

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

REGINALDO BORGES

**SUPORTE A DECISÃO NA GESTÃO DA MANUTENÇÃO INDUSTRIAL:
ABORDAGEM BASEADA EM MINERAÇÃO DE PROCESSOS, SIMULAÇÃO E
MÉTODOS MULTI-CRITÉRIO**

CURITIBA

2020

REGINALDO BORGES

**SUPORTE A DECISÃO NA GESTÃO DA MANUTENÇÃO INDUSTRIAL:
ABORDAGEM BASEADA EM MINERAÇÃO DE PROCESSOS, SIMULAÇÃO E
MÉTODOS MULTI-CRITÉRIO**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Área de concentração: Modelagem, Controle e Automação de Sistemas, da Escola Politécnica, da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de doutor em Engenharia de Produção e Sistemas.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Alves Portela Santos

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo de Freitas Rocha Loures

CURITIBA

2020

Dados da Catalogação na Publicação
Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/PUCPR
Biblioteca Central
Sônia Maria Magalhães da Silva - CRB-9/1191

B732s
2020

Borges, Reginaldo
Suporte a decisão na gestão da manutenção industrial: abordagem baseada em mineração de processos, simulação e métodos multi-critério / Reginaldo Borges; orientador, Eduardo Alves Portela Santos; coorientador, Eduardo de Freitas Rocha Loures. – 2020.
[187] f. ; 30 cm

Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2020.
Bibliografia: f. 149-163

1. Fábricas - Manutenção. 2. Mineração de processo. 3. Métodos de simulação. 4. Engenharia de produção. I. Santos, Eduardo Alves Portela. II. Loures, Eduardo de. Freitas Rocha. III. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas. IV. Título.

CDD. 20. ed. - 670



Pontifícia Universidade Católica do Paraná
Escola Politécnica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas

TERMO DE APROVAÇÃO

Reginaldo Borges

SUPORTE A DECISÃO NA GESTÃO DA MANUTENÇÃO INDUSTRIAL: ABORDAGEM BASEADA EM MINERAÇÃO DE PROCESSOS, SIMULAÇÃO E MÉTODOS MULTI-CRITÉRIO

Tese aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor no Curso de Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Alves Portela Santos
(Orientador)

Prof. Dr. Eduardo de Freitas Rocha Loures
(Coorientador)

Prof. Dr. Edson Emílio Scalabrin
Membro Externo – PPGIA / PUCPR

Prof. Dr. César Augusto Romano
Membro Externo – PPGE / UTFPR

Prof. Dr. Cláudio Leones Bazzi
Membro Externo – PPGTCA / UTFPR

Curitiba, 01 de julho de 2020.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais
Valternei e Irma, minha esposa Luana e
meus dois filhos, Vinícius e Júlia

AGRADECIMENTOS

Expresso aqui meus sinceros agradecimentos:

A minha esposa Luana e meus dois filhos Vinícius e Júlia, pela constante fonte de motivação;

Aos meus pais Valternei e Irma, pela confiança incondicional;

Ao professor Dr. Eduardo Alves Portela Santos, pela orientação e confiança depositada neste projeto;

Ao professor Dr. Eduardo de Freitas Rocha Loures, coorientador, pelas contribuições fundamentais para a construção deste trabalho;

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Câmpus Medianeira), por conceder afastamento para que esta capacitação fosse possível;

Ao professor Dr. César Augusto Romano pela contribuição em momentos importantes na minha vida profissional;

Ao empresário Tiago Braghirolli, por viabilizar projeto de pesquisa vinculado a esta tese e realizado em parceria com a Agência PUC de Inovação;

De maneira geral a Pontifícia Universidade Católica do Paraná, pela estrutura, infraestrutura e profissionais disponíveis para dar suporte a elaboração desta tese.

RESUMO

Os processos de manutenção industrial (MI) no contexto da indústria 4.0 têm evoluído significativamente nos últimos anos, estando cada vez mais condicionada ao uso de tecnologias, o que facilita a visão e execução das fábricas inteligentes, que não dependem apenas das pessoas para a tomada de decisões. Neste sentido a presente pesquisa contribui para a tomada de decisão na MI, o objetivo é propor um framework para a simulação de eventos discretos que permita gerar informações para o cálculo de indicadores de desempenho com o auxílio da mineração de processos. O modelo de simulação foi elaborado em CPN (Colored Petri Nets) com base nos indicadores a serem selecionados por uma equipe de manutenção de um local pré-definido. A mineração de processos foi responsável por extrair as informações necessárias para a modelagem e também por extrair as informações originadas das simulações realizadas. Para a tomada de decisão além dos valores de cada indicador também foram consideradas a opinião da mesma equipe de manutenção que definiu os pesos de cada indicador por meio do método AHP (Analytic Hierarchy Process). A combinação dos dados quantitativos e qualitativos foi realizada por meio do método Promethee (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation), o qual ordenou os cenários simulados conforme seus desempenhos. Os resultados deste estudo mostraram que é possível chegar a uma decisão confiável, e permite aos seus executores a melhoria contínua por meio da criação e simulação de novos cenários para um determinado ambiente.

Palavras-chave: Manutenção industrial. Simulação. Mineração de processos.

ABSTRACT

Industrial maintenance (IM) processes in the context of industry 4.0 have evolved significantly in recent years, being increasingly conditioned to the use of technologies, which facilitates the vision and execution of intelligent factories, which do not depend only on people for decision-making decisions. In this sense, this research contributes to decision making in industrial maintenance, the objective is to propose a framework for the simulation of discrete events that allows generating information for the calculation of performance indicators with the aid of process mining. The simulation model was developed in CPN (Colored Petri Nets) based on the indicators to be selected by a maintenance team from a predefined location. Process mining will be responsible for extracting the information needed for modeling and also extracting information from the simulations to be performed. For decision making in addition to the values of each indicator, the opinion of the same maintenance team that defined the weights of each indicator through the AHP method (Analytic Hierarchy Process) will also be considered. The combination of the quantitative and qualitative data was made using the Promethee method (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation), which ordered the simulated scenarios according to their performance. The results of this study showed that it is possible to reach a reliable decision, and it allows its executors to continuously improve, by creating and simulating new scenarios for a given environment.

