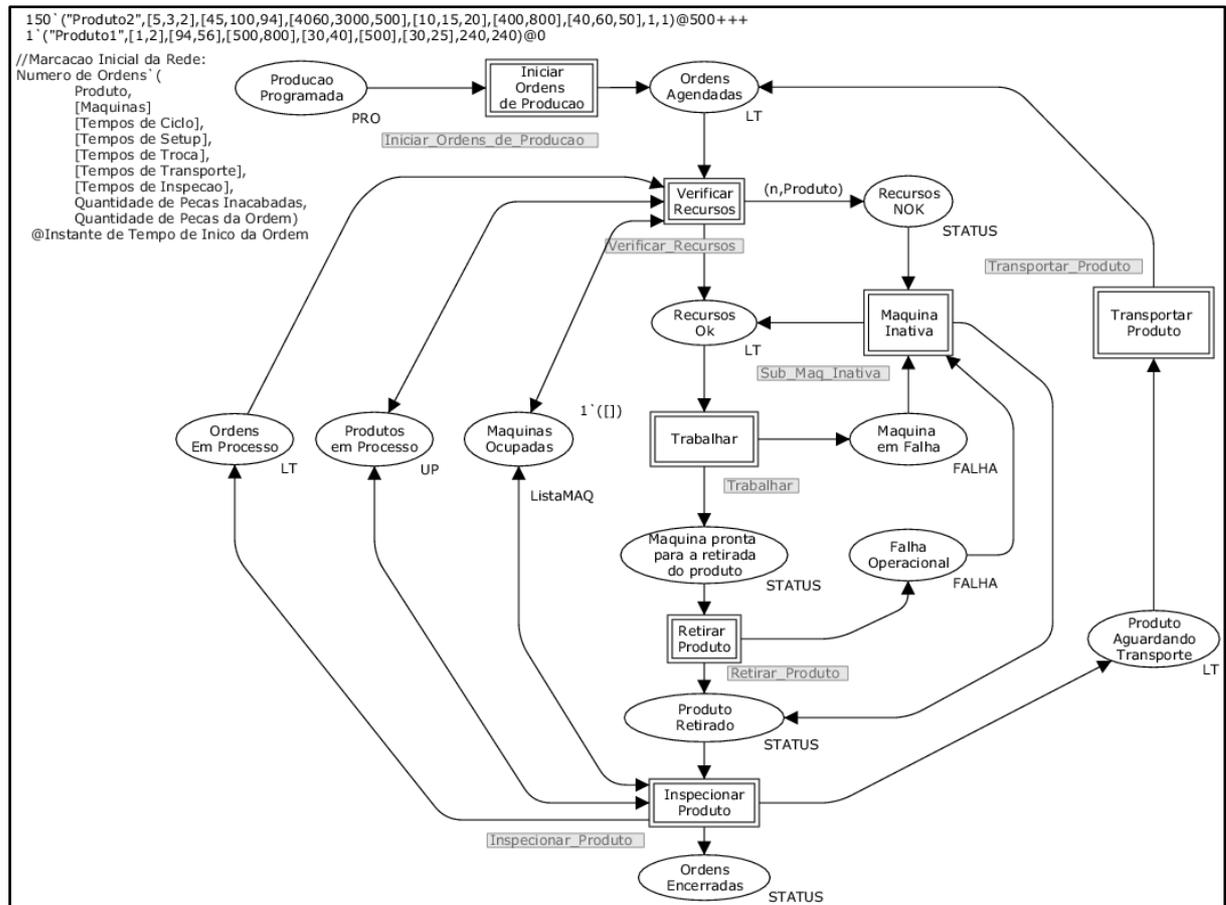
### 3.3 UTILIZAÇÃO DO MODELO NO CPN TOOLS

Para iniciar a simulação no modelo proposto dentro do CPN Tools é necessário inserir uma marcação inicial no lugar onde o modelo iniciará a simulação. Neste caso, a marcação inicial são as ordens de produção programadas. Na programação destas ordens são considerados: produto, ciclo, *setup*, troca, transporte, inspeção, peças programadas (tamanho do lote), peças inacabadas, instante de início da produção e a quantidade de ordens que serão iniciadas com estas mesmas características.

Na Figura 25 pode-se observar como é entrada esta marcação inicial, no lugar “Produção Programada”. O texto que está após os caracteres “//” é comentário inserido para representar a ordem de entrada dos parâmetros citados anteriormente. Acima deste texto há um exemplo de marcação inicial envolvendo dados que podem ser simulados no modelo. Os dados que estão entre colchetes são vetores, ou seja, podem possuir um ou mais valores. O que define a quantidade de valores a serem inseridos nestes campos é a quantidade de máquinas para as quais a produção está sendo programada.

O campo “Produto” deve receber um texto, que pode ser o nome ou o código de um produto. Os demais campos recebem números inteiros e são referentes às quantidades e aos tempos que estão citados acima. No exemplo da Figura 25, há duas ordens programadas, uma para produzir o “Produto 1” e outra para produzir o “Produto 2”. Pode-se verificar que o modelo trabalha com um lote de 240 peças para a produção do “Produto1” e com 150 lotes unitários para a produção do “Produto2”. Na sequência é apresentada a sub-rede “Iniciar\_Ordens\_de\_Producao”, responsável por sequenciar as ordens de produção.

Figura 25 - Processo “Produzir” no CPN Tools



Fonte: o autor, 2011.

### 3.3.1 Sub-Rede “Iniciar\_Ordens\_de\_Producao”

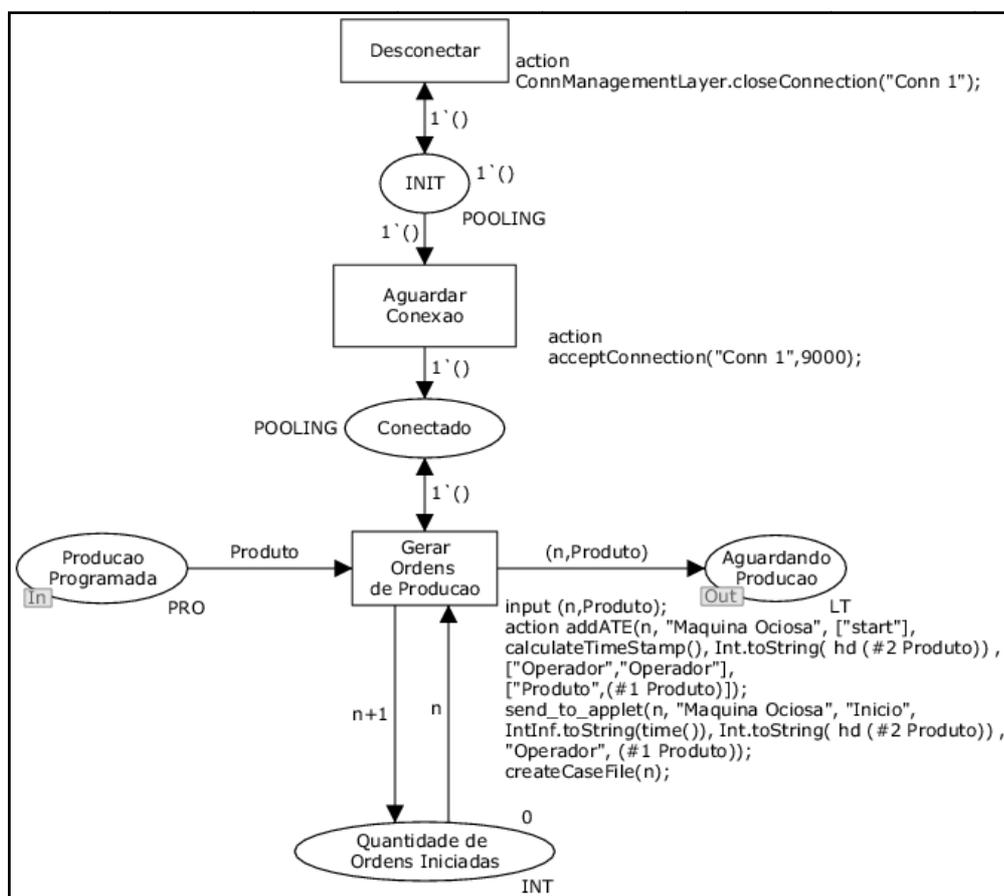
A sub-rede “Iniciar\_Ordens\_de\_Producao”, Figura 26, é utilizada para sequenciar as ordens da simulação e para gerenciar a conexão do modelo com a Interface FIS/CPN. No lugar denominado “Producao Programada” entram os programas de produção inseridos pelo usuário do modelo. A transição “Gerar Ordens de Producao” possui as funções de gerar as ordens de produção, associando um número de série a um conjunto de peças de um determinado produto.

A partir do momento em que a ordem é gerada, um evento chamado “Maquina Ociosa” é registrado, este evento indica que já há uma ordem de produção gerada para aquela máquina. Enquanto a ordem não chegar até a máquina para ser produzida, este tempo já estará contando como perda, pois a máquina já teria programação e não estaria trabalhando. As ordens geradas são encaminhadas ao lugar “Aguardando Producao”, voltando para a rede principal do processo “Produzir”.

As transições “Aguardar Conexao” e “Desconectar” são utilizadas para iniciar a comunicação do modelo do CPN Tools com o software de Interface FIS/CPN no início do processo de simulação. O CPN Tools trabalha no modo servidor para a comunicação TCP/IP utilizada. Para aguardar a conexão é utilizada a função “acceptConnection”, a porta reservada para esta função é a 9000.

No momento da geração das ordens também são criados os arquivos no formato CPNXML, nos quais são armazenados os eventos referentes aos estados do processo produtivo simulado. Para a escrita dos eventos nestes arquivos é utilizada a função “addATE”, a ela são informados os dados referentes ao produto, máquina, operador, transição executada, tipo de evento ocorrido e instante no qual o evento ocorreu. Para enviar os dados dos eventos através da comunicação TCP/IP é utilizada a função “send\_to\_applet”, nela são informados os mesmos dados da função “addATE”. Após voltar para rede principal, as ordens seguem para um processo de verificação de recursos, o qual é simulado na sub-rede “Verificar\_Recursos”, apresentada no item a seguir.

Figura 26 - Sub-Rede “Iniciar\_Ordens\_de\_Producao”



### 3.3.2 Sub-Rede “Verificar\_Recursos”

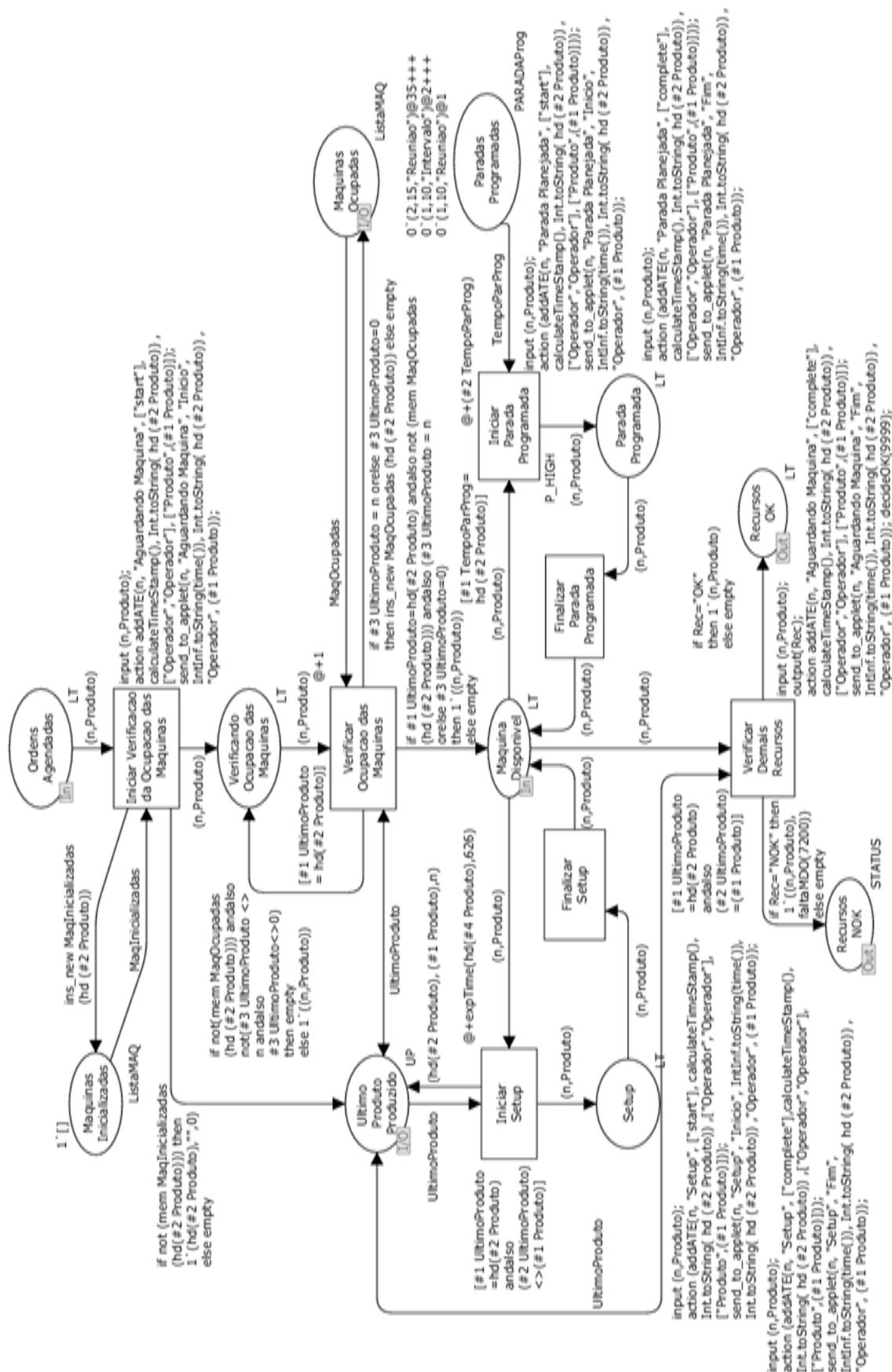
Na sub-rede “Verificar\_Recursos” (Figura 27) ocorre a lógica do modelo responsável por verificar se há algum procedimento a ser realizado antes de se iniciar o ciclo da máquina. Neste ponto do modelo são feitas as seguintes verificações, nesta ordem, máquina ocupada, existência de paradas programadas, necessidade de realização de *setup*, ou preparação de máquina, e por fim, se há algum recurso indisponível. Caso alguma destas premissas seja verdadeira, então o modelo executa algumas ações que atrasarão o início da produção destas ordens de produção.

Para que o modelo identifique quais máquinas estão sendo utilizadas nas ordens de produção há um estágio inicial de verificação das máquinas ocupadas, na transição “Iniciar Verificacao da Ocupacao das Maquinas”. Neste ponto é gerado o evento “Aguardando Maquina”, pois é neste momento que as ordens entram na fila de espera por máquinas para serem executadas. Deve-se observar que, até o momento, não houve uma transição com uma assinatura temporal associada a ela, então este trânsito das ordens de produção pelo modelo não gera perda de desempenho. Além disso, o tempo gerado pelo evento “Aguardando Maquina” não é contabilizado como perda no cálculo do OEE.

Na etapa seguinte, verifica-se se a máquina não está ocupada processando outro produto, esta tarefa é realizada pela transição “Verificar Ocupacao das Maquinas”. Para que isto ocorra é necessário consultar uma lista de máquinas ocupadas no lugar “Maquinas Ocupadas” e do último produto que foi processado em cada uma destas máquinas.

A relação entre o último produto processado em cada máquina é mantida no lugar “Ultimo Produto Produzido”. Se a máquina estiver ocupada e processando o mesmo produto da ordem, significa que a máquina está disponível para aquela ordem. Isto também é verdadeiro se não houver produto em processo na máquina. Neste caso a ordem pode passar para o lugar “Maquina Disponivel”, caso contrário, ele ficará retido no lugar “Verificando Ocupacao das Maquinas” até que a ordem em processo termine.

Figura 27 - Sub-Rede “Verificar\_Recursos”



Fonte: o autor, 2011

Se a máquina não estiver ocupada, é realizada uma verificação, com o intuito de saber se há alguma parada programada para aquele instante. A transição “Iniciar Parada Programada” é de alta prioridade, para garantir que as outras transições conectadas ao lugar “Maquina Disponível” não ocorram antes das paradas programadas. As paradas programadas são inseridas no lugar “Paradas Programadas” e devem ser informadas com a assinatura temporal do momento no qual devem ocorrer. Após realizar estas paradas a transição “Finalizar Parada Programada” pode ser disparada e, se não houver outra parada programada, a ordem pode voltar para o estado de máquina disponível.

A etapa seguinte é a realização de setup de máquina, a qual é necessária se a máquina estava trabalhando com algum produto diferente do especificado na ordem de produção atual. Desta forma, a transição “Iniciar Setup” não é disparada se o lugar “Ultimo Produto Produzido” possuir algum *token* com a máquina e o produto da ordem que está transitando no lugar “Maquina Disponível”. Se houver necessidade de *setup*, a ordem de produção passa pelo lugar “Setup”, depois deste tempo de parada, retorna ao lugar “Maquina Disponível” através do disparo da transição “Finalizar Setup”. A porta de entrada associada ao lugar máquina disponível está conectada à sub-rede “Inspeccionar\_Produto”, conforme será visto mais adiante.

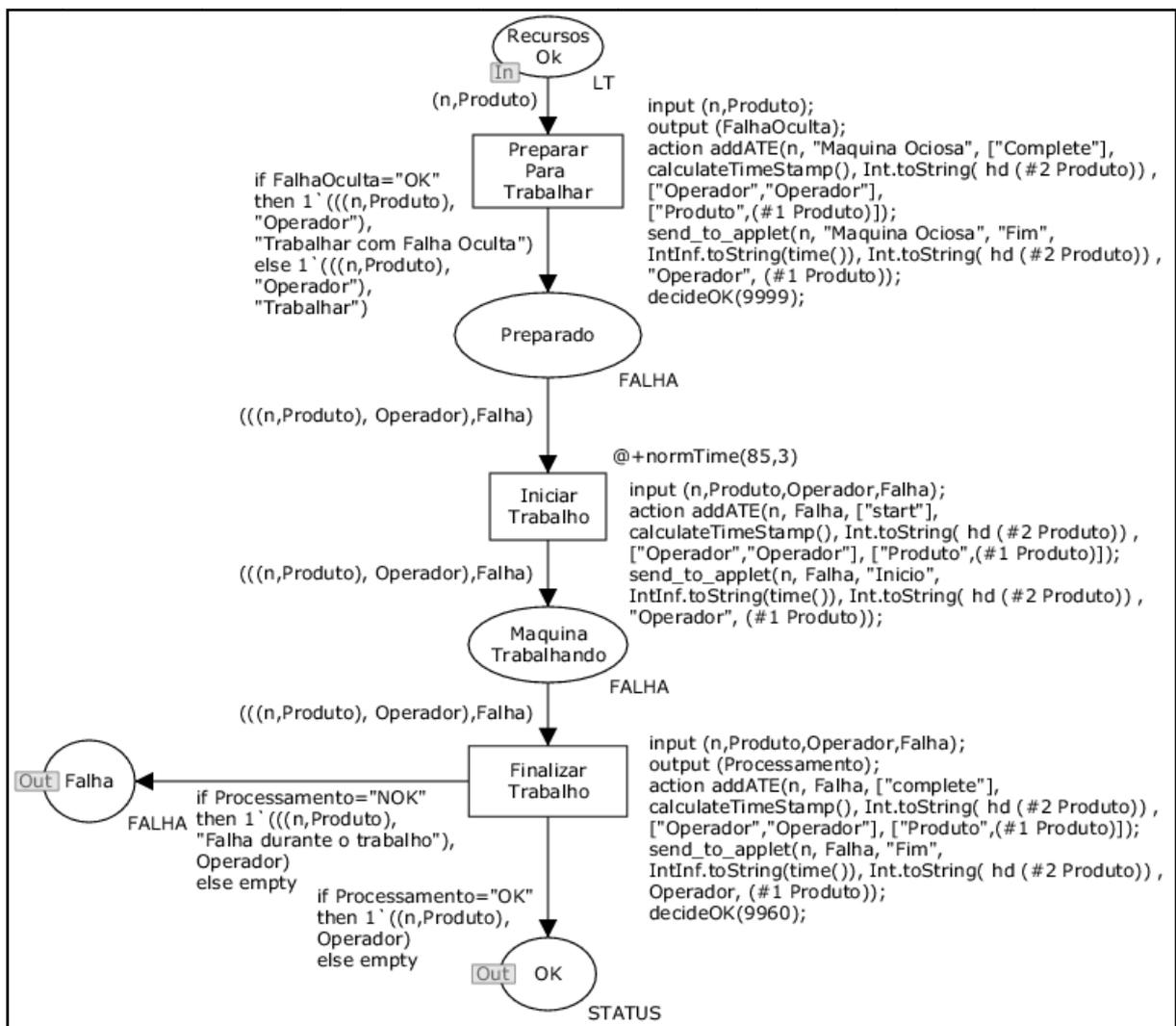
A transição “Verificar Demais Recursos” possui um arco inibitório para evitar a sua execução quando o *setup* se faz necessário. Assim, não havendo necessidade de configurar a máquina, ela está disponível para produzir e os demais recursos do processo são verificados. A transição “Verificar Demais Recursos” é disparada e realiza o processo de decisão da trajetória da ordem de produção em função da probabilidade de faltar algum recurso, mão de obra ou matéria prima. A função “decideOK” recebe o valor da probabilidade dos recursos estarem disponíveis e retorna um valor “OK” se eles estiverem disponíveis.

Se algum recurso estiver faltando, o valor “NOK” é retornado, então outra função é chamada para indicar se o recurso faltante é do tipo “MDO”, mão de obra. ou “MP”, matéria prima. Para determinar qual recurso faltou é utilizada a função “faltaMDO”, para a qual é informada a probabilidade de falta de mão de obra em relação à ocorrência de falta de matéria prima. Na ocorrência de uma parada por falta de algum recurso a ordem segue para a sub-rede “Maquina\_Inativa”, caso contrário ela segue para a sub-rede “Produzir”, que será mostrada no item a seguir.

### 3.3.3 Sub-Rede “Trabalhar”

Com os recursos necessários à operação da máquina verificados, pode-se iniciar então o trabalho da máquina, a sub-rede responsável por esta operação é a “Trabalhar” e pode ser observada na Figura 28. As ordens entram nesta sub-rede através do lugar “Recursos OK” e passam pela transição “Preparar Para Trabalhar”, nesta transição é chamada a função “decideOK” para verificar se a operação será realizada com falha oculta ou ocorrerá normalmente. Se ocorrer alguma falha oculta, a variável falha recebe o valor “Trabalhar com Falha Oculta”, caso contrário, recebe o valor “Trabalhar”.

Figura 28 - Sub-Rede “Trabalhar”



Fonte: o autor, 2011

Com a máquina preparada para trabalhar, o estado de máquina ociosa é encerrado e o trabalho pode ser iniciado com a transição “Iniciar Trabalho”, ela é a responsável

por adicionar o tempo de ciclo ao tempo da ordem de produção. Após a execução desta transição a ordem é processada pela máquina e o lugar assumido no modelo é “Maquina Trabalhando”.

Decorrido o tempo de ciclo da máquina, a transição “Finalizar Trabalho” pode ser disparada, e o ciclo pode ser encerrado. Além do registro do final do ciclo de máquina, nesta transição é definido se ocorreu alguma falha com a máquina durante este último ciclo. Isto é feito através da função “decideOK”, para a qual é informada a probabilidade de não ocorrência de falha.

Se não ocorrer alguma falha, a ordem é encaminhada para o lugar “Maquina pronta para a retirada do produto” na rede principal. Caso contrário, é enviada para o lugar “Maquina em Falha” na rede principal e, na sequência, para a sub-rede “Maquina\_Inativa”, a qual será vista no próximo item.

### **3.3.4 Sub-Rede “Maquina\_Inativa”**

Ao ocorrer uma falha de máquina ou externa a ela as ordens de produção são encaminhadas para a sub-rede “Maquina\_Inativa” (Figura 29). Considerando-se, inicialmente, o caso anterior, no qual a falha ocorre durante o ciclo de máquina, o *token* entra pelo lugar “Falha Ocorrida” e passa pela transição “Iniciar Parda por Falha”. Neste instante, são gerados o tempo de atraso por falha e o registro do evento “Falha durante o trabalho”, o qual foi gerado na sub-rede “Sub\_Maq\_Prod”. Com isso, o estado assumido é “Maquina em Falha”, no qual a ordem permanece durante o tempo de parada por falha.

Passado o tempo de parada por falha, a transição “Finalizar Parada por Falha” é ativada e o evento de parada por falha é finalizado. Durante este período de parada a máquina era o recurso que estava indisponível, assim quando a máquina está novamente disponível para produzir, o estado assumido é “Recursos OK”. O *token* é encaminhado então para a sub-rede “Verificar\_Recursos”, vista anteriormente. Isto é necessário, pois após o reparo da máquina algum dos recursos pode não estar disponível.

Considerando-se que houve falta de mão de obra ou de matéria prima, a porta de entrada para a sub-rede é associada ao lugar “Recursos NOK”. Quando este caminho é assumido, a informação sobre qual recurso está faltando é anexada à ordem de produção.

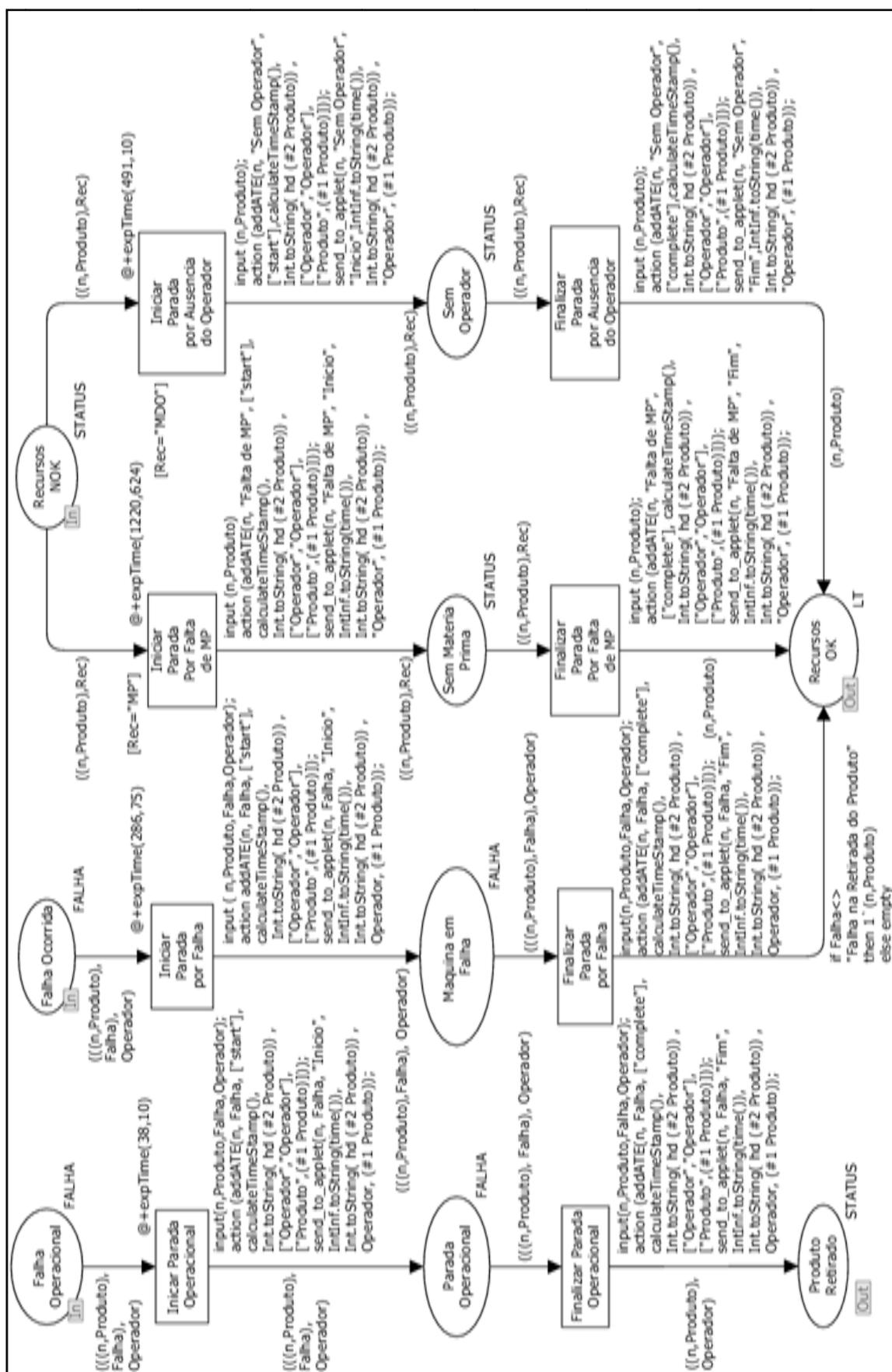
Se o recurso que estiver faltando for matéria prima, então a transição “Iniciar Parada por Falta de MP” é disparada, agregando o tempo de parada à ordem e registrando o início do evento “Falta de MP”. A ordem permanece no estado “Sem Materia Prima” até que a transição “Finalizar Parada por Falta de MP” seja disparada. Quando isto ocorre é feito o registro do final do evento “Falta de MP”, e a ordem é encaminhada para o estado “Recursos OK”, voltando, novamente, para a sub-rede “Verificar\_Recursos”.

De outra forma, se o recurso que estiver faltando for mão de obra, a transição disparada é “Iniciar Parada por Ausencia do Operador”. Com isso, a ordem permanece por um tempo no estado “Sem Operador” e, na sequência, a transição “Finalizar Parada por Ausencia do Operador” é disparada. O evento “Sem Operador” é encerrado e o lugar ocupado é “Recursos OK”.

Na sub-rede “Maquina\_Inativa” há ainda uma porta para a entrada das ordens que estão em modo de falha operacional, esta falha é gerada na sub-rede “Retirar\_Produto”. As ordens que seguem por este caminho passam pela transição “Iniciar Parada Operacional”, permanecem, por um intervalo de tempo, no estado “Parada Operacional” e saem dele quando a transição “Finalizar Parada Operacional” é executada.

Durante este trajeto são registrados os eventos de início e fim da “Parada Operacional”, este evento é encaminhado da sub-rede “Retirar\_Produto” através da variável “Falha”. As ordens saem desta sub-rede através da porta “Produto Retirado”, na rede principal. Na próximo item será vista a sub-rede “Retirar\_Produto” (Figura 30).

Figura 29 - Sub-Rede "Maquina\_Inativa"

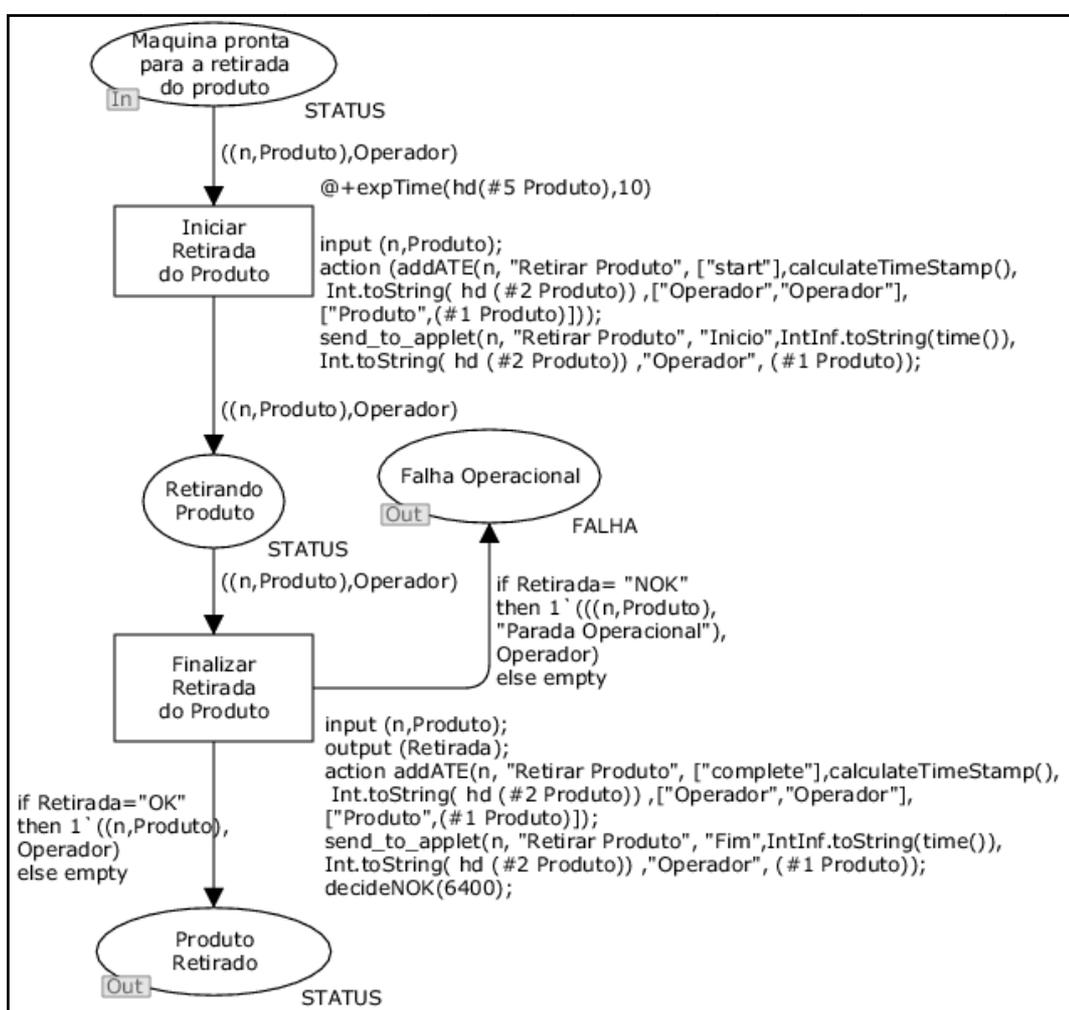


Fonte: o autor, 2011

### 3.3.5 Sub-Rede Retirar\_Produto

Após sair da sub-rede “Sub\_Maq\_Prod”, se não houver alguma falha operacional, a ordem entra na sub-rede “Retirar\_Produto”, Figura 30, através da porta “Maquina pronta para a retirada do produto”. A transição “Iniciar Retirada do Produto” é disparada e o tempo de retirada do produto é associado à ordem. Durante o processo de manipulação do produto (retirada do produto pronto e inserção da matéria prima para o próximo ciclo) a ordem permanece no estado “Retirando Produto”. A transição “Finalizar Retirada do Produto” é disparada e, se não ocorrer alguma falha operacional neste processo, a ordem ocupará o lugar “Produto Retirado” na rede principal. Esta verificação é feita pela função “decideNOK”, na qual é deve ser inserida a probabilidade de ocorrência

Figura 30 - Sub-Rede Retirar\_Produto



Fonte: o autor, 2011

Para finalizar a manipulação do produto é executada a transição “Finalizar Retirada do Produto”, se não ocorrer alguma falha operacional neste processo, a ordem ocupará o lugar “Produto Retirado” na rede principal. Esta verificação é feita pela função “decideNOK”, na qual é deve ser inserida a probabilidade de ocorrência

de uma falha durante o manuseio do produto. Caso a falha ocorra, a ordem ocupará o lugar “Falha Operacional” e será encaminhada para a sub-rede “Maquina Inativa”.

### **3.3.6 Sub-Rede “Inspeccionar\_Produto”**

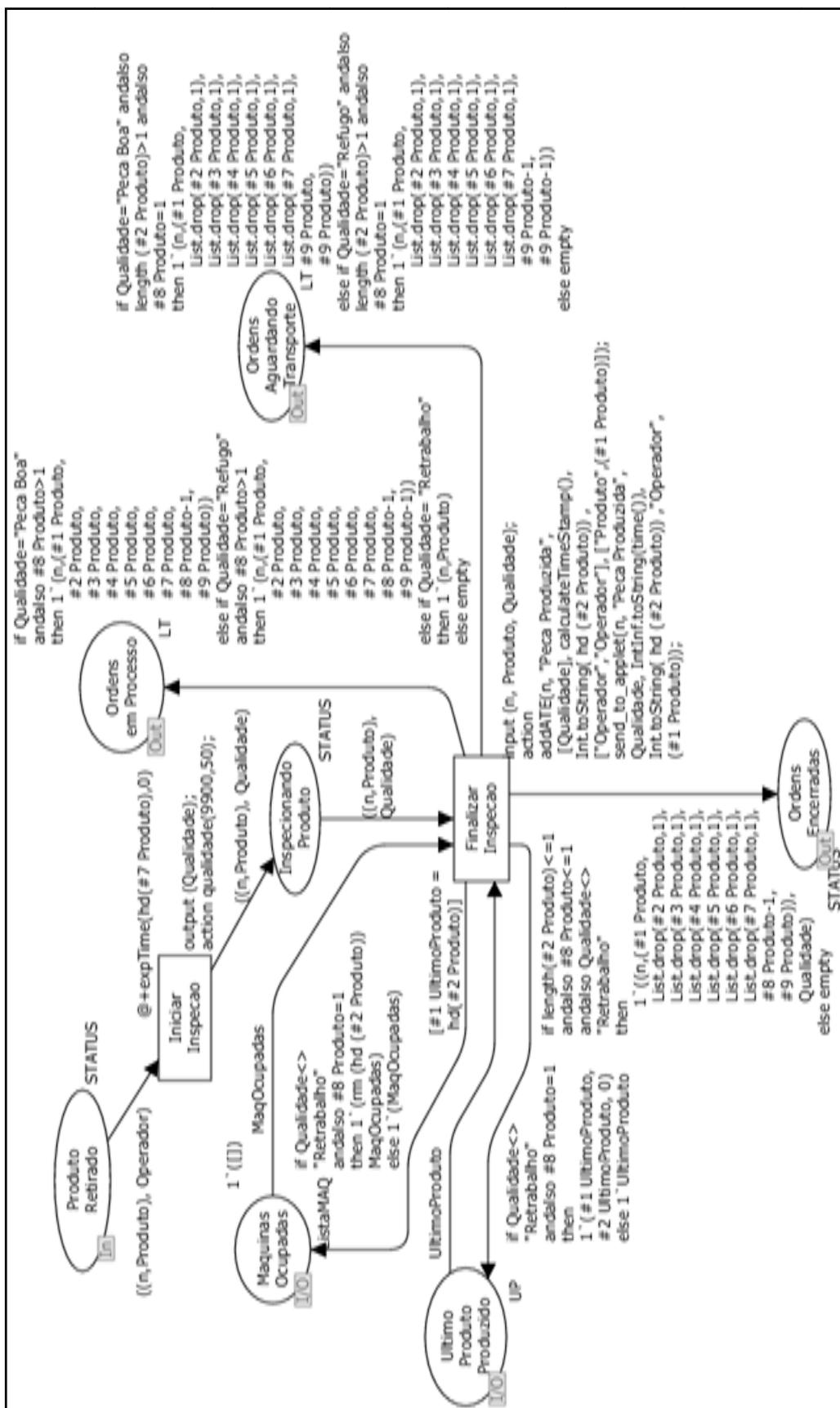
Após a retirada de cada unidade do produto da máquina na qual ela estava sendo processada, o próximo passo é a inspeção do produto, realizada na sub-rede “Inspeccionar\_Produto”, Figura 31. A porta de entrada nesta sub-rede é o lugar “Produto Retirado”, a partir deste ponto, as ordens entram na transição “Iniciar Inspecao”. Neste elemento do modelo ocorre a adição do tempo de inspeção de cada peça da ordem e, também, o processo de decisão da qualidade da peça produzida.