Keywords: Industrial maintenance. Simulation. Process mining.

LISTA DE SIGUAS E ACRÔNIMOS

MI	Manutenção Industrial
FBM	Fault Based Maintenance
UBM	Usage Based Maintenance
CBM	Condition Based Maintenance
ERP	Enterprise Resource Planning
CRM	Customer Relationship Management
CMMS	Computerized Maintenance Management System
BAM	Business Activity Monitoring
BOM	Business Operations Management
BPI	Business Process Intelligence
MPI	Maintenance Performance Indicator
MCDM	Multicriteria Decision Making
CPN	Colored Petri net
CM	Corrective Maintenance
PM	Preventive Maintenance
DES	Discrete Event Simulation
IOS	Iterative Optimization-based Simulation
SBO	Simulation-based Optimization
TBS	Trace-Based System
PETRA	Process Evolution using a TRAcE-based
IMAMO	Industrial MAIntenance Management Ontology
RCM	Reliability Centered Maintenance
MCDA	Multicriteria Decision Analysis
DCBD	Descoberta de Conhecimento em Banco de Dados
KPI	Key Performance Indicator
BPS	Business Process Solutions
D2FD	Data to Fuzzy-DEVS model
Fuzzy-DEVS	Fuzzy-Discrete Event System Specification
YAWL	Yet Another Workflow Language
ProM	Process Mining
MXML	Mining eXtensible Markup Language
MPM	Maintenance Performance Measurement
PRM	Probabilistic Relational Model

PMS	Performance Measurement System
OEE	Overall Equipment Effectiveness
MTBF	Mean Time Between Failures
MTTR	Mean Time To Repair
AHP	Analytic Hierarchy Process
ANP	Analytic Network Process
ELECTRE	Elimination and Choice Expressing Reality
PROMETHEE	Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
NIS	Negative Ideal Solution
PIS	Positive Ideal Solution
SPN	Stochastic Petri Net
RdP	Redes de Petri
IHM	interface homem-máquina
IDEF0	Integration Definition for Function Modeling
XES	eXtensible Event Stream

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas da pesquisa	23
Figura 2 - Fases da revisão da literatura	25
Figura 3 - Verificação de trabalhos com os elementos em conjunto.....	28
Figura 4 - Escopo da pesquisa	29
Figura 5 - Palavras-chave da pesquisa.....	30
Figura 6 - Processo de filtragem dos artigos para base teórica.....	31
Figura 7 - Framework for APMDSS	37
Figura 8 - Uma abordagem genérica para modelar estratégias de manutenção	38
Figura 9 - Estrutura detalhada da estrutura proposta do IOS para um sistema de manufatura	39
Figura 10 - abordagem processual para planejamento de manutenção prescritivo.	40
Figura 11 - Estrutura de otimização baseada em simulação para sistemas de manutenção.....	41
Figura 12 - Arquitetura PETRA.....	44
Figura 13 - Implantação conceitual RCM proposto.....	46
Figura 14 - Abordagem para analisar o processo de manutenção de software	47
Figura 15 - Metodologia proposta	48
Figura 16 - Abordagem geral da proposta.....	53
Figura 17 - Visão geral do sistema integrado de fluxo de trabalho e simulação	54
Figura 18 - Descoberta de modelos de simulação usando técnicas de mineração de processo	55
Figura 19 - A abordagem de simulação de fluxo de trabalho baseada em gráficos de eventos	56
Figura 20 - Processo modelado em YAWL	57
Figura 21 - Metodologia proposta com fases, atividades e ferramentas.....	58
Figura 22 - Áreas de aplicação de decisões na manutenção com pouca ou nenhuma citação	69
Figura 23 - Ajuste do foco da pesquisa para a eficiência da manutenção	70
Figura 24 - Principais tipos de mineração de processos	76
Figura 25 - Modelo hierárquico e genérico do AHP	80
Figura 26 - Fluxo de ordenação: positivo (esquerda) e negativo (direita)	85

Figura 27 - Fatores que influenciam a manutenção e os principais indicadores de desempenho.....	91
Figura 28 - Visão simples para cálculo de indicadores.....	92
Figura 29 - Elementos para tomada de decisão.....	93
Figura 30 - Ambiente de simulação a ser integrado.....	94
Figura 31 - Framework proposto.....	95
Figura 32 - Fluxograma das atividades que compõem o framework.....	96
Figura 33 - Exemplo de um modelo de processo obtido por meio da mineração de processos.....	98
Figura 34 - Exemplo de mapa heurístico.....	99
Figura 35 - Exemplo de rede de Petri.....	100
Figura 36 - Informações do log carregados em ferramentas de mineração de processos.....	101
Figura 37 - Processo de manufatura modelado no CPN Tools.....	110
Figura 38 - Método de geração de data logs com o auxílio do CPN Tools.....	113
Figura 39 - Classificação de dos indicadores: método AHP (software Super Decisions).....	118
Figura 40 - Análise par a par “Goal” e “Criteria”.....	119
Figura 41 - Análise par a par dos indicadores do grupo “econômico”.....	119
Figura 42 - Esboço da estrutura de Pierezan 2011 e proposta deste trabalho.....	122
Figura 43 - Informações de cada máquina referente ao <i>plug-in Genetic Algorithm</i>	124
Figura 44 - Modelo <i>Fuzzy Miner</i> de cada máquina.....	125
Figura 45 - Aplicação do plugin <i>Basic Log Statistics</i>	126
Figura 46 - Minerador estatístico do Disco®.....	127
Figura 47 - Informações plugin <i>Fuzzy Miner</i>	127
Figura 48 - Utilização do <i>plugin Heuristics Miner</i>	128
Figura 49 - Modelo de simulação adaptado de Pierezan (2011).....	133
Figura 50 - Classificação de dos indicadores: método AHP (software Super Decisions).....	138
Figura 51 - Análise par a par “Goal” e “Criteria”.....	138
Figura 52 - Análise par a par dos indicadores do grupo “econômico”.....	139
Figura 53 - Análise de sensibilidade (AHP sensitivity).....	140
Figura 54 - Análise de sensibilidade (ANP sensitivity).....	141
Figura 55 - Classificação de indicadores (método AHP).....	142