A função “qualidade” recebe os valores das probabilidades das peças boas e dos refugos. Desta função são gerados três valores, “Peca Boa”, “Refugo” ou “Retrabalho”, que serão associados a ordem e são relativos à uma das unidades do produto em processo. Durante o tempo de inspeção a ordem permanece no lugar “Inspeccionando Produto”, aguardando a execução da transição “Finalizar Inspeção”.

Esta transição finaliza o processo de inspeção e define a rota que a ordem irá seguir em função de alguns critérios de decisão. Para tal, é feita uma verificação das máquinas ocupadas e dos últimos produtos em processo para cada máquina. As variáveis “MaqOcupadas” e “UltimoProduto” são atualizadas em função da qualidade gerada para as peças das ordens.

Se a quantidade de peças processadas na primeira máquina, da lista de máquinas pela qual a ordem deve transitar, já atingiu o número de peças da ordem, então ela é encaminhada para o transporte. Ao mesmo tempo, a máquina na qual a ordem estava sendo processada é liberada para outra ordem. No arco que chega ao lugar “Ordens Aguardando Transporte” é realizada a atualização da contagem de peças já processadas para a ordem.

Figura 31 - Sub-Rede "Inspeccionar\_Produto"



Fonte: o autor, 2011

Se o número de unidades processadas for menor que o valor contido na ordem, ou ainda, se a peça inspecionada for do tipo “Retrabalho” a ordem é encaminhada para o lugar “Ordens em Processo”. Este lugar possui uma porta de saída para a sub-rede “Verificar\_Recursos”, nesta última, a porta de entrada utilizada é o lugar “Maquina Disponível”. A partir deste lugar são realizadas novamente as verificações de recursos e paradas.

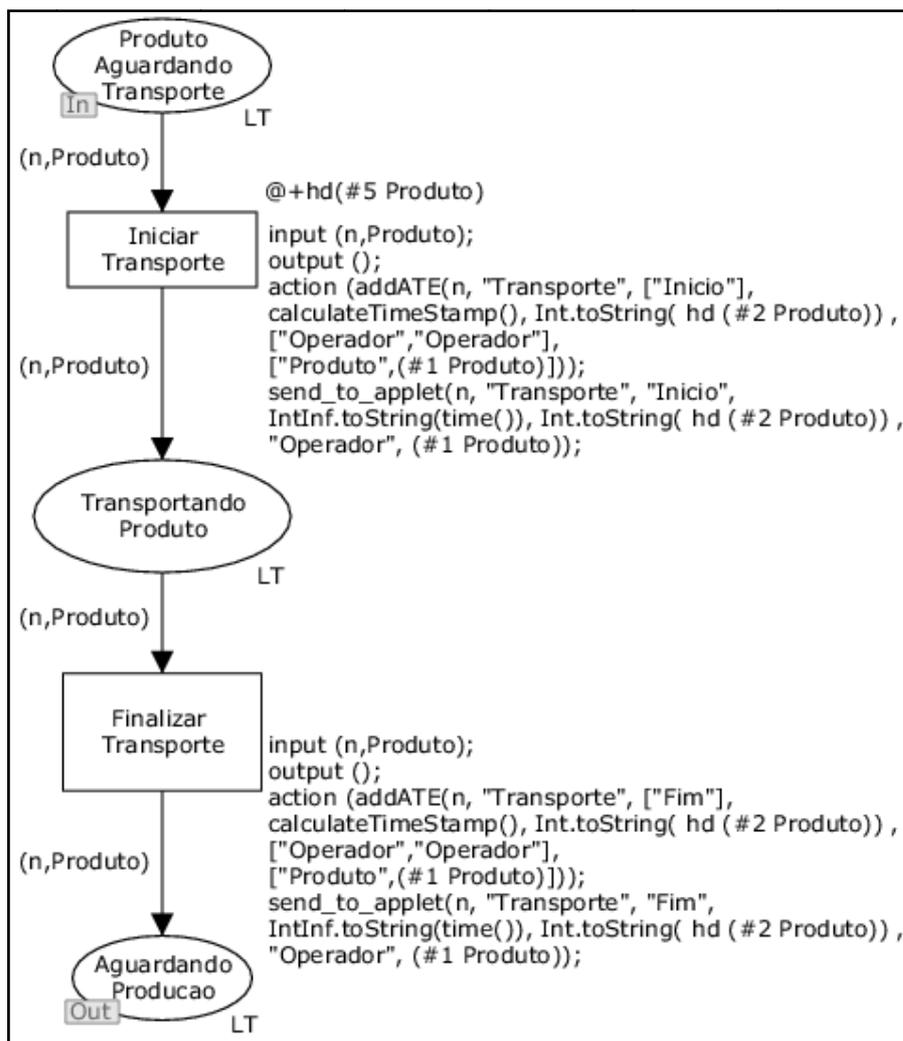
Se a ordem já atingiu o número total de peças programadas em todas as máquinas da sequência de produção, ela é direcionada para o lugar “Ordens Encerradas”. Todas as ordens chegam a este lugar quando a simulação está completa.

### **3.3.7 Sub-Rede Transportar\_Produto**

Para simular a função do transporte do produto das ordens entre as máquinas da sequência de fabricação é utilizada a sub-rede “Transportar\_Produto”. A porta de entrada desta sub-rede é o lugar “Produto Aguardando Transporte”, a partir do qual as ordens atravessam a transição “Iniciar Transporte”. Neste momento ocorre a adição dos tempos de transporte dos produtos entre as máquinas. Estes tempos de transporte são carregados junto com as ordens e podem variar de acordo com o produto que será produzido.

Também é possível variar o tempo de transporte em função da sequência de máquinas que será utilizada. Após estes tempos serem associados às ordens elas permanecem no estado “Transportando Produto”. Por fim a transição “Finalizar Transporte” é executada e as ordens entram no estado “Aguardando Produção”. Este último estado possui uma porta de saída vinculada à rede principal. No item a seguir será visto o software desenvolvido para interface entre o CPN Tools e um sistema de informação de chão de fábrica.

Figura 32 - Sub-Rede Transportar\_Produto



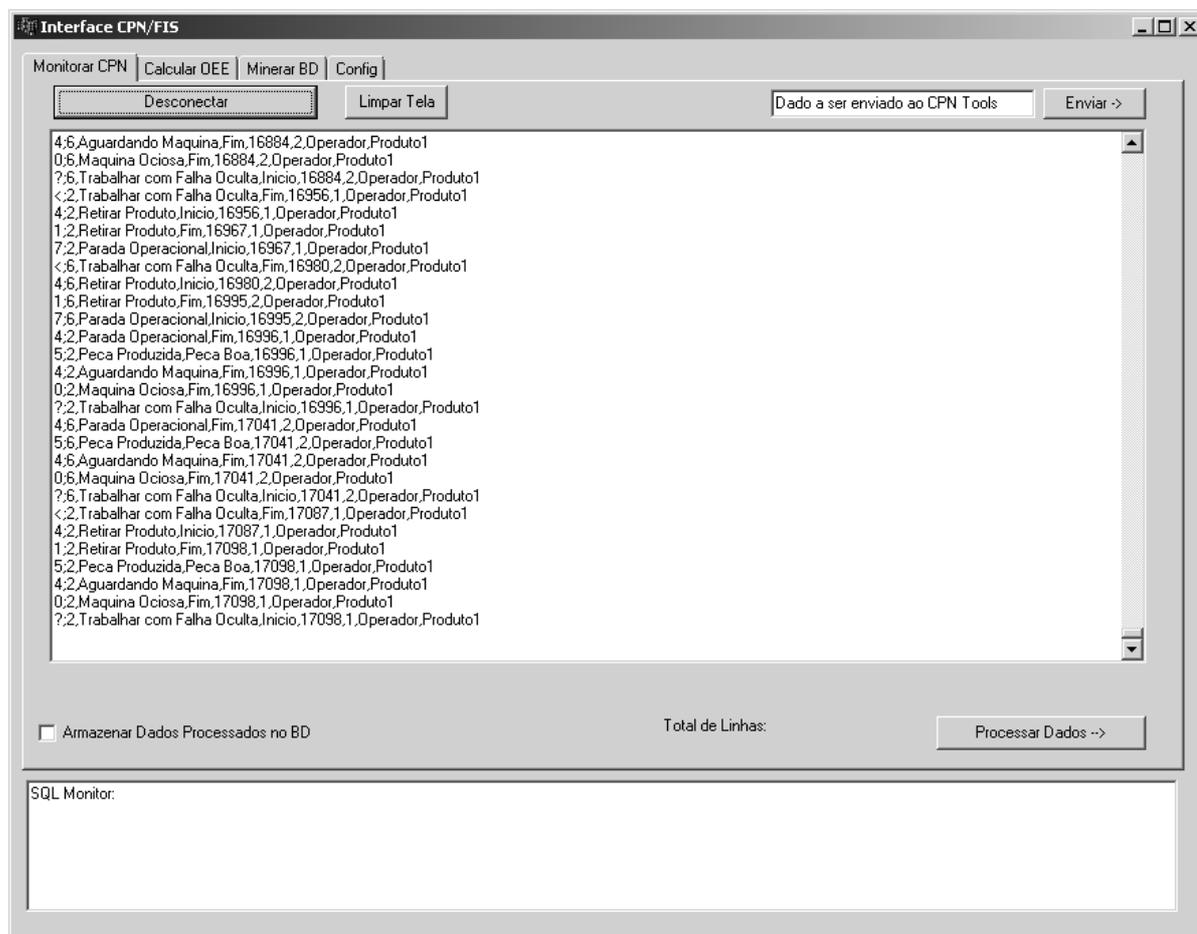
Fonte: o autor, 2011

### 3.4 INTERFACE DESENVOLVIDA EM C++

Os eventos gerados pelo modelo no CPN Tools são transmitidos por uma porta de comunicação via soquete. Para analisar estes eventos gerados pelo modelo foi desenvolvida uma interface capaz de receber estes eventos e interpretá-los (Figura 33). De forma que a partir destes eventos pode ser realizado o cálculo de índices de desempenho, como o OEE.

Se a opção de armazenamento dos eventos no banco de dados for marcada, é possível acessar os dados das simulações posteriormente para análises futuras. Porém, a operação de escrita na base de dados é relativamente lenta, então o processo de análise tende a ficar mais lento.

Figura 33 - Tela da Interface CPN/FIS



Fonte: o autor, 2011

A interface possui a funcionalidade de cálculo do OEE a partir dos eventos gerados pelo modelo. De forma que o OEE pode ser calculado a partir da base de dados ou diretamente da lista de eventos recebidos, isto torna o processo de análise mais ágil. Para que a interface possa receber os eventos, basta iniciar uma conexão no modelo do CPN Tools (servidor) e, em seguida, pressionar o botão conectar na Interface CPN/FIS (cliente).

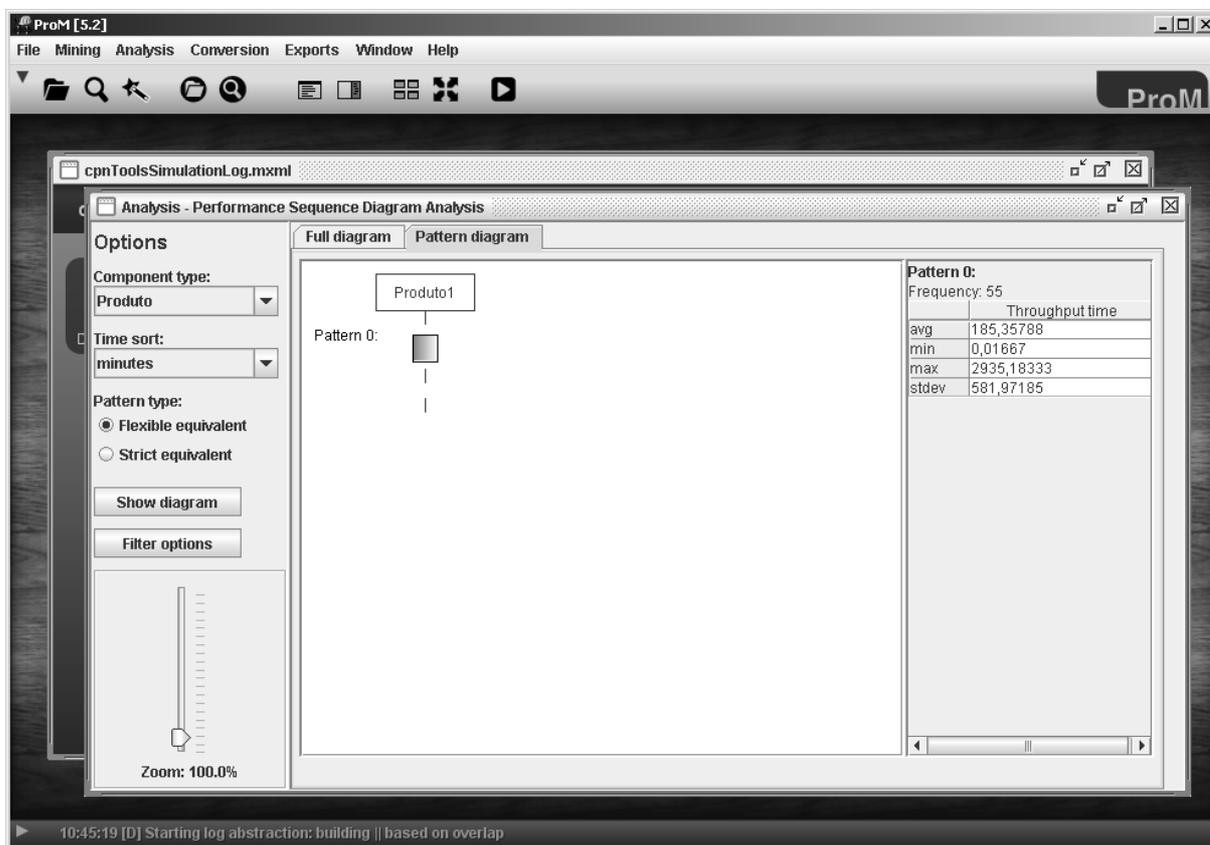
Para calcular o OEE das máquinas simuladas, a Interface realiza acessos ao banco de dados de um FIS, devendo este possuir uma estrutura de dados de acordo com aquela observada na Figura 22. Os tempos de ciclo teóricos para cada produto em cada máquina devem estar armazenados nesta base de dados, pois o OEE é calculado a partir destes valores. A estrutura de armazenamento destes dados é definida pela tabela "Maquina\_Produto" desta mesma Figura. Desta forma o software serve tanto como interface quanto como ferramenta de análise, outras ferramentas de análise serão abordadas no item a seguir.

### 3.5 FERRAMENTAS DE ANÁLISE

Como ferramenta para o cálculo do OEE dos eventos gerados pode ser utilizada a Interface CPN/FIS desenvolvida. Além dela, é possível utilizar o software ProM, o qual apresenta um conjunto de ferramentas para a análise de arquivos de Logs de eventos. Para a realização de análises no ProM são utilizados os arquivos CPNXML gerados pelo CPN Tools durante a simulação. Porém, antes de carregar os eventos no ProM, é necessário agrupar os diversos arquivos gerados pelo CPN Tools em um único arquivo, no formato MXML.

Com o *plugin* “Performance Sequence Diagram Analysis” do ProM é possível verificar quais são os padrões de sequências de eventos ocorridos durante um período de simulação. Na Figura 34 pode-se observar um exemplo de aplicação deste *plugin*, no qual, foram simuladas 55 ordens de produção do Produto 1. Com a ferramenta é possível obter a média e o desvio padrão para os tempos de atravessamento de cada produto. No capítulo a seguir serão realizadas algumas simulações envolvendo o modelo proposto.

Figura 34 - Plugin do ProM para análise de padrões de sequências de eventos



Pattern 0:	
Frequency: 55	
	Throughput time
avg	185,35788
min	0,01667
max	2935,18333
stdev	581,97185

Fonte: o autor, 2011

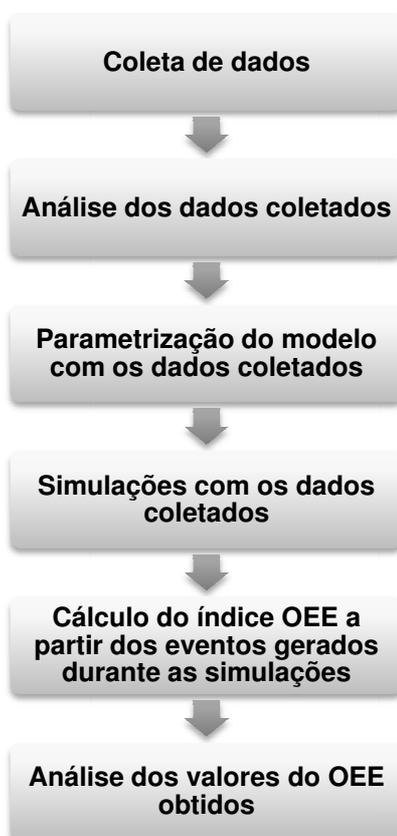
## 4 SIMULAÇÃO

Com a metodologia proposta implementada, foi possível realizar alguns experimentos envolvendo os dados de uma máquina de usinagem. Inicialmente, foi realizado um processo de validação do modelo e, na sequência, foram realizados alguns estudos de possíveis cenários para a máquina cujos dados foram coletados. As simulações e análises desta etapa serão apresentadas nos itens a seguir.

### 4.1 VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

Neste item será apresentada a forma de validação aplicada ao modelo proposto, a Figura 35 mostra os passos seguidos para a realização deste processo. De forma resumida, alguns dados de um processo produtivo foram coletados e analisados para, posteriormente, serem inseridos no modelo de simulação. Com isto, algumas replicações de simulação foram executadas e os dados gerados com estas simulações foram analisados e comparados com os dados reais de máquina.

Figura 35 - Passos executados para a validação do modelo



#### 4.1.1 Coleta de Dados

Para a realização das simulações com o modelo proposto foram coletados alguns dados relativos aos eventos de um Torno CNC. Esta máquina de usinagem está instalada em uma empresa de manufatura de médio porte, que produz peças para o setor automotivo, localizada no Vale do Itajaí em Santa Catarina. Os dados foram coletados através de um sistema de informação de chão de fábrica instalado na máquina. Através dele, os dados da máquina foram armazenados em uma base de dados online.

As informações utilizadas correspondem a quatro meses de monitoramento, a partir do mês de abril de 2011, mês de implantação do sistema na empresa. Foram coletados 15.713 registros de paradas, 12.213 tempos de ciclo e 11.508 registros de unidades produzidas. As análises destes dados serão visualizadas no item a seguir.

#### 4.1.2 Análise dos dados coletados

Os dados coletados foram classificados de acordo com os parâmetros de entrada do modelo proposto, com isto, foram gerados alguns modelos estatísticos para alimentar o modelo em RdP Colorida no CPN Tools. Para obter estes parâmetros foram executadas consultas na base de dados do caso estudado, de forma a se obter o histórico dos tempos de duração para cada tipo de parâmetro.

Na sequência, estes dados foram tratados para a retirada de discrepâncias e inseridos em um software de análise, o qual retornou as curvas que representam estes eventos no modelo. A coluna “Dados Inseridos no Modelo” da Tabela 2 mostra os resultados obtidos com este procedimento.

Tabela 2 - Parâmetros de tempo obtidos a partir dos dados coletados

<i>Parâmetros de Entrada do Modelo</i>	<i>Dados Inseridos no Modelo</i>
Tempos de Ciclo	Normal(94,5; 2,96)
Tempos de Parada por Falhas	75 + Exponencial(286)
Tempos de Parada por Falta de MP	624+Exponencial(1220)
Tempos de Parada por Falta de MDO	197+Exponencial(491)
Tempos de Parada para Retirada do Produto	10+Exponencial(1,65)
Tempos de Parada Operacional	10+Exponencial(38,2)
Tempos de Parada para Setup de Maquina	626+Exponencial(4060)

Fonte: o autor, 2011

Tabela 3 - Probabilidades obtidas para a ocorrência dos eventos do processo produtivo

<b>Probabilidades de Ocorrência dos Eventos</b>	<b>Valores Inseridos no Modelo</b>
Probabilidade de Falha Oculta	0,01%
Probabilidade de Falha de Máquina	0,40%
Probabilidade de Falha Operacional	64,0%
Probabilidade de Falta de Recursos(MP/MDO)	0,01%(28%/72%)
Probabilidade de Geração de Refugos/Retrabalhos	0,5%/0,5%

Fonte: o autor, 2011

Pode-se perceber que os Tempos de Ciclo seguiram uma distribuição de probabilidade Normal, enquanto que as paradas ficaram mais adequadas à curva Exponencial. Além dos parâmetros temporais, foram calculadas as probabilidades de ocorrência destes eventos durante a operação da máquina estuda. Estas probabilidades são utilizadas nos pontos de decisão do modelo e são apresentadas, de forma percentual, na Tabela 3.

#### **4.1.3 Parametrização do modelo com os dados coletados**

Os dados relativos aos eventos de máquina foram inseridos manualmente no modelo em RdP Colorida no CPN Tools. Alguns dos parâmetros, como as distribuições de probabilidade e os tempos de parada por falha de máquina, foram inseridos diretamente nas transições do modelo. Outros, como os tempos de ciclo, foram inseridos nos *tokens*, junto às ordens de produção, pois variam significativamente de um produto para outro.

Neste caso não foram considerados os tempos de paradas programadas, pois eles não interferem no valor do OEE. Da mesma forma, os tempos de transporte entre as máquinas foram desconsiderados, pois a simulação será realizada apenas para uma máquina. As ordens de produção que serão simuladas nesta etapa possuem 240 peças, cerca de um turno de trabalho da máquina para este produto, que será chamado de “Produto1”. Na sequência serão abordadas as simulações realizadas com estes dados.

#### **4.1.4 Simulações com os dados coletados**

Cada replicação da simulação é baseada na quantidade de peças da ordem de produção, neste caso, foram simuladas programações de ordens de 240 peças do “Produto1”. Os eventos gerados no final das simulações, Tabela 4, foram enviados a um software que possui uma interface de comunicação com o CPN

Tools, no final de cada replicação foi calculado o valor do OEE para o Torno CNC, conforme é mostrado a seguir.

Tabela 4 - Tipos de eventos gerados pelo modelo após as simulações para o Torno CNC

<b><i>Eventos Gerados pelo Modelo</i></b>
Trabalhar (Inicio)
Trabalhar (Fim)
Retirar Produto (Inicio)
Retirar Produto (Fim)
Parada Operacional (Inicio)
Parada Operacional (Fim)
Sem Operador (Inicio)
Sem Operador (Fim)
Setup (Inicio)
Setup (Fim)
Falha durante o trabalho (Inicio)
Falha durante o trabalho (Fim)
Trabalhar com Falha Oculta (Inicio)
Trabalhar com Falha Oculta (Fim)
Falta de MP (Inicio)
Falta de MP (Fim)
Maquina Ociosa (Inicio)
Maquina Ociosa (Fim)
Peca Produzida (Peca Boa)
Peca Produzida (Retrabalho)
Peca Produzida (Refugo)

Fonte: o autor, 2011

#### **4.1.5 Cálculo do índice OEE a partir dos eventos gerados durante as simulações**

Para calcular o OEE no final de cada replicação foi utilizada a Interface CPN/FIS (Figura 36). Este software recebeu e armazenou os eventos gerados durante a simulação, na sequência, foram consultados os tempos de ciclo ideais, armazenados no banco de dados do FIS. Assim, uma vez armazenados os tempos de ciclo na base de dados do FIS, não é mais necessário informar estes dados manualmente à Interface CPN/FIS para o cálculo do OEE.

Os eventos enviados pelo CPN Tools podem ser armazenados ou não em uma tabela de eventos simulados no banco de dados. Para cada replicação de simulação é gerada uma nova tabela de eventos no banco de dados, assim os

dados relativos a cada uma destas replicações podem ser consultados posteriormente para análise.

Figura 36 - Tela de cálculo do OEE na interface CPN/FIS

Maquinas	OEE da Simulação
1	64,542106628418
2	69,9134902954102
3	65,7323379516602

64,542106628418  
69,9134902954102  
65,7323379516602

SQL Monitor:

Fonte: o autor, 2011

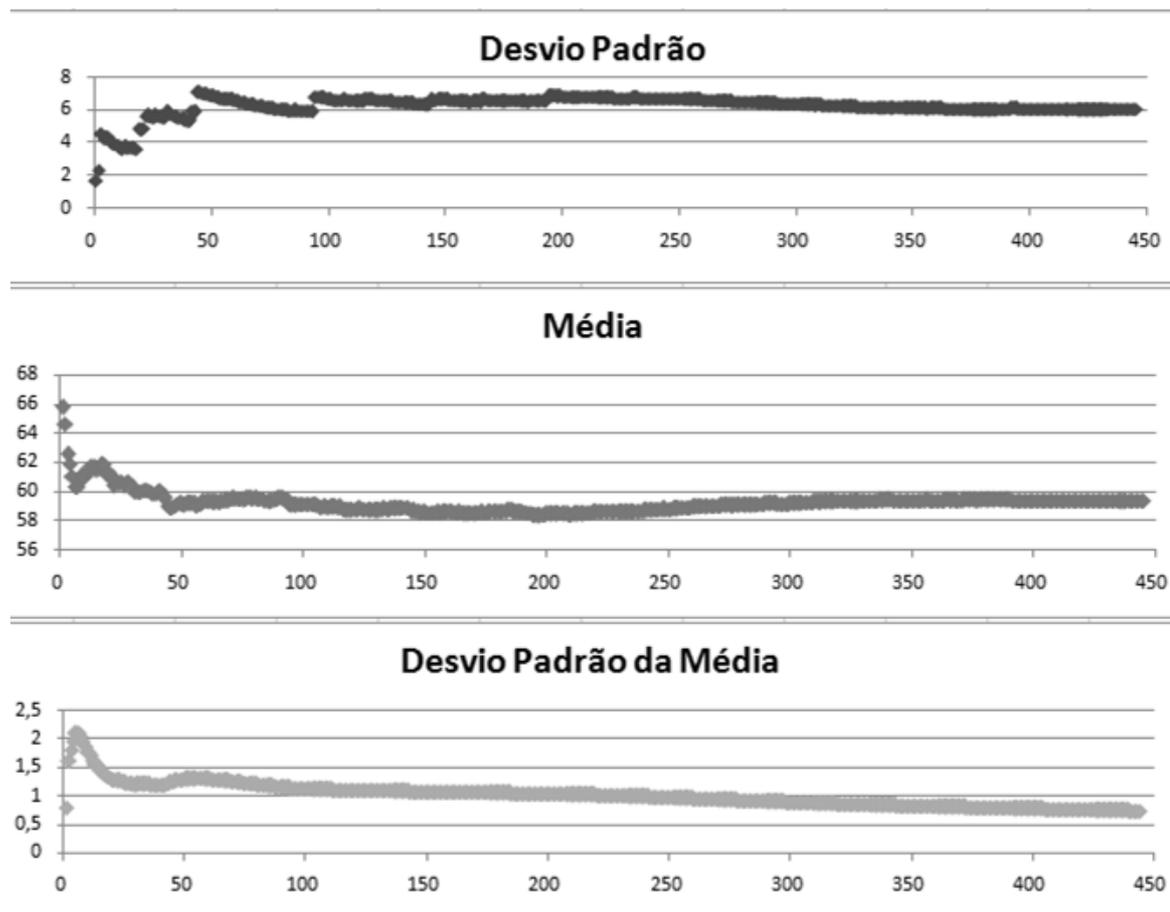
As replicações de simulação iniciais deste caso de estudo foram armazenadas na base de dados, porém, as demais não foram. Devido à grande quantidade de eventos gerados durante a simulação, o tempo de processamento requerido para o armazenamento destas informações ficou em torno de um minuto por replicação. Enquanto que, sem o armazenamento, o tempo de processamento das informações foi reduzido para cerca de dez segundos por replicação. Os valores obtidos para o OEE do Torno CNC serão trabalhados no item a seguir.

#### 4.1.6 Análise dos valores do OEE obtidos para o Produto 1

No total, foram realizadas 450 replicações das simulações das ordens de produção de 240 unidades do “Produto1”, que possui tempo de ciclo teórico de 94

segundos. O OEE médio calculado para estas replicações foi de 59,38%, com um desvio padrão de 6,05%. Os gráficos da Figura 37 mostram a evolução dos valores da média e do desvio padrão do OEE e, também, do desvio padrão da média.

Figura 37 - Comportamento do OEE ao longo das replicações de simulação, com o Produto 1

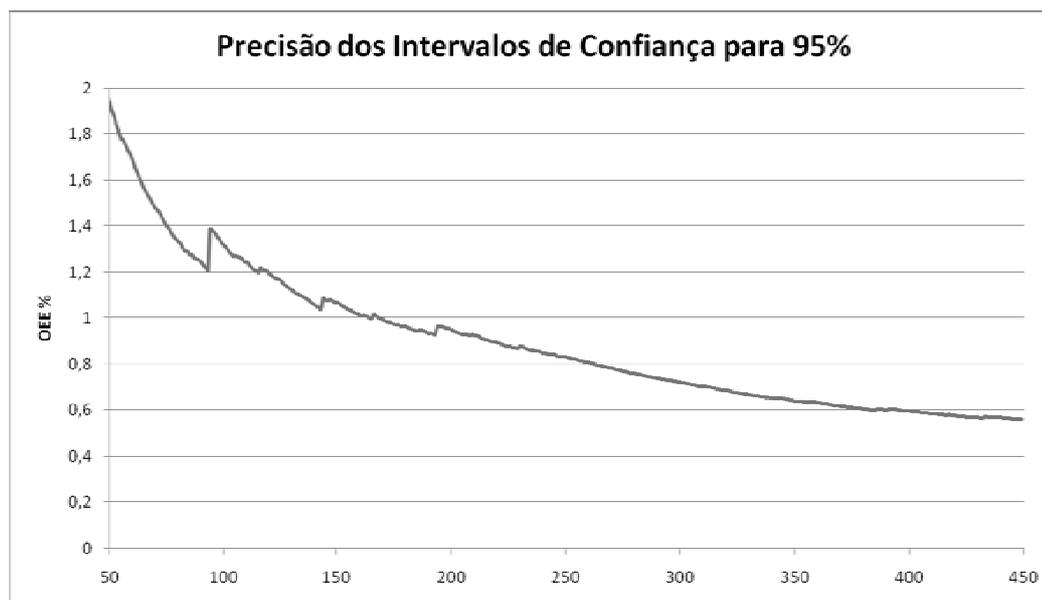


Fonte: o autor, 2011

A Figura 38 mostra a evolução dos valores calculados para a precisão dos intervalos de confiança do OEE obtido com as replicações. O nível de significância adotado foi de 95%, com isso, para 450 replicações a precisão do intervalo de confiança é de 0,56. Para um intervalo de confiança com precisão igual a 1% de OEE foram necessárias 166 replicações.

Portanto, pode-se afirmar que após 450 replicações o intervalo de confiança para os valores do OEE, com 95% de significância, é [58,82%;59,95%]. Como os tempos de ciclo variam de acordo com os produtos, no item a seguir será apresentada uma análise semelhante para o Produto 2.

Figura 38 - Precisão dos intervalos de confiança para 95% de significância para o Produto 1



Fonte: o autor, 2011

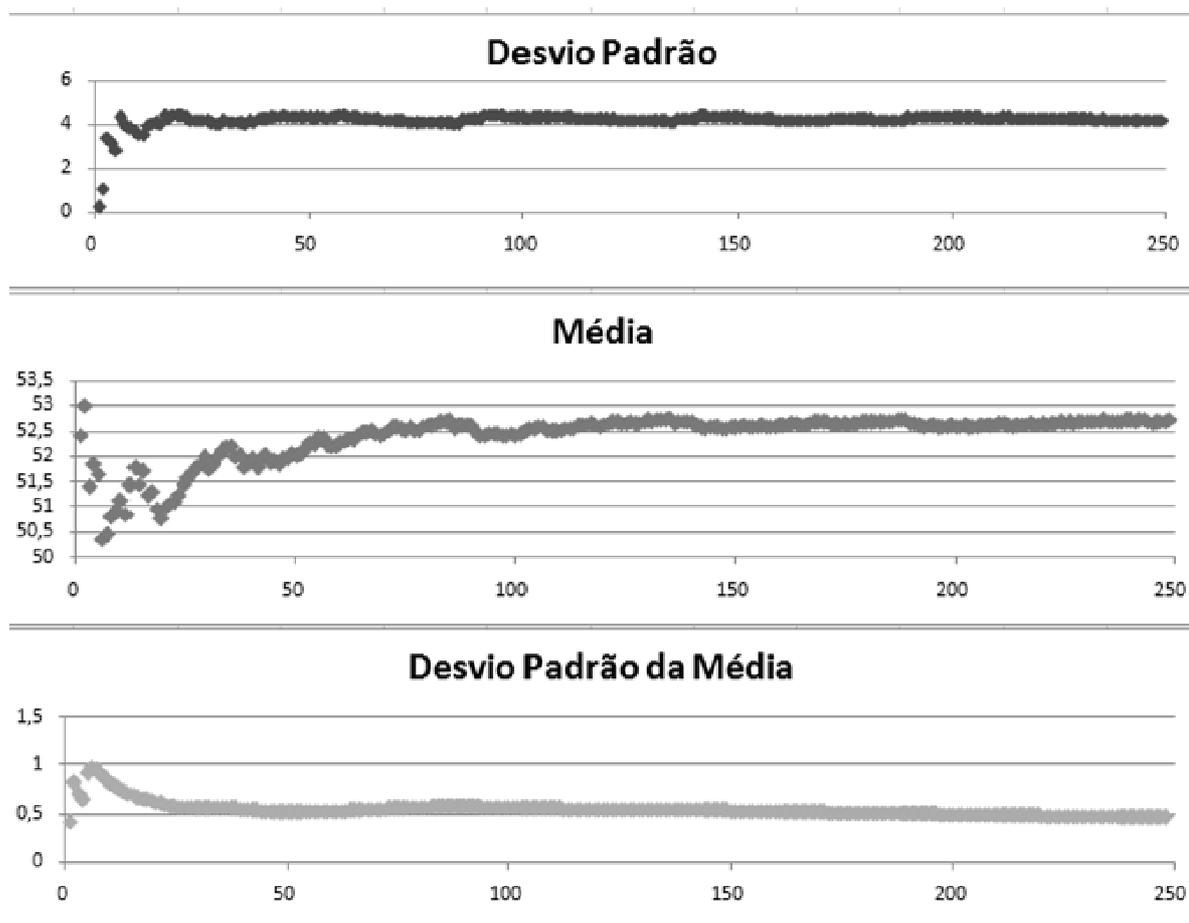
#### 4.1.7 Análise dos valores do OEE obtidos para o Produto 2

As simulações com o “Produto 2” foram feitas para ordens de produção contendo 240 peças também, as distribuições de probabilidade para os tempos de parada e as probabilidades de ocorrência destas paradas permaneceram as mesmas, neste caso apenas o tempo de ciclo foi alterado. Para o Produto 2, o tempo de ciclo teórico é igual a 104 segundos e os tempos de ciclo coletados apresentaram uma distribuição normal, com média de 132 segundos e desvio padrão de 0,901.

As curvas que representam a média e o desvio padrão dos valores do OEE e o desvio padrão da média do OEE em função do número de replicações para o Produto 2 estão na Figura 39. Neste caso, foram necessárias apenas 229 replicações para atingir a mesma precisão do intervalo de confiança do caso anterior, com o Produto 1. A precisão de 1% de OEE para o intervalo de confiança foi obtida com 70 replicações, conforme mostra a Figura 40.

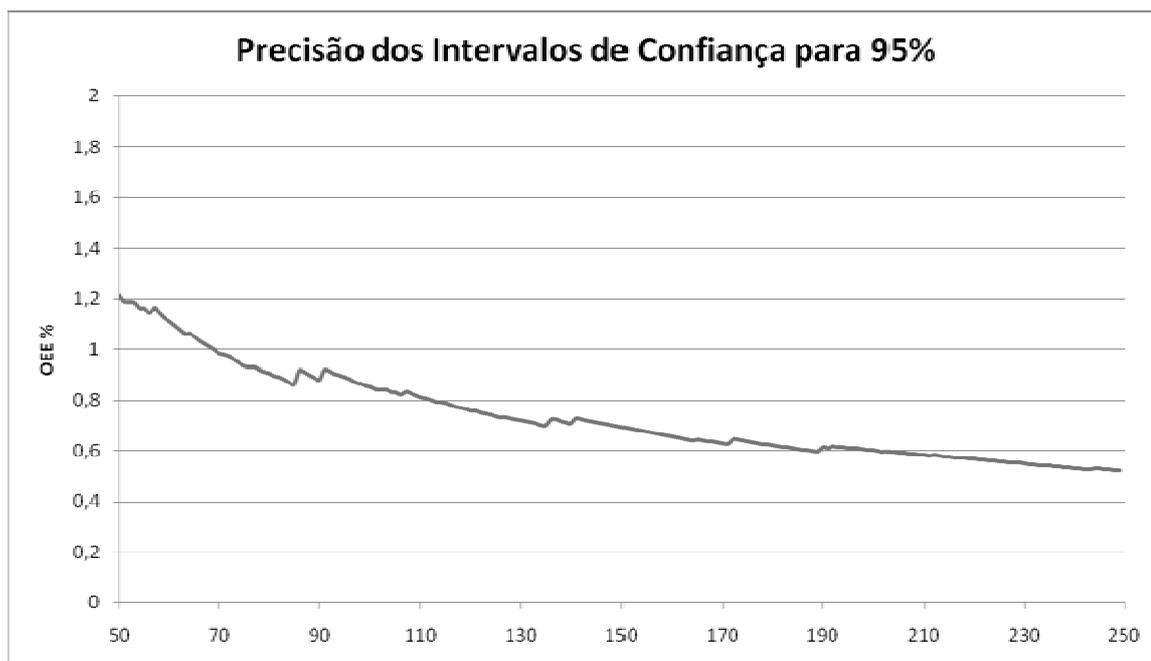
A média para 229 replicações foi de 52,67 com um desvio padrão de 4,26, o intervalo de confiança com 95% de significância para os valores do OEE com o Produto 2 é [52,19%;53,23%]. Há uma diferença de 6,63 entre os valores médios do OEE calculados para os Produtos 1 e 2.