Figura 56 - Matriz de avaliação com o método PROMETHEE.....	143
Figura 57 - Sensibilidade a alteração dos indicadores	144
Figura 58 - Rankings dos cenários (método PROMETHEE).....	145

LISTA DE QUADROS E GRÁFICOS

QUADROS

Quadro 1 - Alteração da <i>string</i> de busca nas bases de dados	27
Quadro 2 - Critérios para busca de artigos.....	27
Quadro 3 - Trabalhos que integram MI e simulação	36
Quadro 4 - Integração entre manutenção e process mining.....	42
Quadro 5 - Etapas para construção da estrutura PETRA.....	45
Quadro 6 - Integração entre process mining e simulação.....	52
Quadro 7 - Etapas da abordagem de previsão.....	59
Quadro 8 - Desafios da mineração de processos em uma perspectiva organizacional	61
Quadro 9 - Desafios da mineração de processos sob uma perspectiva metodológica.	61
Quadro 10 - Áreas de aplicação na MI.....	63
Quadro 11 - Artigos MI “AND” Simulação por área de aplicação	65
Quadro 12 - Artigos MI “AND” Mineração de Processos por área de aplicação	66
Quadro 13 - Indicadores chave de desempenho de confiabilidade.....	74
Quadro 14 - Exemplo de um registro de eventos	78
Quadro 15 - Extrato das Informações para cálculo de indicadores da manutenção.	107
Quadro 16 - Detalhamento das informações para cálculo dos indicadores de manutenção.....	108
Quadro 17 - Atividades armazenadas no log de eventos.....	111
Quadro 18 - Níveis dos indicadores da Norma Europeia EN 15341: 2007	115

GRÁFICOS

Gráfico 1 - Artigos MI “AND” Simulação por área de aplicação.....	66
Gráfico 2 - Quantidade de Artigos “manutenção” AND “process mining” por área de aplicação	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Total de artigos pesquisados.....	30
Tabela 2 - Exemplo de um log de eventos genérico	97
Tabela 3 - Definição dos cenários pela equipe de manutenção	112
Tabela 4 - Extrato da descrição dos valores das informações para cada cenário .	115
Tabela 5 - Indicadores calculados	117
Tabela 6 - Informações do <i>plug-in Genetic Algorithm</i>	125
Tabela 7 - Composição da equipe de manutenção	129
Tabela 8 - Matriz de decisão	130
Tabela 9 - Matriz normalizada e ponderada	131
Tabela 10 - Extrato do Ranking dos indicadores pelo método TOPSIS	132
Tabela 11 - Definição dos cenários pela equipe de manutenção	134
Tabela 12 - Extrato da descrição dos valores das informações para cada cenário.	135
Tabela 13 - Indicadores calculados	136

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	QUESTÃO DE PESQUISA	19
1.2	OBJETIVOS	20
1.2.1	Objetivo geral	20
1.2.2	Objetivos específicos	20
1.3	JUSTIFICATIVA	21
1.4	METODOLOGIA DE PESQUISA	22
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	23
2	REVISÃO DA LITERATURA	25
2.1	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE PESQUISA	26
2.2	INVESTIGAÇÃO	28
2.3	DESCRIÇÃO DO PORTIFÓLIO DE ARTIGOS	32
2.3.1	MI e simulação	32
2.3.2	Mineração de processos e MI	41
2.3.3	Mineração de processos e simulação	49
2.4	ENQUADRAMENTO DOS TRABALHOS PUBLICADOS	62
2.5	ESCOPO DA PESQUISA	68
2.5.1	Análise da eficiência da manutenção	71
3	FUNDAMENTOS	76
3.1	MINERAÇÃO DE PROCESSOS	76
3.2	MÉTODOS MULTICRITÉRIO DE APOIO A DECISÃO	78
3.2.1	AHP	80
3.2.2	PROMETHEE	83
3.2.3	TOPSIS	85
3.3	REDES DE PETRI	86
3.4	SOFTWARE CPN TOOLS	88
4	FRAMEWORK PROPOSTO	90
4.1	ESTRUTURA DO FRAMEWORK	92
4.2	MINERAÇÃO DE PROCESSOS	97
4.3	MODELAGEM E SIMULAÇÃO	103
4.3.1	Seleção de indicadores	103
4.3.2	Modelagem	106
4.3.3	Cenários de simulação	111

4.3.4	Geração de data logs	113
4.4	TOMADA DE DECISÃO	114
4.4.1	Cálculo de indicadores	114
4.4.2	Priorização de cenários	117
4.5	CONSIDERAÇÕES SOBRE O FRAMEWORK PROPOSTO	121
5	RESULTADOS	123
5.1	MINERAÇÃO DE PROCESSOS	123
5.2	MODELAGEM E SIMULAÇÃO	129
5.2.1	Seleção de indicadores	129
5.2.2	Modelagem	133
5.2.3	Cenários de simulação	134
5.3	TOMADA DE DECISÃO	135
5.3.1	Cálculo de indicadores	135
5.3.2	Priorização de cenários	137
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	146
6.1	CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA	147
	REFERÊNCIAS	149
	APÊNDICE 1 – INFORMAÇÕES PARA CÁLCULO DOS INDICADORES	164
	APÊNDICE 2 – DETALHAMENTO DAS INFORMAÇÕES PARA CÁLCULO DOS INDICADORES DE MANUTENÇÃO	168
	APÊNDICE 3 – MATRIZ DE DECISÃO	172
	APÊNDICE 4 – MATRIZ NORMALIZADA E PADRONIZADA	174
	APÊNDICE 5 – RANKING DOS INDICADORES ($\geq 0,80$)	176
	ANEXO 1 – INDICADORES DE DESEMPENHO (EN 15341-2007)	178

1 INTRODUÇÃO

O ambiente industrial atual, altamente competitivo, exige que as empresas obtenham o máximo de desempenho em suas atividades produtivas, o qual está diretamente relacionado à confiabilidade e disponibilidade de suas instalações de produção. Neste contexto a MI contribui de forma decisiva pois procura garantir que o processo produtivo não sofra interrupções desnecessárias, com o aumento da automação nos processos de fabricação (KUMAR e GALAR, 2017).