Figura 39 - Comportamento do OEE ao longo das replicações de simulação, com o Produto 2



Fonte: o autor, 2011

Figura 40 - Precisão dos intervalos de confiança para 95% de significância para o Produto 2

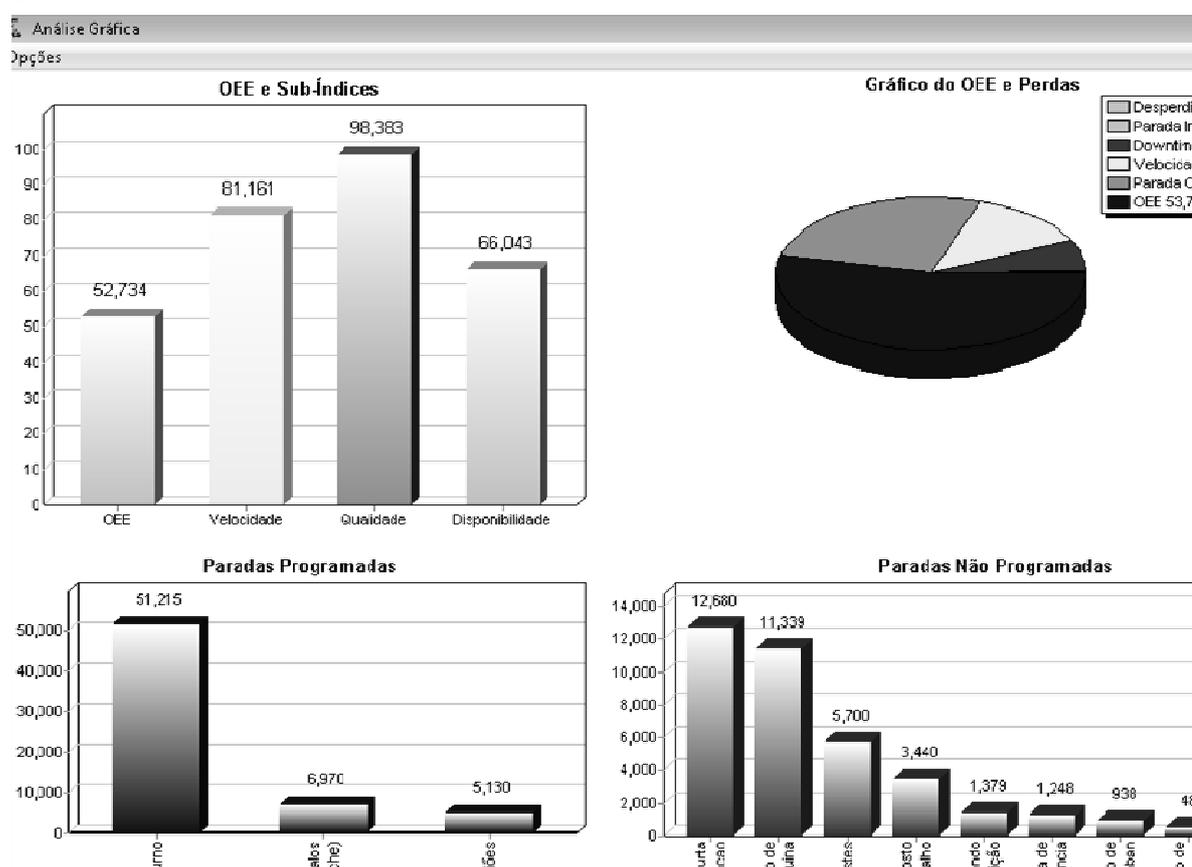


Fonte: o autor, 2011

#### 4.1.8 Comparação com os valores reais do OEE da empresa

O OEE calculado para o Produto 1 com os dados dos eventos coletados foi de 59,58% e o intervalo de confiança das simulações foi [58,82%;59,95%]. Isto indica que a estrutura das informações e as distribuições de probabilidade utilizadas na construção do modelo estão consistentes com a máquina do processo em estudo. Para o Produto 2, foi possível utilizar, também, uma amostra coletada fora do intervalo dos dados que utilizados anteriormente para parametrizar o modelo. O valor do OEE calculado para os dados desta amostra foi de 52,73%, enquanto que o intervalo de confiança para as simulações do Produto 2 foi de [52,19%;53,23%].

Figura 41- Detalhe da tela do sistema de monitoramento instalado na empresa do estudo de caso



Fonte: o autor, 2011

Na Figura 41 é mostrada uma tela do sistema P-Link instalado na empresa para monitorar e calcular os indicadores de desempenho. Isto reforça a consistência do modelo em relação a sua capacidade de representar o processo de manufatura estudado. Ainda na Figura 41, é possível verificar o valor obtido para o OEE real da amostra que estava fora do utilizado para parametrizar o modelo. Com a verificação

inicial do modelo concluída, nos itens a seguir serão apresentados alguns exemplos de aplicação do modelo.

#### 4.2 CASO 1 - SIMULAÇÃO DE UMA REDUÇÃO DE PARADAS OPERACIONAIS PARA O PRODUTO 1

Neste cenário de simulação foi utilizada a ordem de produção do Produto 1, com 240 peças programadas, e com uma redução de 10% na frequência de Falha Operacional. Com esta redução, a probabilidade de ocorrência de falha operacional passaria para 54%.

As paradas operacionais são geradas por alguns desvios nos procedimentos que devem ser executados durante o manuseio de peças entre os ciclos de máquina. Em função disto, uma ação de melhoria voltada a este tipo de paradas tem grandes chances de não gerar um custo adicional à operação, facilitando a sua implantação na empresa.

Na Figura 43 é possível ver a evolução da média e do desvio padrão do OEE após realização da melhoria proposta, e na Figura 42 a evolução da precisão do intervalo de confiança com significância de 95%. O intervalo de confiança obtido para o OEE foi [60,87;61,99], média 61,42% com precisão de 0,56. A melhoria obtida seria de 2,04% em relação ao estado anterior para o Produto1, que era de 59,38%.

Figura 42 - Evolução da precisão dos intervalos de confiança para o Caso 1

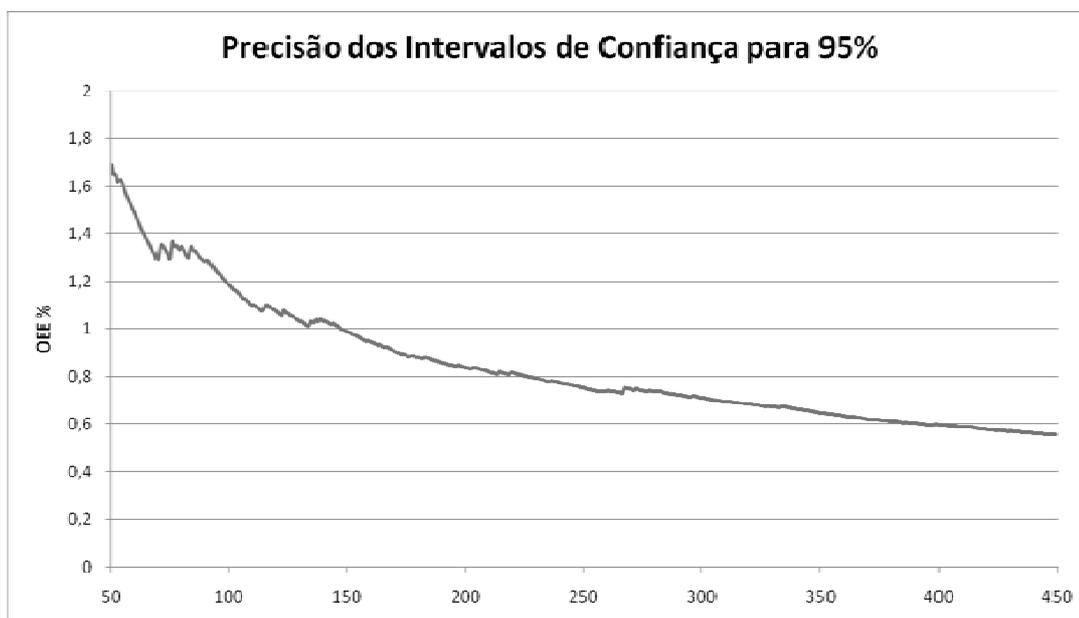
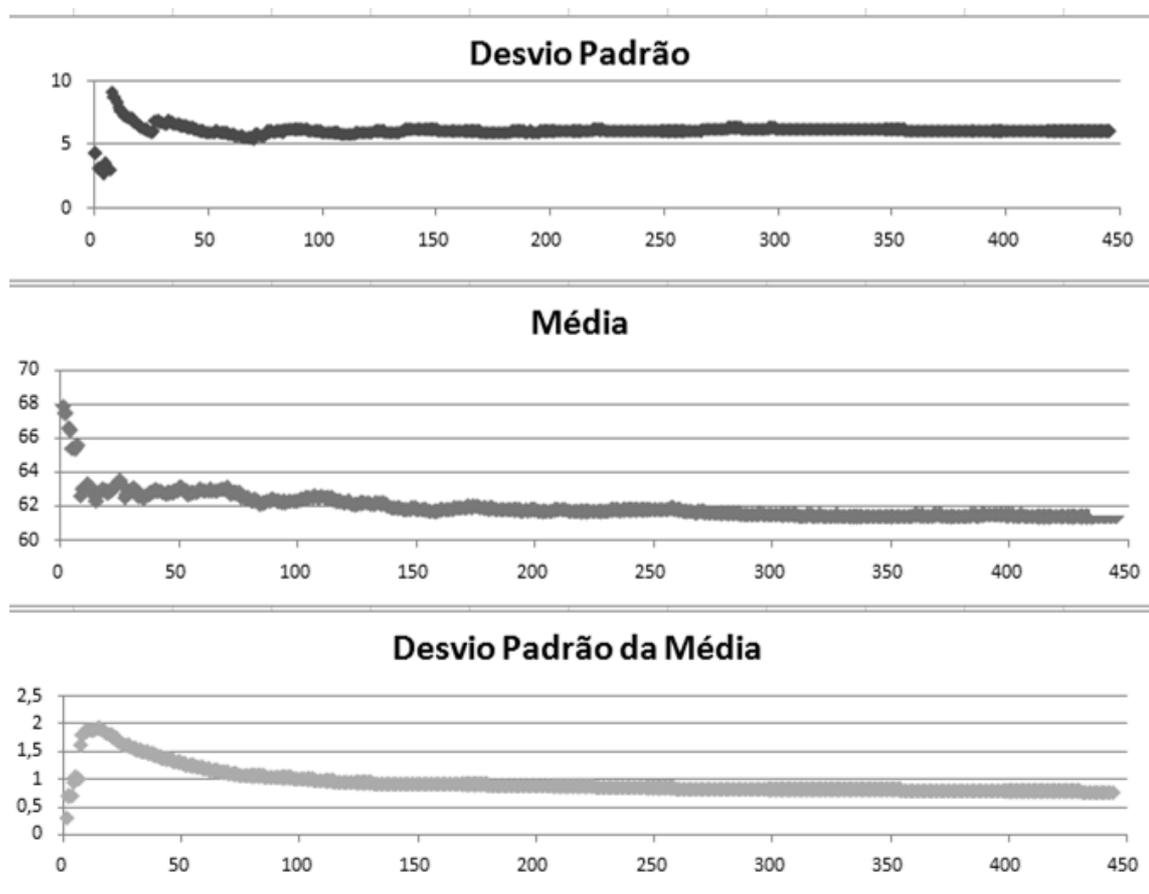


Figura 43 - Valores do OEE para as replicações do Caso 1



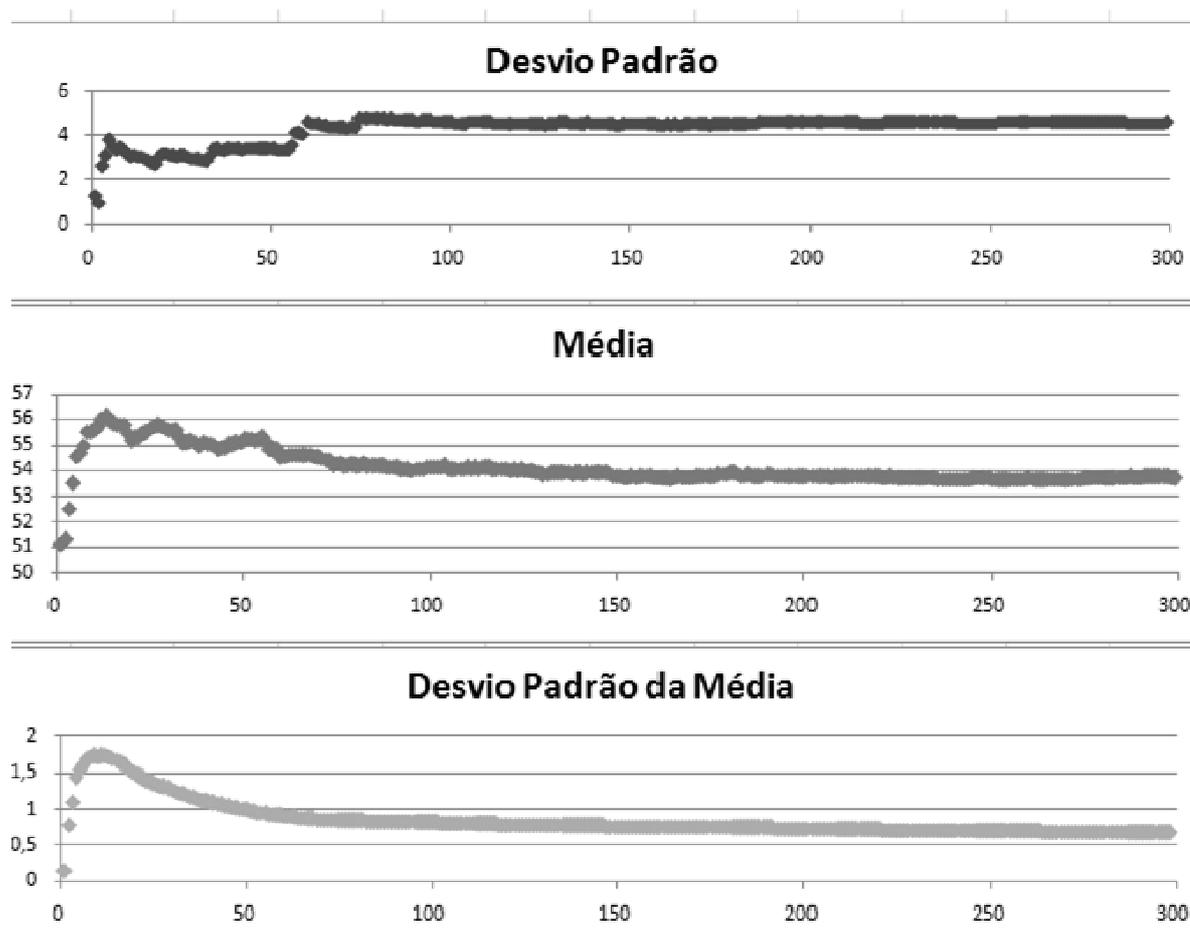
Fonte: o autor, 2011

#### 4.3 CASO 2 - SIMULAÇÃO DE UMA REDUÇÃO DE PARADAS OPERACIONAIS PARA O PRODUTO 2

No segundo caso, foi simulada a mesma melhoria do Caso 1, porém para uma ordem de produção de 240 peças do Produto 2. O intervalo de confiança obtido para o OEE deste caso foi  $[53,04;54,16]$ , média 53,60%, Figura 44, com precisão de 0,56, Figura 45. A melhoria obtida seria de 0,93% em relação ao estado anterior para o Produto 2, que estava em 52,67%. Em comparação com o Produto 1, a melhoria específica realizada teria menos impacto no valor final do OEE para as ordens de produção do Produto 2.

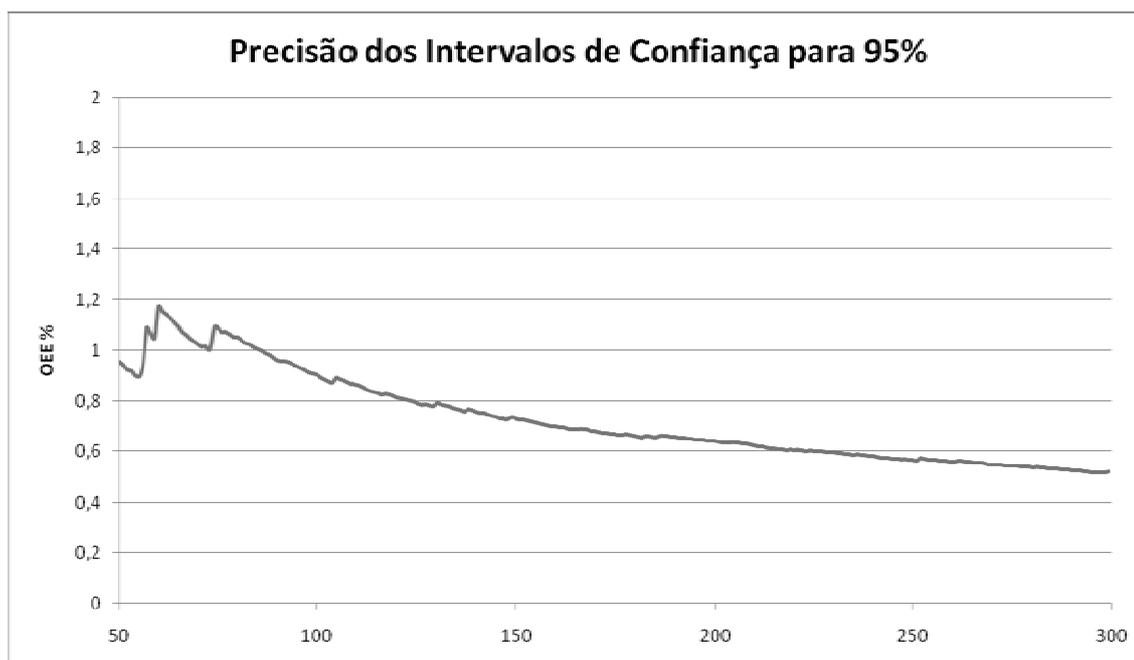
Sabe-se então que as paradas operacionais apresentam maior influência sobre o Produto 1. Com base nisto, nos próximos dois casos será avaliada uma ação de melhoria no tempo de ciclo da máquina para os dois produtos.

Figura 44 - Valores do OEE para as replicações do Caso 2



Fonte: o autor, 2011

Figura 45 - Evolução da precisão dos intervalos de confiança para o Caso 2



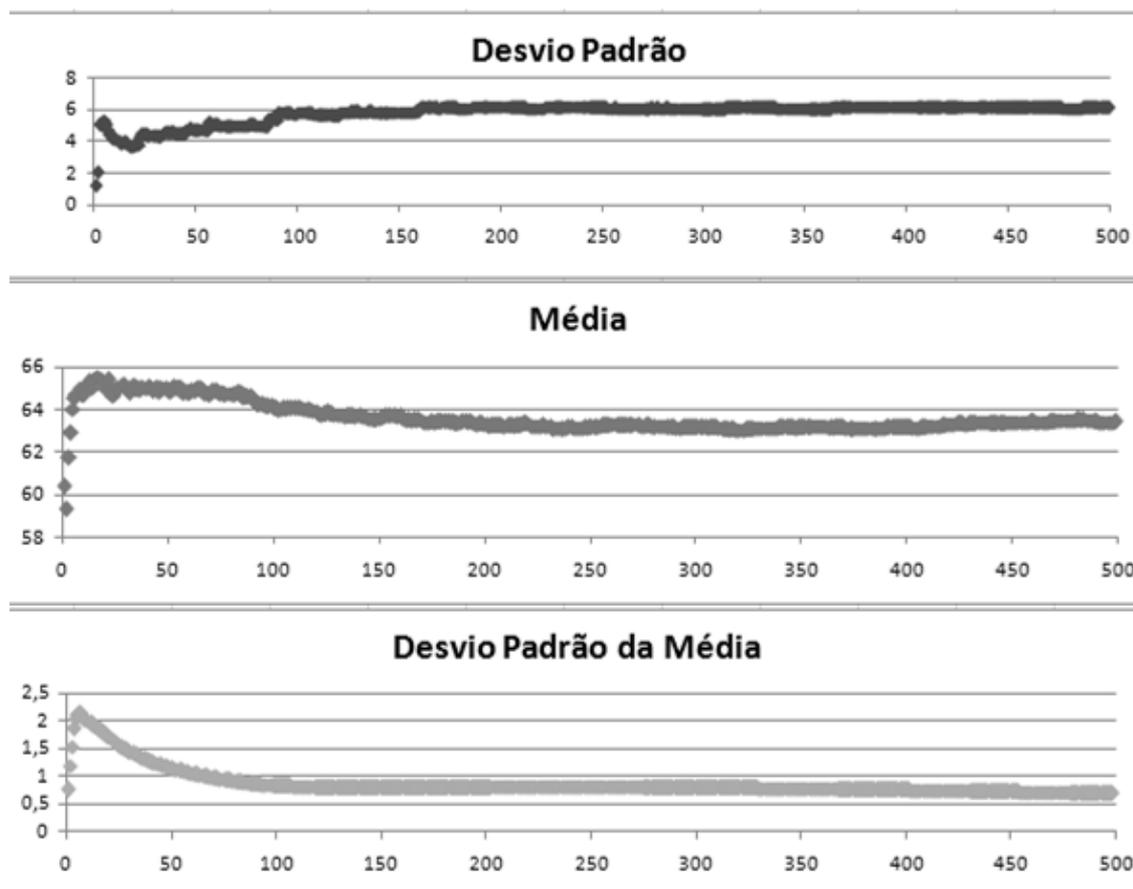
Fonte: o autor, 2011

#### 4.4 CASO 3 - SIMULAÇÃO DE UMA REDUÇÃO DO TEMPO MÉDIO DE CICLO PARA O PRODUTO 1

Neste cenário, o tempo de ciclo médio do Produto 1 foi reduzido em 10%, o valor da média passou de 94 para 85,05. A quantidade de peças programadas na ordem de produção permaneceu em 240 assim como a probabilidade inicial de ocorrência de falha operacional de 64%.

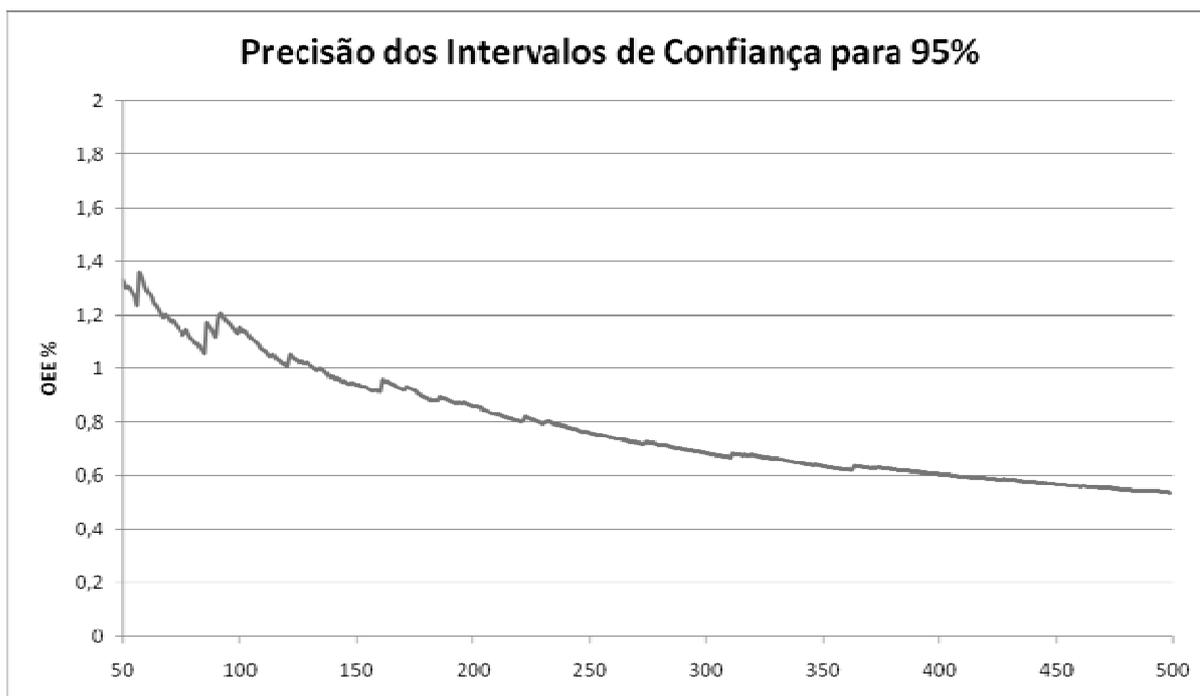
A média calculada para o OEE neste caso foi 63,41% (Figura 46) com intervalo de confiança [62,85;63,97], a um grau de significância de 95% e precisão de 0,56 (Figura 47). A melhoria seria de 4,03% de OEE a mais em relação ao valor atual do OEE para o Produto 1, 59,38%.

Figura 46 - Valores do OEE para as replicações do Caso 3



Fonte: o autor, 2011

Figura 47 - Evolução da precisão dos intervalos de confiança para o Caso 3



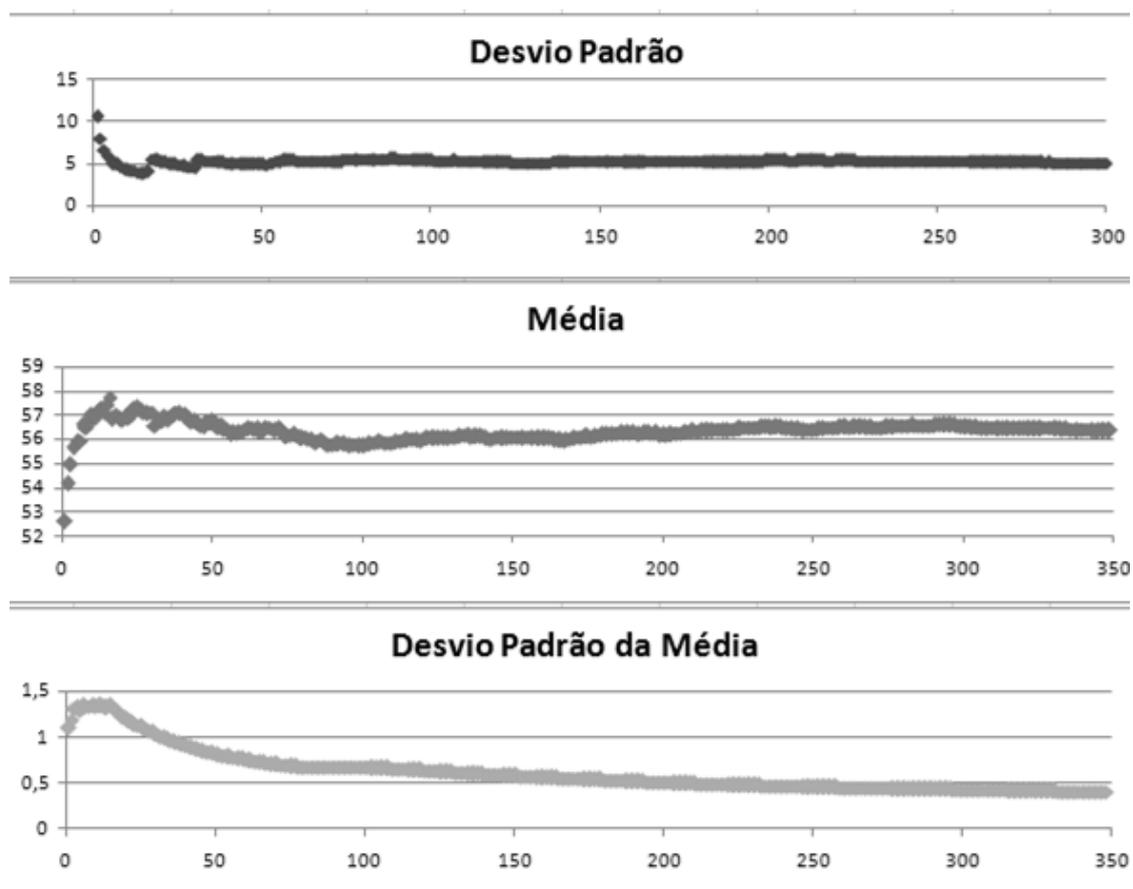
Fonte: o autor, 2011

#### 4.5 CASO 4 - SIMULAÇÃO DE UMA REDUÇÃO DO TEMPO MÉDIO DE CICLO PARA O PRODUTO 2

De forma análoga ao caso anterior, o tempo de ciclo médio do Produto 2 foi reduzido em 10%, o valor da média passou de 132 para 138,8. A quantidade de peças programadas na ordem de produção permaneceu em 240 assim como a probabilidade inicial de ocorrência de falha operacional de 64%.

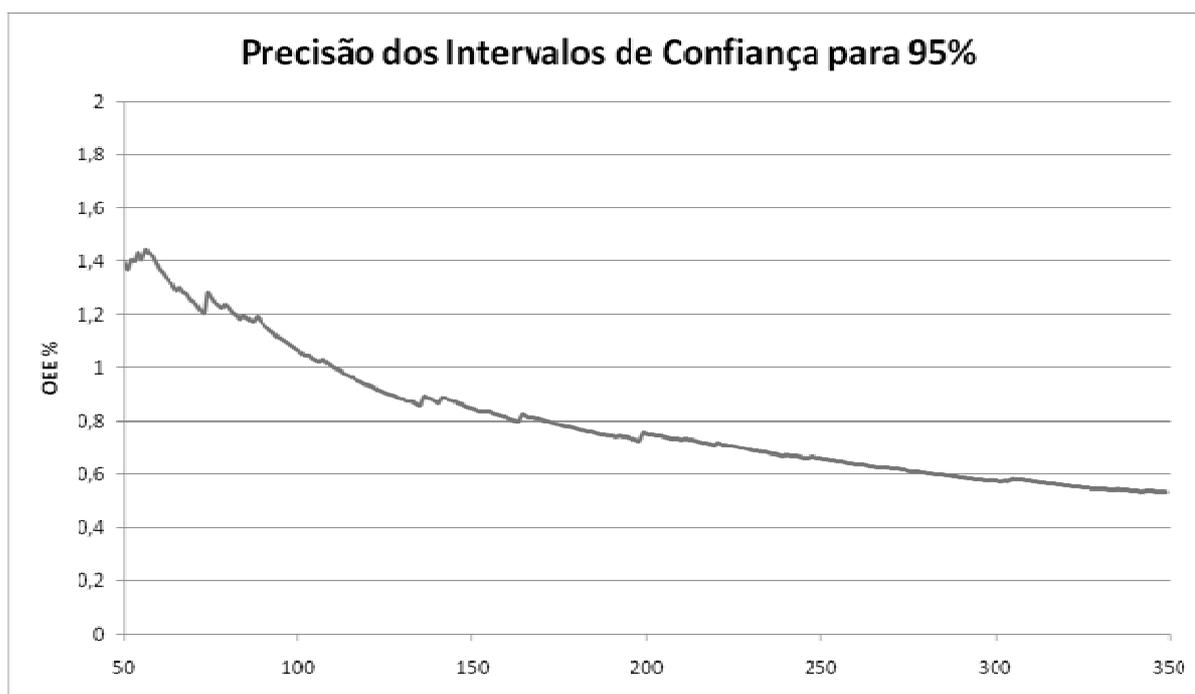
A média calculada para o OEE neste caso foi 56,46%, Figura 48, com intervalo de confiança [55,91;57,02], a um grau de significância de 95% e precisão de 0,56, Figura 49. A melhoria seria de 3,79% de OEE a mais em relação ao valor atual do OEE para o Produto 2, que estava com 52,67% de OEE. Comparando a melhoria com o valor obtido no caso 3, houve uma diferença de apenas 0,3% de OEE a mais de melhoria para o Produto 1. Na sequência será estudada uma melhoria no valor do tempo de *setup*.

Figura 48 - Valores do OEE para as replicações do Caso 4



Fonte: o autor, 2011

Figura 49 - Evolução da precisão dos intervalos de confiança para o Caso 4



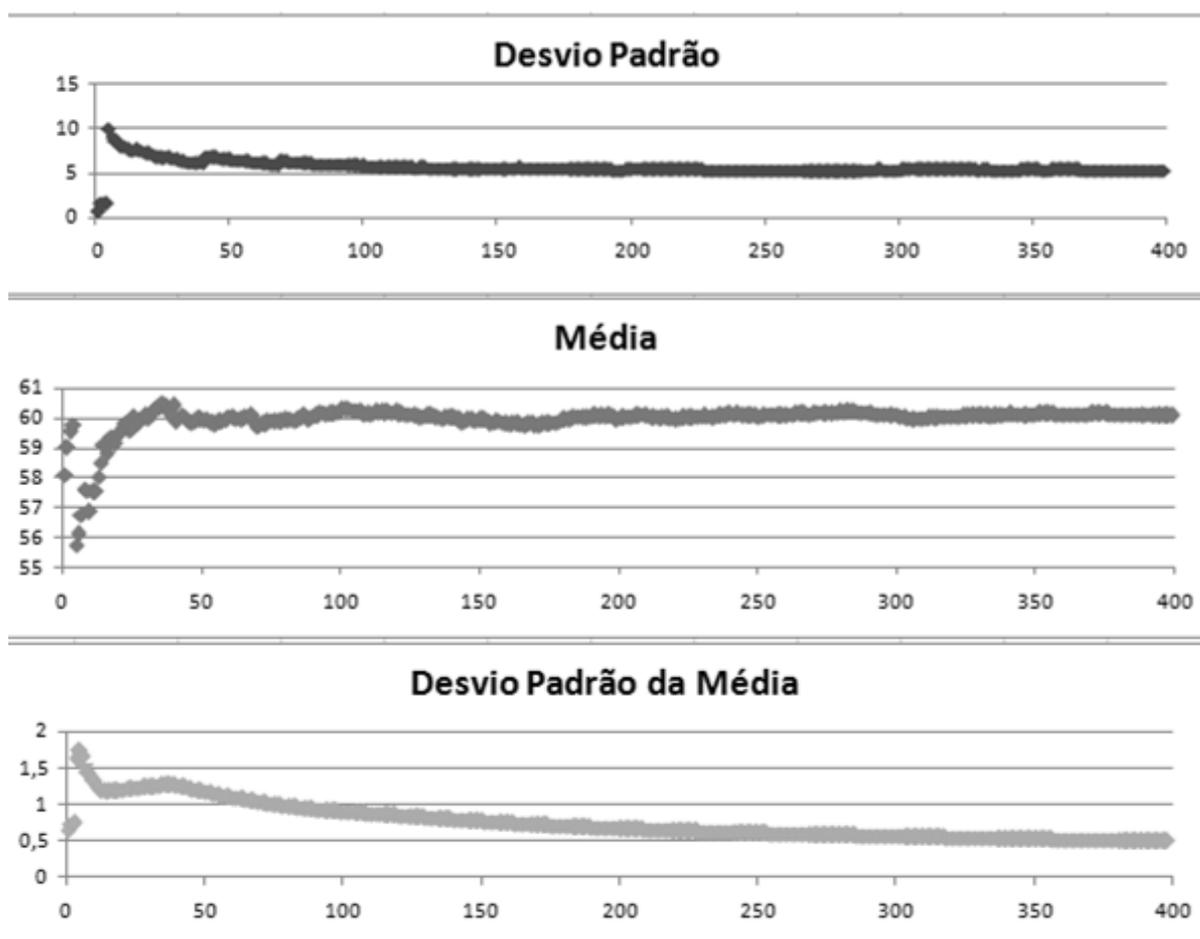
Fonte: o autor, 2011

#### 4.6 CASO 5 - SIMULAÇÃO DE UMA REDUÇÃO DO TEMPO SETUP PARA O PRODUTO 1

As simulações realizadas neste caso visaram avaliar uma redução de 10% no valor do setup de máquina, o tempo de ciclo médio do Produto 1 foi mantido no seu valor original. A quantidade de peças programadas na ordem de produção permaneceu em 240 assim como a probabilidade inicial de ocorrência de falha operacional de 64%.

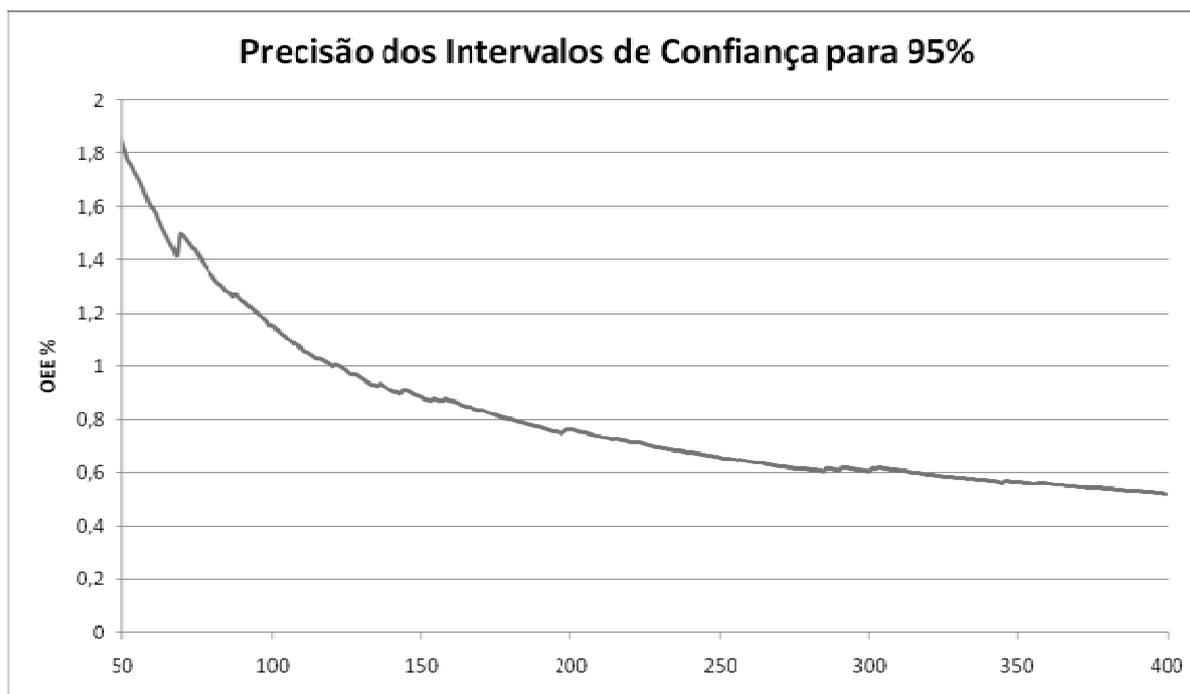
A média calculada para o OEE neste caso foi 60,16% (Figura 50) com intervalo de confiança [59,60;60,72], a um grau de significância de 95% e precisão de 0,56 (Figura 51). A melhoria seria de 0,78% de OEE a mais em relação ao valor anterior do OEE para o Produto 1, que estava em 59,38%. O próximo caso apresenta esta mesma melhoria para uma ordem contendo o Produto 2.