A MI tem ganho mais importância deixando de ser considerada um custo, passando a fazer parte das estratégias competitivas das organizações manufatureiras. Neste contexto novas políticas de manutenção foram introduzidas, tais como (FBM) manutenção baseada em falhas, (UBM) manutenção baseada em uso, (CBM) manutenção baseada em condição, (JARDINE, 2006; Waeyenbergh e Pintelon, 2002, 2009; Persona et al., 2009, 2010); (DOM) manutenção de design), (Chinese e Ghirardo, 2010); e (DBM) manutenção baseada em detecção (MUCHIRI et al., 2011; AHMAD, 2012; Faccio et al., 2014; KUMAR e GALAR, 2017).

A manutenção contemporânea está inserida em um contexto inovador de desenvolvimento industrial, o qual é chamado de Indústria 4.0, incluindo “Internet das Coisas” e “Big Data”. Este novo cenário gera um grande volume de dados do ambiente produtivo que podem ser utilizados com maior eficiência pela manutenção e contribuir para a melhoria do processo de fabricação (BORLIDO, 2017). À medida que mais e mais dispositivos são instrumentados, interligados e automatizados para atender a essa visão, o pensamento estratégico da indústria moderna tem sido focado na implantação de tecnologias de manutenção para garantir a operação sem falhas e a entrega dos serviços conforme planejado (KUMAR e GALAR, 2017).

Esta nova visão apoiada em sistemas inteligentes que prevê falha e faz diagnósticos, permite que intervenções de natureza técnica possam ser realizada virtualmente/remotamente uma vez que o correto registo dos dados do processo revela eventuais falhas no sistema. Além disto, é possível saber em que lugar está determinada equipe de manutenção, assim como planejar futuras ações de manutenção e não agendar outras ações à mesma equipe uma vez que os técnicos já estão designados a outra tarefa de manutenção (BAGLEE e MARTTONEN, 2015; BORLIDO, 2017; MOURTZIS D. et al. 2017; KUMAR e GALAR, 2017).

Neste contexto inovador da indústria 4.0 apoiada pelos sistemas de informações, pode ser utilizada a simulação computacional como uma ferramenta de suporte ao gestor ou tomador de decisões em um ambiente industrial. Esta questão permite que se consiga obter um melhor entendimento sobre o desempenho das atividades que estão sendo executadas assim como verificar o comportamento de um cenário futuro por meio de mudanças no ambiente ou processo atual.

Atualmente o uso da simulação para modelar sistemas de manutenção está em ascensão, embora a simulação esteja bem estabelecida na manufatura em geral, parece estar ainda em desenvolvimento para manutenção. Poucos pesquisadores apresentaram estruturas conceituais para um modelo de manutenção utilizando a simulação, geralmente os frameworks são desenvolvidos para sistemas específicos sem detalhar a abordagem de modelagem ou fornece exemplos numéricos (SHARMA, 2011; ALABDULKARIM, 2014; ALRABGHI, 2015; NURCAHYO, ARISAPUTRA, 2017).

A modelagem de um ambiente de MI poderá exigir vários tipos de informações, portanto utilizar dados registrados no dia a dia de trabalho poderá contribuir de maneira significativa para que a simulação gere resultados mais confiáveis. Uma ferramenta que pode contribuir para a simulação é a mineração de processos, a qual segundo Aalst (2011) poderá dar suporte a construção de modelos para a simulação, por meio de registros (log) de eventos para obter informações sobre o processo executado, facilitando a identificação de características que podem não ser facilmente visíveis.

Para que a mineração de processos possa ser utilizada é preciso que os sistemas de informações registrem os dados e permitam a exportação dos mesmos. Khodyrev e Popova (2014) comentam que os sistemas de suporte, como o Enterprise Resource Planning (ERP) ou o Customer Relationship Management (CRM), permitem a construção de processos, a execução de controle e a armazenagem automática de informações objetivas sobre eventos ocorridos durante a execução do processo.

Os Sistemas de Gerenciamento de Manutenção Computadorizado (CMMS) também podem ser utilizados como fonte de dados para a mineração de processos, pois de acordo com Partidar (2017); Lopez-Campos e Fernandez (2017), ajudam a organizar informações e, assim, a realizar atividades de manutenção de forma mais eficiente, pois fornece todo o histórico de rastreamento, relatórios de manutenção passados, status de desempenho, dados relacionados à capacidade do processo, etc.

Os sistemas de informação modernos costumam armazenar informações de baixo nível sobre o “curso” de execução para a maioria dos processos de uma empresa nos chamados "logs de eventos". Este grande volume de dados gerados, podem ser analisados com o auxílio de técnicas de mineração de processos que permitem extrair informações. Por exemplo, os logs de transação de um sistema de planejamento de recursos empresariais podem ser usados para descobrir modelos que descrevem processos, organizações e produtos.

Mineração processos está intimamente relacionada com BAM (Business Activity Monitoring), BOM (Business Operations Management), BPI (Business Process Intelligence), e dados / mineração de fluxo de trabalho (AALST, 2011; PROCESS MINING GROUP, 2018). Esta questão envolvendo a simulação no contexto da MI poderá auxiliar os gerentes de manutenção a atingir o desempenho desejado, tanto no processo quanto aos resultados de manutenção. Esta hipótese pode ser alcançada com o desenvolvimento e implementação de uma estrutura de medição rigorosamente definida e indicadores que são capazes de medir elementos importantes do desempenho da função de manutenção.

A partir do momento que se tem algum indicativo de desempenho é importante ter algum procedimento ou técnica para representar os valores encontrados e demonstrar algum tipo de solução, decisão ou direcionamento aos gestores de manutenção. Os indicadores de performance da manutenção (Maintenance Performance Indicator – MPI) podem utilizados para avaliar o desempenho da manutenção, indicadores de desempenho bem definidos podem potencialmente apoiar a identificação de lacunas de desempenho, entre o desempenho atual e o desejado.

Desse modo, o presente trabalho busca apresentar uma abordagem para auxiliar na tomada de decisão na MI, que utiliza a mineração de processos, simulação e métodos MCDM em conjunto para que seja possível gerar informações para calcular indicadores de desempenho na MI previstos na Norma Europeia (EN 15341:2007).

1.1 QUESTÃO DE PESQUISA

Para o desenvolvimento desta pesquisa algumas observações foram postas: (i) a simulação é uma técnica amplamente utilizada no contexto da MI, porém sua aplicação está focada em situações específicas e não em um contexto gerencial

(abrangente); (ii) há uma grande dificuldade em obter dados confiáveis para modelar e simular um ambiente de manutenção; (iii) uso de indicadores de desempenho é considerado pouco explorado para se analisar a tomada de decisão; (iv) o uso de métodos MCDM na MI que trabalharam as questões qualitativas e quantitativas ainda necessitam de avanços em pesquisa.

Diante destas observações faz-se o seguinte questionamento: é possível construir um framework que permita utilizar as técnicas de simulação e mineração de processos de forma integrada, verificar o desempenho por meio de indicadores e métodos MCDM e ao final auxiliar o gestor na tomada de decisão na MI?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral propor um framework para a tomada de decisão na MI, que utilize técnicas de mineração de processos, simulação e métodos MCDM. A intenção é criar um ambiente que permita ao gestor da MI inserir e simular cenários para gerar informações para o cálculo de indicadores de desempenho com o auxílio da mineração de processos. Como complemento tem-se a tomada de decisão que será caracterizada pela escolha de um dos cenários simulados, com a utilização de métodos MCDM (Multi-Criteria Decision Making).

1.2.2 Objetivos específicos

- a) estabelecer um framework conceitual;
- b) selecionar os indicadores previstos na Norma Europeia (EN 15341: 2007);
- c) estabelecer as informações necessárias referentes ao cálculo dos indicadores a serem inseridas no processo de modelagem;
- d) elaborar o modelo de simulação com o auxílio do software CPN Tools;
- e) elaborar a estrutura de cálculo dos indicadores selecionados com base nas simulações realizadas e com o auxílio da mineração de processos;
- f) determinar os pesos dos indicadores selecionados e estabelecer o melhor cenário.

1.3 JUSTIFICATIVA

O uso mais acentuado da modelagem e simulação teve início em meados da década de 60 do século passado, durante as próximas décadas teve um grande aumento de popularidade, seus métodos e ferramentas foram significativamente melhorados e uma série de possíveis usos aumentaram. Apesar do progresso significativo nas últimas décadas, algumas questões como “modelagem para o suporte à tomada decisão” ainda são problemas a serem estudados (DEHGHANIMOHAMMADABADI, KEYSER e CHERAGHI, 2017; AALST et al., 2010).

A maioria das técnicas de simulação são aplicadas à produção e à logística, nas quais as rotas do processo são pré-definidas e, portanto, podem ser mais facilmente modeladas. O uso da simulação para modelar sistemas de manutenção está em ascensão, a simulação permite a modelagem de comportamento complexo e requer menos pressupostos em comparação com a modelagem analítica (AGUIRRE; PARRA; ALVARADO, 2013, ALRABGHI; TIWARI, 2015).

Embora a simulação esteja bem estabelecida na manufatura em geral, está ainda em desenvolvimento para manutenção. Poucos pesquisadores apresentaram estruturas conceituais para um modelo de manutenção utilizando a simulação, geralmente os frameworks são desenvolvidos para sistemas específicos sem detalhar a abordagem de modelagem ou fornecerem exemplos numéricos (SHARMA, 2011; ALABDULKARIM, 2014; ALRABGHI e TIWARI, 2015).

A literatura na área da MI indica a necessidade de uma abordagem capaz de integrar o desempenho e a estratégia de manutenção, a fim de adaptar dados existentes sobre falhas de equipamentos e ajustar rotineiramente as medidas preventivas. Portanto, uma estratégia não deve ser aplicada a todas as máquinas, nem todas as estratégias à mesma máquina (SEECHARAN; LABIB e JARDINE, 2018).

Nesta pesquisa busca-se contribuir para a melhoria do desempenho (com a utilização da simulação e representado por indicadores) da manutenção por meio de um framework capaz auxiliar os gestores na tomada de decisão. Esta proposta ajuda na solução das deficiências apontadas por SHARMA, 2011; ALABDULKARIM, 2014; ALRABGHI e TIWARI, 2015, pois utiliza-se um modelo de simulação e possui uma abrangência maior contemplando o gerenciamento da manutenção. Também contribui nos problemas destacados por SEECHARAN; LABIB e JARDINE, 2018, pois utiliza

indicadores para verificar o desempenho de cenários que estão diretamente relacionados com a estratégica ou política de manutenção.

O framework poderá ser utilizado em diferentes ambientes industriais, apresentará uma estrutura flexível permitindo a customização ou ajuste ao ambiente a ser aplicado. Neste caso, duas questões devem ser modificadas, uma delas é a seleção de indicadores e a outra é adaptação do modelo de simulação as exigências do ambiente a ser explorado.

1.4 METODOLOGIA DE PESQUISA

Uma pesquisa científica é composta por um conjunto de ações visando descobrir a solução para um problema por meio de procedimentos científicos, os quais se consolidam a partir da eficiência verificada no passado. Para obtenção de resultados científicos no campo das ciências humanas e sociais, as informações devem mostrar coerência, originalidade, consistência e objetividade, em concordância com os aspectos de critérios internos de verdade e de critérios externos de intersubjetividade (TRIVINÕS, 1987; MINAYO, 1996; KOTHARY, 2004; GIL, 2008).

Neste trabalho necessitou-se de uma revisão sistemática da literatura para obtenção do estado da arte dentro do contexto da MI com uso da mineração de processos e da simulação. O estudo exploratório, foi a base metodológica na busca deste conhecimento que consiga responder ao problema levantado nesta pesquisa, tornando possível a geração de um novo conceito ou maneira de pensar.