Figura 50 - Valores do OEE para as replicações do Caso 5



Fonte: o autor, 2011

Figura 51 - Evolução da precisão dos intervalos de confiança para o Caso 5



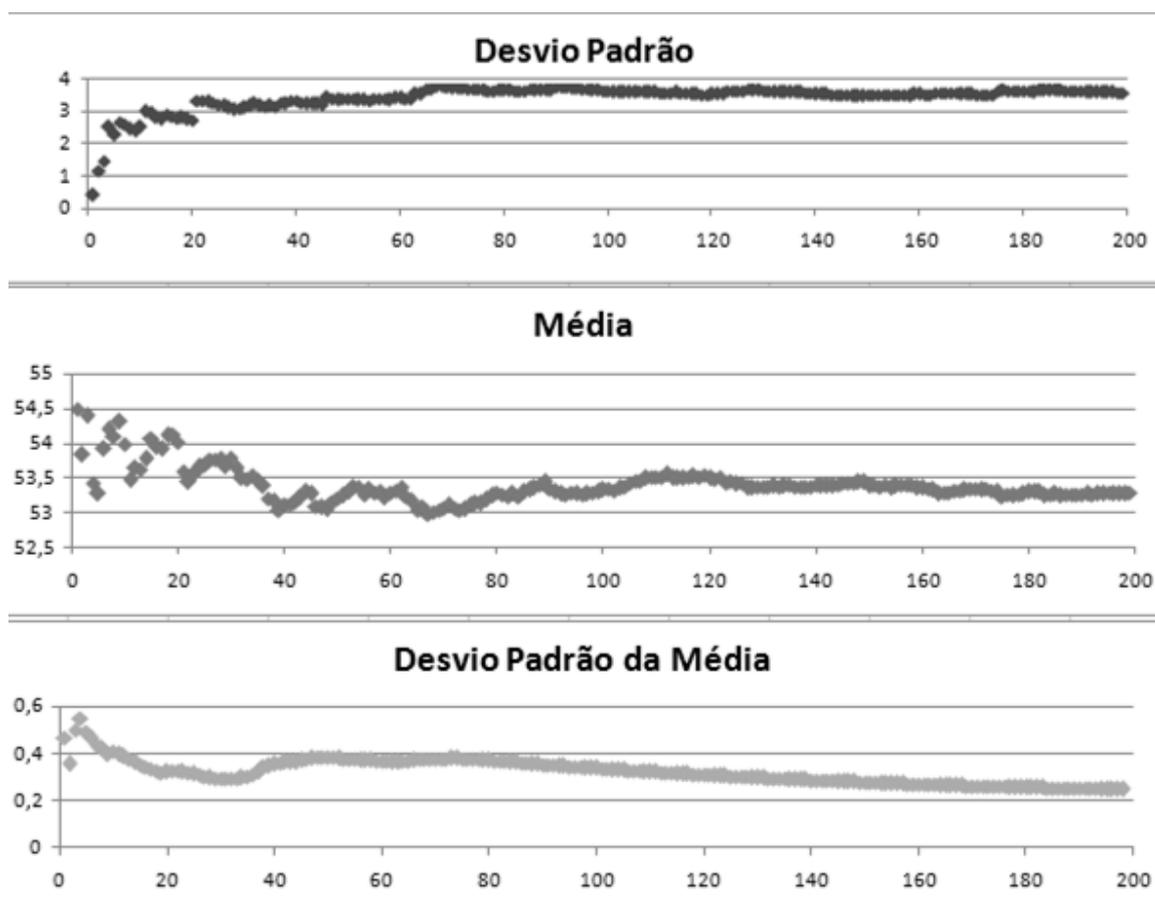
Fonte: o autor, 2011

#### 4.7 CASO 6 - SIMULAÇÃO DE UMA REDUÇÃO DO TEMPO SETUP PARA O PRODUTO 2

Assim como no caso anterior, o experimento realizado neste caso visou avaliar uma redução de 10% no valor do setup de máquina, o tempo de ciclo médio do Produto 2 foi mantido no seu valor original. A quantidade de peças programadas na ordem de produção foi 240, e a probabilidade inicial de ocorrência de falha operacional de 64%.

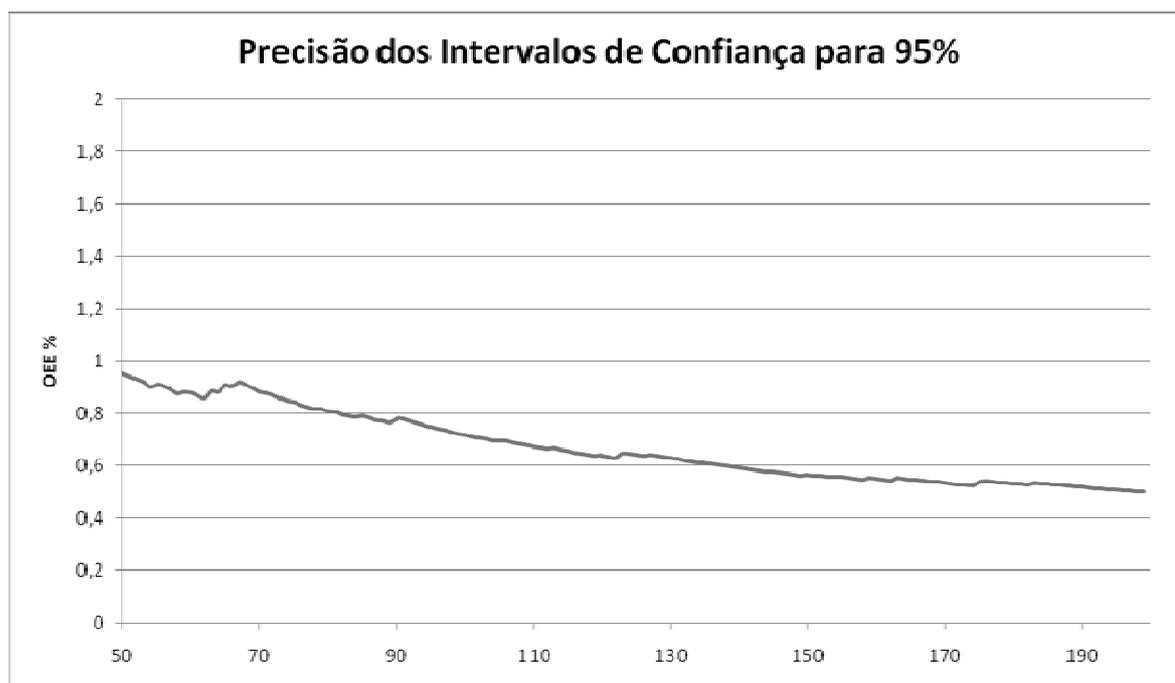
A média calculada para o OEE neste caso foi 53,37% (Figura 52) com intervalo de confiança [52,81;53,93], a um grau de significância de 95% e precisão de 0,56 (Figura 53). A melhoria seria de 0,70% de OEE a mais em relação ao valor atual do OEE para o Produto 2, que está em 52,67%. A diferença entre as melhorias que seriam obtidas para cada um dos produtos é de 0,14% de OEE.

Figura 52 - Valores do OEE para as replicações do Caso 6



Fonte: o autor, 2011

Figura 53 - Evolução da precisão dos intervalos de confiança para o Caso 6



Fonte: o autor, 2011

#### 4.8 CASO 7 - LUCROS ESTIMADOS PARA AS MELHORIAS SIMULADAS

Neste caso será mostrada uma avaliação envolvendo indicadores financeiros. Como não foi possível ter acesso aos dados reais dos custos de máquina e do lucro da empresa neste item será analisado o modelo teórico utilizado por Pierezan et al (2010). Este modelo une uma estrutura de custos, baseada no custeio direto, aos valores de OEE das máquinas envolvidas no processo dos produtos “P” e “Q”. A planilha de custos original é apresentada na Figura 9.

Para esta análise será calculado o mix ótimo de produtos, visando maximizar o lucro da empresa ao longo de um determinado período. Esta abordagem tem por objetivo demonstrar o quanto valeria, financeiramente, uma melhoria específica realizada em uma máquina do sistema produtivo. Assim, a planilha de cálculo do mix ótimo de produtos foi adaptada para simular a máquina da qual foram coletados os dados anteriores e simuladas as melhorias.

Figura 54 - Planilha de cálculo do mix ótimo com OEE adaptada para o caso 7

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Tempo Teórico (min)				Restrição da Produção	2400		minutos/semana	
2		Produto 1	Produto 2						
3	Recurso A	1,57	1,73			Produto 1	Produto 2		
4	Recurso B	0	0		Demanda Máxima	800	500	un./semana	
5	Recurso C	0	0		Tempo em processo Recurso A	2,6	3,3	min	
6	Recurso D	0	0		Tempo em processo Recurso B	0,0	0,0	min	
7					Tempo em processo Recurso C	0,0	0,0	min	
8					Tempo em processo Recurso D	0,0	0,0	min	
9	Desempenho - OEE (%)				Preço	\$ 90	\$ 100		
10		Produto 1	Produto 2		Custo var Unitário	\$ 50	\$ 50		
11	Recurso A	59,38%	52,67%		Margem de Contribuição Unitária	\$ 40	\$ 50		
12	Recurso B								
13	Recurso C				<b>Solução (Produção)</b>	285,98	500,00	unidades	
14	Recurso D				Participação no mix	36,4%	63,6%		
15					Tempo em processo Recurso A	754,5	1645,5	2400,0 min	
16					Tempo em processo Recurso B	0,0	0,0	0,0 min	
17	Tempo Médio Estimado (min)				Tempo em processo Recurso C	0,0	0,0	0,0 min	
18		Produto 1	Produto 2		Tempo em processo Recurso D	0,0	0,0	0,0 min	
19	Recurso A	2,6	3,3		Receita	25738,62	50000,00	75738,62	
20	Recurso B	0,0	0,0		-Custo Totalmente Variável	14299,23	25000,00	39299,23	
21	Recurso C	0,0	0,0		=Margem de Contribuição Líquida	11439,39	25000,00	36439,39	
22	Recurso D	0,0	0,0		-Despesas fixas			6000,00	
23					=Lucro Total			30439,39	

Fonte: o autor, 2011

Como os dados eram referentes a apenas uma máquina, somente o “Recurso A” da planilha foi utilizado. Os produtos “P” e “Q” foram substituídos pelos produtos “Produto1” e “Produto2”. Os valores dos tempos de ciclo teórico para os dois produtos foram informados em minutos. As demandas semanais foram alteradas

para 800 unidades do “Produto1” e 500 do “Produto2”, no problema original estes valores eram apenas 100 e 50, respectivamente. Porém, os tempos de ciclo dos produtos atuais são inferiores aos anteriores, então a escala da demanda foi ajustada para corresponder a este caso. A Margem de Contribuição Unitária de cada produto foi alterada, o “Produto 1” está com \$40 e o “Produto 2” com \$50.

A Figura 54 apresenta o mix ótimo inicial obtido com os valores de OEE simulados sem as melhorias. O Lucro Total foi de \$30.439,39 e as quantidades a serem produzidas foram 285 do “Produto 1” e 500 para o “Produto 2”. Na Tabela 5 foram calculados os valores que seriam obtidos para cada um dos casos simulados nos itens anteriores.

Tabela 5 - Ganhos estimados para as melhorias realizadas

<i>Melhoria de 10%</i>	<i>OEE após a melhoria</i>	<i>OEE Adicionado pela melhoria</i>	<i>Lucro Calculado Após a melhoria</i>	<i>Ganho Semanal</i>
1 - Parada OP - P1	61,42	2,04	\$ 31460,54	\$ 1021,15
2 - Parada OP - P2	53,60	0,93	\$ 30872,23	\$ 432,84
3 - Ciclo - P1	63,41	4,03	\$ 32433,52	\$ 1994,13
4 - Ciclo - P2	56,46	3,79	\$ 32113,98	\$ 1674,60
5 - Setup - P1	60,16	0,78	\$ 30811,20	\$ 371,82
6 - Setup - P2	53,37	0,70	\$ 30766,59	\$ 327,20

Fonte: o autor, 2011

Com os valores apresentados nesta tabela seria possível estabelecer qual seria a viabilidade econômica de um investimento de melhoria específica realizado na máquina estudada. Neste caso, a melhoria que traria maior retorno seria a melhoria de 10% no ciclo do “Produto 1”, a qual poderia gerar uma receita extra de \$ 1994,13 por semana. Para ambos os casos a redução do tempo de *setup* teria a menor receita. É importante ressaltar que, apesar da melhoria do caso 3 apresentar a maior receita, ela não será, necessariamente a opção mais viável, seria necessário avaliar o custo de implementação desta melhoria.

#### 4.9 EXEMPLOS DE ANÁLISES COM O SOFTWARE PROM

Para demonstrar uma aplicação do *plugin* “Performance Sequence Diagram Analysis” na avaliação de diversas máquinas simuladas e diversas ordens simuladas simultaneamente no modelo em RdP Colorida, o modelo implementado

no CPN Tools foi simulado para 100 ordens de produção, cada uma com uma determinada quantidade de peças a serem produzidas, de acordo com a Tabela 6.

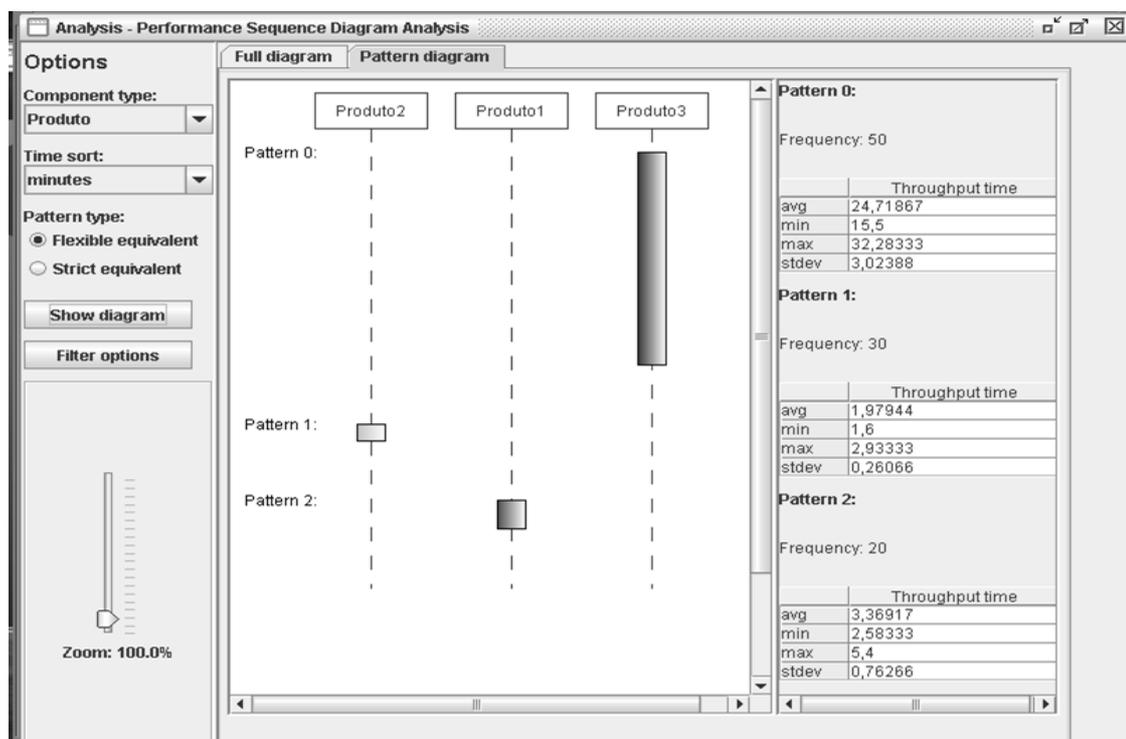
Tabela 6 - Parâmetros para a simulação inicial

<i>Quantidade de Ordens</i>	<i>Produto</i>	<i>Quantidade de Peças</i>	<i>Rota</i>
50	Produto 3	3	1,2,3,6
30	Produto 2	2	2,1
20	Produto 1	8	1,8

Fonte: o autor, 2011

A partir das simulações realizadas no CPN Tools, para cada uma das rodadas foram carregados os Logs no ProM e verificados os tempos médios de atravessamento de cada um dos produtos, no *plugin* “Performance Sequence Diagram Analysis”. A Figura 55 mostra a tela de resultados do software ProM, com a lista dos produtos simulados e dos tempos referentes a cada um deles.

Figura 55 - Tela de análise do software ProM com tempos de atravessamento

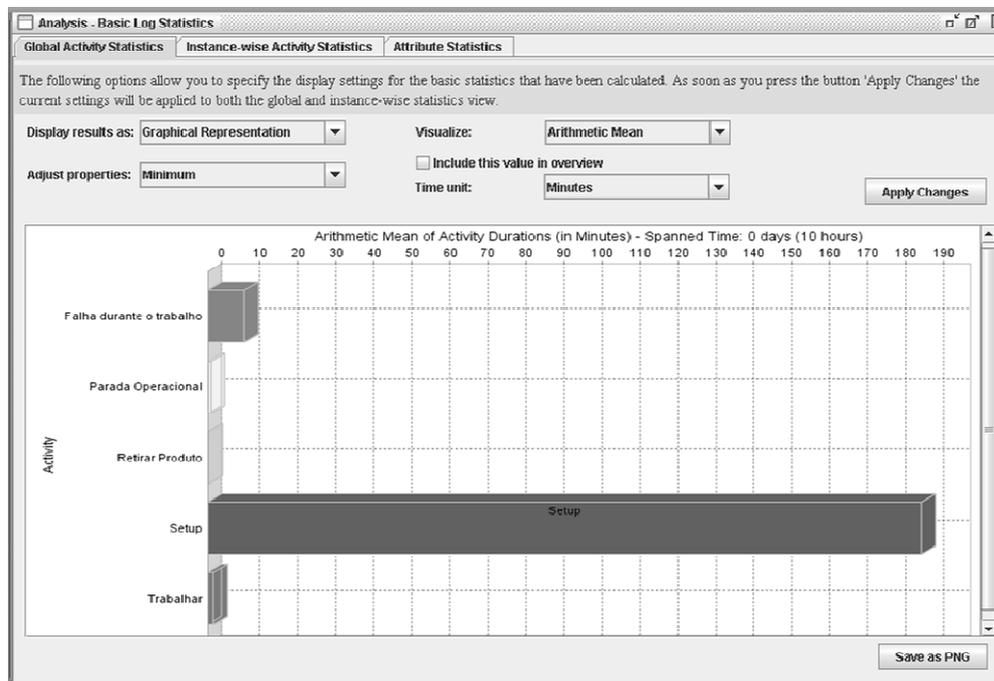


Fonte: o autor, 2011

Outra forma de se utilizar o software ProM para analisar os resultados do modelo simulado é através do *plugin* “Basic Log Statistics”. Esta ferramenta proporciona algumas análises estatísticas para os eventos gerados pelo modelo. Além disto, alguns gráficos podem ser acompanhados como o dos valores médios

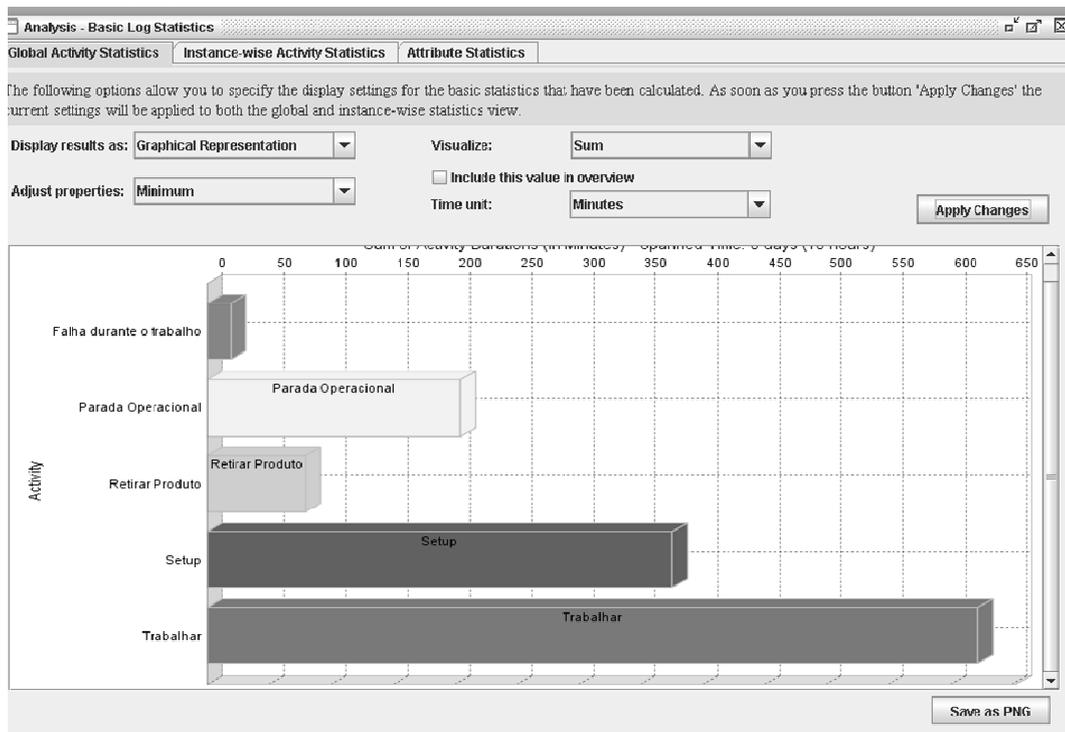
dos tempos dos eventos de um Log (Figura 56). Também é possível acompanhar os valores acumulados para os tempos destes eventos (Figura 57).

Figura 56 - Tela do *plugin* “Basic Log Statistics” com os tempos médios dos eventos



Fonte: o autor, 2011

Figura 57 - Tela do *plugin* “Basic Log Statistics” com os tempos acumulados por evento



Fonte: o autor, 2011

Este tipo de análise permite identificar os eventos que ocorrem com maior frequência e os eventos que possuem tempos de duração mais elevados. Por exemplo, se a média dos tempos de ciclo (em vermelho) for observada ao lado da média dos tempos de *setup* (em azul), ela parece ser desprezível. Porém, quando os tempos são acumulados é possível perceber que os tempos de ciclo superam o tempo total de *setup*.

O mesmo pode ser observado para os tempos de parada operacional (em amarelo), porém, neste caso, eles não superam o tempo de *setup*. Neste ponto são encerradas as análises dos resultados da pesquisa e no item a seguir serão apresentadas as conclusões gerais da pesquisa.

## 5 CONCLUSÕES

A partir do estudo das informações relativas ao cálculo dos indicadores de desempenho foi possível identificar alguns requisitos para a formação de uma estrutura básica para suportar o modelo proposto. O modelo de estados de máquina elaborado por Ron e Rooda (2005) serviu de base para a criação do modelo em RdP Colorida. O modelo em RdP Colorida foi desenvolvido, inicialmente, para simular uma máquina apenas, porém com as informações que foram encontradas durante o processo da revisão bibliográfica, ele evoluiu até suportar a simulação de várias máquinas.

Com a visão de várias máquinas interagindo no sistema, o nível de detalhamento do modelo aumentou, e isto possibilitou organizar a lógica do modelo de uma forma mais próxima à sequência dos eventos que ocorrem na prática. Porém, mesmo com o nível de detalhamento alcançado, alguns elementos que interagem com o processo produtivo acabaram não entrando no contexto desta pesquisa. De qualquer forma, com a possibilidade de se trabalhar com uma estrutura de modelo hierárquica, futuramente estes elementos poderão ser detalhados dentro de algumas das sub-redes.

Um destes elementos é a manutenção. A lógica de execução dos procedimentos preventivos e corretivos, relacionada à um determinado conjunto de ocorrência de falhas, por exemplo, poderia gerar alguns casos de melhoria da confiabilidade de máquina. Assim como a possibilidade de modelar um conjunto de operadores capaz de atender uma determinada quantidade de máquinas.

Com o modelo criado, além da possibilidade de simulação de eventos e melhorias de processos de manufatura é possível especificar um padrão de operação genérico para os processos deste ambiente. Isto pode ser utilizado para auxiliar no desenvolvimento de sistemas de informação de chão de fábrica, pois são eles os responsáveis pelo armazenamento das informações relativas às operações de um sistema de manufatura.

O sistema de 'logging' criado permitiu a conversão de informações simuladas em eventos de máquinas relativos aos cálculos de índices de desempenho de processos de manufatura. Com isto, algumas funcionalidades dos sistemas de informação de chão de fábrica, como o cálculo de índices de desempenho e o

tratamento dos eventos ocorridos no chão de fábrica, já podem ser testadas através dos Logs gerados e dados enviados pelo modelo.

O modelo passou por um processo de validação onde foi possível verificar que a metodologia proposta é capaz de simular e avaliar melhorias específicas realizadas em máquinas e equipamentos deste ambiente. A comparação dos resultados simulados com o valor real do OEE indicou uma aproximação do modelo em relação ao que ocorre com o processo físico. Entretanto, futuramente, seriam necessárias mais algumas replicações análises realizadas, envolvendo outros processos, para comprovar, de maneira mais robusta, a validade do modelo. Porém, para que isto possa ser realizado, é necessário um determinado nível de acesso às informações registradas para as máquinas e processos fabris.

A partir das simulações geradas com os dados coletados foi possível gerar alguns cenários de melhoria para o equipamento, nos quais os valores do OEE se diferenciaram em função dos produtos que estavam sendo simulados para o processo. Isto também é percebido no OEE calculado com os valores reais do processo em análise.

Após a simulação de seis tipos de casos de melhoria, foi possível relacionar as melhorias de desempenho estimadas para as melhorias com o retorno financeiro que elas retornariam se os dados utilizados fossem os dados do processo real. Isto proporciona maior facilidade no processo de tomada de decisão para os investimentos que seriam destinados à realização destas ações. Desta forma, a metodologia proposta permite a simulação e avaliação de cenários para processos de manufatura, auxiliando o processo de tomada de decisão, no nível operacional, para os gestores destes processos.

Através dos resultados obtidos com esta pesquisa, percebe-se que devem ser realizados alguns estudos futuros para resolver alguns pontos pendentes no modelo. Por exemplo, ainda não é possível determinar a variação no número de falhas ocorridas em função da alteração da quantidade de paradas de manutenção planejadas. Ou ainda, a metodologia deve ser aplicada em outros processos de manufatura para verificar quais ajustes devem ser realizados no modelo de forma que um operador possa trabalhar em diversas máquinas, e quais seriam os outros processos nos quais a metodologia de simulação poderia ser aplicada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AALST, W.M.P.; WEIJTERS, A.J.M.M.; MARUSTER, L. **Workflow Mining: Discovering Process Models from Event Logs**. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 16(9):1128-1142, 2004.

AMIRAN, H.; RADFAR, I.; ZOLFANI, S.H. **A fuzzy MCDM approach for evaluating steel industry performance based on balanced scorecard: A case in Iran**. IEEE International Conference on Emergency Management and Management Sciences (ICEMMS), 2011 2nd. 8-10 Aug. 2011. p. 574 - 577.

BAMBER, C.J. et al. **Cross-functional team working for overall equipment effectiveness (OEE)**. Journal of Quality in Maintenance Engineering. 2003. Vol. 9 Iss: 3, pp.223 - 238

BONAL, J et al. **Overall fab efficiency**. Proceedings of Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop, IEEE/SEMI. 1996. p. 49-52.

BRAGLIA, Marcello; FROSOLINI, Marco; ZAMMORI, Francesco. **Overall equipment effectiveness of a manufacturing line (OEEML): An integrated approach to assess systems performance**. Journal of Manufacturing Technology Management. Vol. 20 No. 1. p. 8-29. 2009.

Chan, Y.E., Sabherwal, R. and Thatcher, J.B. **Antecedents and outcomes of strategic is alignment: an empirical investigation**. IEEE Transactions on Engineering Management, Vol. 53 No. 1. 2006. pp. 27-47.

CHWIF, Leonardo; MEDINA, Afonso C. **Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria & aplicações**. 2. ed. São Paulo: Ed. do Autor, 2006. 254 p. ISBN 85-905978-1-4

**CPN Tools**. Software. Disponível em: <http://cpntools.org/>. Acesso em: 27 de julho de 2011.

CPNETS. **Industrial Use**. <http://cs.au.dk/cpnets/industrial-use/> Acesso em: 27/10/2011.

DESROCHERS, Alan A.; ALL - JAAR, Robert Y. **Applications of petri nets in manufacturing systems: modeling, control, and performance analysis.** New York: IEEE, 1995. 348 p. ISBN 0-87942-295-5.

FAVARETTO, F. **Uma Contribuição ao Processo de Gestão da Produção Pelo Uso da Coleta Automática de Dados do Chão de Fabrica.** Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

FOLAN, P.; BROWNE, J. **A review of performance measurement: towards performance management.** Computers in Industry, Vol. 56 No. 7, pp. 663–680. 2005.

FROHLICH, Markham T.; DIXON, J. Robb. **A taxonomy of manufacturing strategies revisited.** Journal of Operations Management. 2001. Vol 19. p.541–558.

GAYLORD, John. **Factory Information Systems.** 1st ed. Taylor Print On Dema, 1987. ISBN: 0824773896.

HANSEN, Robert C. **Eficiência global dos equipamentos: uma poderosa ferramenta de produção/manutenção para o aumento dos lucros.** Porto Alegre: Bookman, 2006. 264 p. ISBN 85-60031-02-2.

JENSEN, Kurt. **Coloured Petri Nets.** Basic concepts, analysis methods and practical use. Basic Concepts, vol. 1. Springer, Berlin, 1992.

JENSEN, Kurt. **Coloured Petri Nets.** Basic concepts, analysis methods and practical use. Analysis Methods, vol. 2. Springer, Berlin, 1994.

JURIC, Zoran; SÁNCHEZ, Ana I.; GOTI, Aitor. **Money-based overall equipment effectiveness.** Hydrocarbon Processing, Maio de 2006, Vol. 85 Issue 5, p43-45, 3p; (AN 20837337).

KAPLAN, R; Norton D. **Translating Strategy into Action: The Balanced Scorecard,** Harvard Business School Press, Boston, 1996.

KATHURIA, R.; JOSHI, M.P.; PORTH, S.J. **Organizational alignment and performance: past, present and future.** Management Decision. Vol. 45 No. 3. 2007. p. 503-517.

KEEGAN, D.; EILER, R.; JONES, C. **Are your performance measures obsolete?** Management Accounting. Jun, 1989.

KRISTENSEN, L.M., CHRISTENSEN, S., JENSEN, K. **The Practitioner's Guide to Coloured Petri Nets**. Int. J. Softw. Tools Technol. Transf. 2(2), 98–132, 1998.

LEAL, Hélder M. M. **Optimização do Processo de Fabrico em Linha de Produção Flexível**. Relatório de Projecto. Universidade do Porto, 2007. Disponível em: <http://paginas.fe.up.pt/~ee01099/files/RelatorioAP14.pdf>. Acesso em: 27 de julho de 2011.

Likert, R. **New Patterns of Management**. McGraw-Hill, New York, NY. 1961.

LJUNGBERG, O. **Measurement of overall equipment effectiveness as a basis for TPM activities**. International Journal of Operations and Production Management, vol. 18, n.5, p. 495-507, 1998.

MALINA, M.A.; SELTO, F.H. **Choice and change of measures in performance measurement models**. Management Accounting Research, Vol. 15 No. 4. 2004. p. 441-469.

MANS R.S. et al. **From Requirements via Colored Workflow Nets to an Implementation in Several Workflow Systems**. In K. Jensen (ed.): Proceedings of the Eighth Workshop and Tutorial on Practical Use of Coloured Petri Nets and the CPN Tools, October 2007, Department of Computer Science, University of Aarhus, PB-584, 187-206.

MEDEIROS, A. K. Alves de, GÜNTHER, C. W.. **Process Mining: Using CPN Tools to Create Test Logs for Mining Algorithms**. Proceedings of the Sixth Workshop and Tutorial on Practical Use of Coloured Petri Nets and the CPN Tools. 2005, p.177-190.

MEDORI, D; STEEPLE, D. **A framework for auditing and enhancing performance measurement systems**. International Journal of Operations and Production Management. Vol. 20. 2000. p.520–533.

MELNYK, Steven A.; STEWART, D.M; SWINK, M. **Metrics and performance measurement in operations management: dealing with the metrics maze.** Journal of Operations Management, Vol. 22 No. 3. 2004. p. 209-217.

MILLER, D. **Configurations of strategy and structure: towards a synthesis.** Strategic Management Journal, Vol. 7. No. 3. 1986. pp. 233-49.

MILLER, D. **Configurations revisited.** Strategic Management Journal. Vol, 17 No. 7. 1996. pp. 505-12.

MILLER, J.G.; ROTH, A. **A taxonomy of manufacturing strategies.** Management Science Vol. 40. 1994. p. 285–304”.

MUTHIAH, K. M. N.; HUANG, S. H. **Overall throughput effectiveness (OTE) metric for factory-level performance monitoring and bottleneck detection.** International Journal of Production Research, Vol. 45, No. 20. Out. 2007.

NACHIAPPAN, R.M.; ANANTHARAMAN, N. **Evaluation of overall line effectiveness (OLE) in a continuous product line manufacturing system.** Journal of Manufacturing Technology Management, 2006. Vol. 17. N 7. p. 987-1008.

NAKAJIMA, S. **Introduction to Total Productive Maintenance (TPM).** Cambridge, MA:Productivity Press, 1988.

NATH, D.; SUDHARSHAN, D. **Measuring strategy coherence through patterns of strategic choices,** Strategic Management Journal, Vol. 15 No. 1. 1994. pp. 43-61.

NEELY, Andy. **The evolution of performance measurement research: developments in the last decade and a research agenda for the next.** International Journal of Operations and Production Management, Vol. 25 No. 12. 2005. p. 1264-1277.

NEELY, Andy. **The performance measurement revolution: why now and what next?** International Journal of Operations and Production Management 19. 1999. p. 205–228.

OECHSNER, Richard et al. **From overall equipment efficiency(OEE) to overall Fab effectiveness (OFE)**. Materials Science in Semiconductor Processing. 2003. p.333-339.

PETERS, Thomas J.; WATERMAN, Robert H. **In Search of Excellence: Lessons from Americas Best Run Companies**. 1988.

PIEREZAN, Rodrigo et al. **Estudo do impacto do OEE de processos produtivos no mix ótimo de produção**. Em: XVII SIMPEP, 2010, Bauru. Anais do XVII Simposio de Engenharia de Produção - XVII SIMPEP, 2010.

**ProM**. Software. Disponível em: <http://www.processmining.org/prom/start>. Acesso em 27/07/2011.

**ProMimport**. Software. Disponível em: <http://www.processmining.org/promimport/start> Acesso em: 30 jul. 2011.

REIJERS, H.A.; AALST, W.M.P. van der. **Short-Term Simulation: Bridging the Gap between Operational Control and Strategic Decision Making**. In IASTED International Conference on Modelling and Simulation, pages 417-421,1999.

REISIG, W. **Petri Nets**. EATCS Monographs on Theoretical Computer Science, vol. 4 Springer, Berlin. 1985.

RON, A.J. de; ROODA, J.E. **Equipment effectiveness: OEE revisited**. IEEE Transaction on Semiconductor Manufacturing. 2005. Vol. 18 No. 1, p. 190-6.

SANTOS, Eduardo Alves Portela et al. **Proposal of an industrial information system model for automatic performance evaluation**. IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2008. ETFA 2008. p. 436-439.

SEMI E10-0701. **Specification for Definition and Measurement of Equipment Reliability, Availability, and Maintainability (RAM)**, 2001.

SHEU, D. Daniel. **Overall Input Efficiency and Total Equipment Efficiency**. IEEE TRANSACTIONS ON SEMICONDUCTOR MANUFACTURING. Nov 2006. Vol. 19. N. 4.

SLACK, Nigel. **Vantagem competitiva em manufatura**: atingindo competitividade nas operações industriais. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 218 p. ISBN 85-224-3260-0

SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Robert. **Administração da produção**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

**Standard ML of New Jersey**. Disponível em: <http://www.smlnj.org>. Acesso em 27 de julho de 2011.

TANGEN, S. **Performance measurement**: from philosophy to practice. International Journal of Productivity and Performance Management, Vol. 53 No. 8. 2004. p. 726-737.

ULLMAN, J.D. **Elements of ML Programming**. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1998.

VELDHOEN, Jeroen. **The applicability of short-term simulation of business processes for the support of operational decisions**. Eindhoven University of Technology. Eindhoven, Mar 2011.

**XES 1.0 Standard Definition**. 2010. Disponível em: <[http://www.xes-standard.org/\\_media/xes/xes\\_standard\\_proposal.pdf](http://www.xes-standard.org/_media/xes/xes_standard_proposal.pdf)> Acesso em: 28 jul. 2011.

## APENDICE A – LISTA DE DECLARAÇÕES DO MODELO

```

(* COM TCP *)
colset POOLING=unit;
fun send_to_applet(n, Evento,TipoEvento,Tempo,Maquina,Operador,Produto) =
  ConnManagementLayer.send("Conn 1",";";"^\n
  Int.toString(n)^\n",
  ^Evento^\n",
  ^TipoEvento^\n",
  ^Tempo^\n",
  ^Maquina^\n",
  ^Operador^\n",
  ^Produto^\n"r"
  ,stringEncode);
fun receive_from_applet() =
  ConnManagementLayer.receive("Conn 1",stringDecode);
(* Gerar Logs *)
val FILE="./output/output";
val FILE_EXTENSION=".cpnxml";
use "loggingFunctionsMultipleFiles2.sml";
(* Model ColSets *)
colset UNIT = unit;
colset INT = int;
colset BOOL = bool;
colset STRING = string;
colset TIMEDINT= int timed;
colset ListaINT= list INT;
colset ListaBOOL= list BOOL;
colset ListaSTRING = list STRING;
colset PRO = product STRING*ListaINT*ListaINT*ListaINT
*ListaINT*ListaINT*ListaINT*INT*INT timed;
(*Produto:CodProdxMaquinasxCicloTeoricoxSetupTeorico
xTempodeRetiradaProgramado
xTempodeTransporteProgramado
xTempoProgramadoInspecao
xQuantidadeDePecasXAuxQtde*)
colset LT = product INT*PRO timed;
(*Lote de Trabalho: nserieXproduto*)
colset UP = product INT*STRING;
(*ultimo produto processado em cada maquina*)
colset STATUS = product LT*STRING timed;
colset FALHA = product STATUS*STRING timed;
colset PARADAProg =product INT*INT*STRING timed;
colset ListaMAQ= list INT;
(* Model Vars *)
var n:INT;
var Rec:STRING;
var Maq:STRING;
var Produto: PRO;
var Retirada:STRING;
var Falha:STRING;
var Qualidade:STRING;
var SetupT:INT;
var Tipo: STRING;
var CicloT:INT;
var Processamento:INT;
var UltimoProduto: UP;
var MaqOcupadas: ListaMAQ;
var Operador: STRING;
var TempoParProg: PARADAProg;

```

```

var MaqInicializadas: ListaMAQ;
var FalhaOculta:STRING;
(* Model Priorities *)
val P_HIGH = 10;
val P_NORMAL = 1000;
val P_LOW = 10000;
val P_LAST =100000;
(* Funcoes Estatisticas *)
colset BOOLT =bool timed;
val i=["OK","NOK"];
val j=["MP","MDO"];
(*Sem materia prima, Sem Operador*)
val q=["Peca Boa","Refugo","Retrabalho"];
fun rand(i)=List.nth(i, discrete(0, size(i)-1))
fun decideOK(pok)=
let
val randomico = discrete(0,100)
in
if randomico<=pok
then "OK"
else "NOK"
end;
fun qualidade(pBoa,pRefugo) =
let
val randomico = discrete(0,100)
in
if randomico<=pBoa
then "Peca Boa"
else if randomico>=pBoa andalso randomico<pBoa+pRefugo
then "Refugo"
else "Retrabalho"
end;
fun decide() = discrete(0,100);
fun expTime (mean: int) =
let
val realMean = Real.fromInt mean
val rv = exponential((1.0/realMean))
in
floor (rv+0.5)
end;

```