O objetivo da pesquisa exploratória é modificar conceitos e ideias, buscando o desenvolvimento de novas abordagens posteriores. Normalmente esta pesquisa é feita por meio de levantamento bibliográfico ou de estudo de caso e contribui para o esclarecimento de determinado problema a fim de torná-lo mais simples e compreensível (GIL, 2008; Richardson, 2008).

A Figura 1 apresenta o planejamento das etapas da pesquisa, as quais são subdivididas em três estágios de desenvolvimento. O estágio 1 corresponde ao aprofundamento teórico possibilitando a identificação de questões ainda não trabalhadas pela comunidade acadêmica, com o conhecimento destas lacunas de pesquisa torna-se possível pensar em uma abordagem que contemple esta deficiência científica.

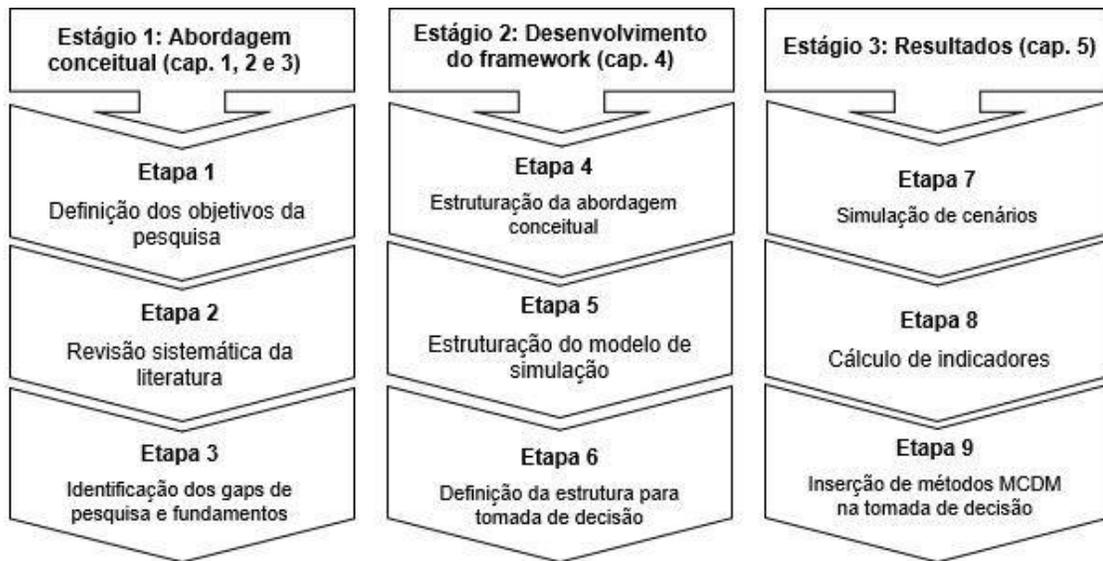


Figura 1 - Etapas da pesquisa.

Fonte: O autor 2018.

O Estágio 2 compreende o desenvolvimento do framework proposto, nesta fase é importante deixar claro as questões envolvendo a simulação e o processo de tomada de decisão. Importante ressaltar que nesta fase procurar-se operacionalizar a metodologia, a qual poderá ainda apresentar alguns ajustes para o seu aperfeiçoamento. Neste estágio procura-se também utilizar o software CPN Tools para a modelagem e simulação usando Redes de Petri Coloridas (CPN), o mesmo software irá gerar logs “artificiais” que por meio de outro software (Prom Import) disponibilizará os arquivos com extensão adequada para o uso de ferramentas de mineração de processos.

O Estágio 3 consiste em utilizar primeiro as ferramentas de mineração de processos para extrair as informações provenientes das simulações, na sequência calcular os indicadores selecionados e que estão previstos na Norma Europeia (EN 15341: 2007) e por fim utilizar os indicadores calculados e a avaliação dos especialistas da MI para escolha dos cenários estabelecidos.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

CAPÍTULO 01: neste capítulo apresenta-se a Introdução na qual a pesquisa é inserida em um contexto, com desdobramento em objetivo geral e objetivos específicos, problema de pesquisa, justificativa e a metodologia de trabalho.

CAPÍTULO 02: este capítulo apresenta o procedimento de pesquisa adotado e a fundamentação teórica com a integração de três assuntos: MI, mineração de processos e simulação computadorizada. Na sequência é apresentado uma análise da fundamentação teórica e uma demonstração da área de pesquisa a ser trabalhada dentro do contexto da MI, e por fim um esboço dos indicadores a serem utilizados para a demonstração do desempenho.

CAPÍTULO 03: neste capítulo é apresentado alguns fundamentos básicos que dizem a respeito aos assuntos abordados no trabalho, não se trata de uma revisão sistemática da literatura, mas de conceitos importantes para os leitores desta pesquisa.

CAPÍTULO 04: este capítulo apresenta o framework proposto e o fluxo de atividades a serem desenvolvidas para que seja possível auxiliar na tomada de decisão na MI. O objetivo é explicar a existência das atividades, suas inter-relações no processo e os resultados esperados para ajudar a atingir o objetivo da estrutura proposta.

CAPÍTULO 05: este capítulo apresenta os resultados desta pesquisa, envolvendo as atividades necessárias para a utilização do framework proposto. Ao final do processo tem-se a tomada de decisão estruturada envolvendo métodos MCDM.

CAPÍTULO 06: este capítulo apresenta as considerações finais e também uma descrição das contribuições desta pesquisa.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentados os conceitos a respeito dos assuntos abordados assim como os trabalhos publicados a fim de verificar se as questões como a mineração de processos e a simulação estão presentes no contexto da MI, evidenciando as metodologias e ferramentas sugeridas e utilizadas pelos autores. Primeiro será identificado a área de atuação da pesquisa para que seja possível pesquisar os trabalhos relacionados a tal área e depois por meio de um procedimento estruturado apoiado em metodologias já testadas e aceitas na comunidade acadêmica será identificado a lacuna de pesquisa, na qual será direcionado os esforços para uma contribuição específica.

O procedimento para a seleção dos trabalhos relacionados ao tema de pesquisa passou por uma definição das palavras-chave, seleção dos artigos que irão compor o portfólio da pesquisa e uma análise do portfólio dos artigos estudados, tais etapas podem ser vistas na Figura 2.

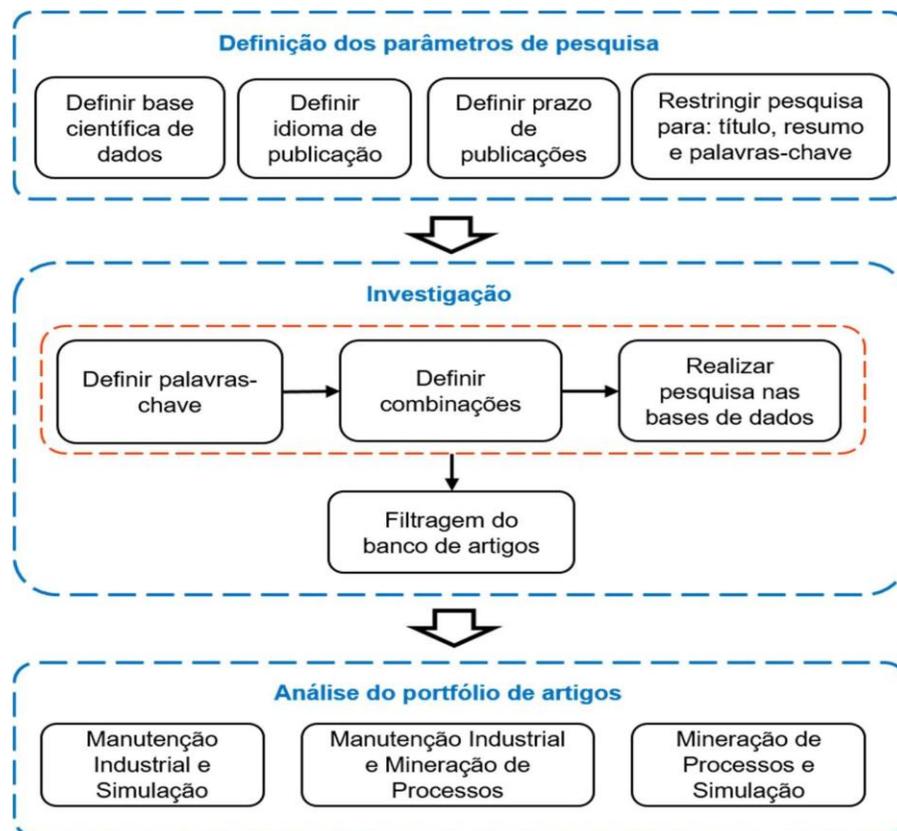


Figura 2 - Fases da revisão da literatura.

Fonte: Adaptado de Tranfield, Denyer e Smart (2003) e Ensslin et al. 2014.

A metodologia de pesquisa desta seção foi adaptada nas fases propostas por Tranfield, Denyer e Smart (2003) e Ensslin et al. 2014, que basicamente consiste em três etapas, sendo (i) Definição dos parâmetros de pesquisa; (ii) Investigação; e, (iii) Análise do portfólio de artigos.

2.1 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE PESQUISA

Três bases de dados on-line foram utilizadas: Scopus; Web of Science e Science Direct, em todas elas foram utilizadas a opção “advanced search”. O idioma utilizado para a busca dos trabalhos foi o “inglês”, visto que o mesmo detém o maior número de publicações e, conseqüentemente, maior probabilidade de trabalhos relevantes. O prazo de busca foi definido como “All Years” pois tratando-se de uma tese de doutorado considerou-se fundamental um rastreamento completo até os dias atuais com foco nas publicações de artigos tanto em periódicos como em congressos e conferências.

Embora exista uma notável semelhança entre os mecanismos de busca das bases de dados utilizadas, pequenas diferenças obrigaram algumas modificações na *string* de busca, para que a mesma conseguisse atender aos critérios adotados. O Quadro 1 mostrou a *string* final de busca utilizada em cada uma das bases de dados, nota-se que para a base de dados da Scopus, em algumas combinações de palavras-chave aplicou-se alguns filtros (limit-to) para não buscar trabalhos de áreas fora do contexto pretendido.

Base de dados	Palavras-chave	String de busca
Scopus	MI e mineração de processos	(TITLE-ABS-KEY (<i>maintenance</i>) AND TITLE-ABS-KEY (<i>process mining</i>))
	MI e simulação	(TITLE-ABS-KEY (<i>maintenance</i>) AND TITLE-ABS-KEY (<i>simulation</i>)) AND (LIMIT-TO (ACCESSTYPE (OA))) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "cp")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, "ENGI"))
	Simulação e mineração de processos	(TITLE-ABS-KEY (Simulation) AND TITLE-ABS-KEY (<i>Process mining</i>))

Continua

		Conclusão
Base de dados	Palavras-chave	String de busca
Web of Science	MI e mineração de processos	TÓPICO: ("Maintenance" AND "Process mining")
	MI e simulação	TITLE: ("maintenance" AND "Simulation") Refined by: Language: (ENGLISH) AND Research Category: (ENGINEERING INDUSTRIAL OR ENGINEERING MANUFACTURING OR ENGINEERING MULTIDISCIPLINARY) AND Document Type: (ARTICLE AND PROCEEDINGS PAPER) Overtime: All years
	Simulação e mineração de processos	TÓPICO: ("Process mining" AND "Simulation") Refined by: Language: (ENGLISH) AND Document Type: (ARTICLE AND PROCEEDINGS PAPER) Overtime: All years
Science Direct	MI e mineração de processos MI e simulação Simulação e mineração de processos	Nesta base de dados, para as três combinações de palavras-chave usa-se TITLE ("palavra-chave" AND "palavra-chave") or ABSTRACT ("palavra-chave" AND "palavra-chave") or KEYWORDS ("palavra-chave" AND "palavra-chave")

Quadro 1 – Alteração da *string* de busca nas bases de dados.

Fonte: O autor 2018.

Outra questão importante na busca foi restringir a ocorrência apenas para título, resumo e palavras-chave, já que ocorrências conjuntas no corpo do texto poderiam levar a um número muito grande de artigos e, conseqüentemente, a resultados além do tema pesquisado.

Palavras-chave	MI; mineração de processos; simulação
Operadores Booleanos	AND entre palavras-chave; OR entre campos de busca das bases de dados
Campos de busca	Título; resumo; palavras-chave
Critérios de exclusão	Artigos que utilizam apenas o termo "manutenção" não o abordam no texto
Idioma	Inglês
Tipo de publicação	Artigo (periódicos e conferências)
Janela temporal	All Years

Quadro 2 – Critérios para busca de artigos.

Fonte: O autor 2018.

O Quadro 2 demonstrou de maneira rápida os critérios definidos para a busca dos artigos. Percebe-se que foi utilizado o termo “MI” ao invés de apenas “manutenção”, esta questão é importante pois direciona a pesquisa para a manutenção no contexto industrial. Quanto ao tipo de publicação também foram considerados os artigos de conferências, pois considerou-se como conhecimento aplicado ou em desenvolvimento.

2.2 INVESTIGAÇÃO

As palavras-chave utilizadas para a busca dos trabalhos publicados estão diretamente relacionadas com os objetivos desta pesquisa, os quais tem como escopo os termos, MI e Simulação. Para complementar as palavras-chave tem-se a Mineração de Processos, que será útil para extrair as informações obtidas nos logs de eventos a gerados pela simulação.

Foi verificado primeiramente se as três palavras-chave quando utilizada em conjunto com um operador booleano “AND” traz alguma publicação considerando os parâmetros de pesquisa já descritos. Esta verificação procura identificar se a mineração de processos está integrada a simulação e se estão sendo aplicadas no contexto da MI.

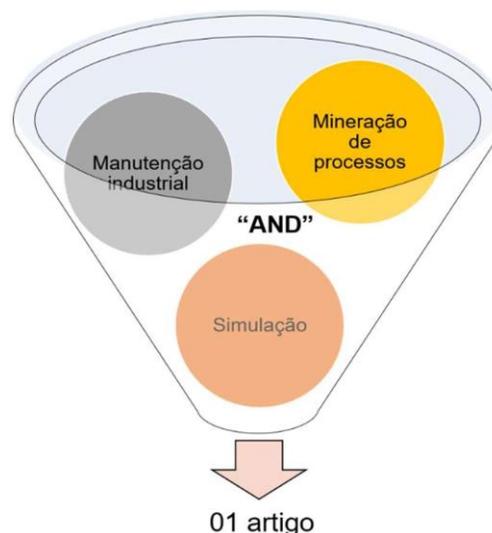


Figura 3 – Verificação de trabalhos com os elementos em conjunto.

Fonte: O autor 2018.

Como foi observado na Figura 3 a busca por artigos combinando os três elementos resultou em apenas 01 trabalho, este é um indicativo que no contexto da MI não está sendo utilizado de maneira efetiva a simulação computacional aliada as técnicas de mineração de processos. Neste caso abre-se a possibilidade para a realização de um trabalho com a utilização destes três elementos em conjunto, conforme Figura 4, na qual percebe-se que a mineração de processos e a simulação são técnicas que podem ser aplicadas em conjunto dentro da MI.

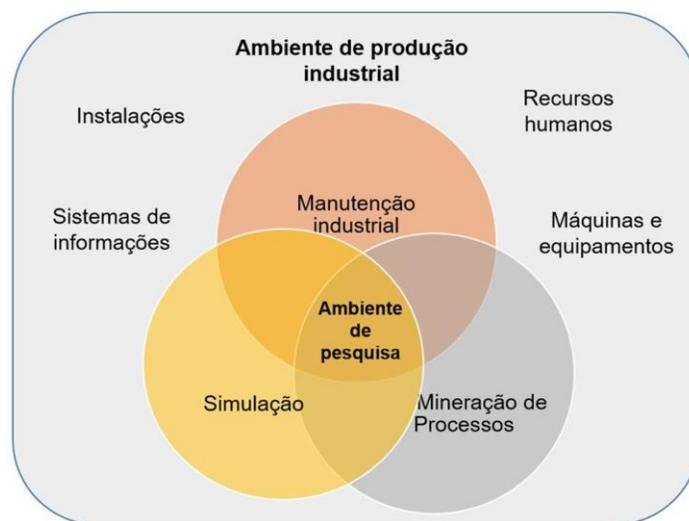


Figura 4 - Escopo da pesquisa.

Fonte: O autor 2018.

Esta informação é importante pois consegue-se delimitar a pesquisa a um contexto praticamente inexplorado, como os três elementos em conjunto apresentam apenas um resultado é adequado neste caso pesquisa-los em pares, conforme Figura 5. Estas combinações de palavras-chave irão primeiro verificar a aplicação da simulação e da mineração de processos na MI, na sequência, verificar o uso da simulação, seja em qualquer área, com a utilização da mineração de processos como base de informações e comportamento de processos.

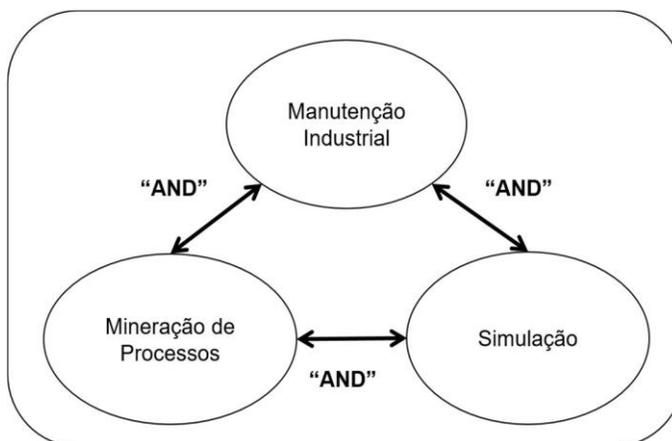


Figura 5 - Palavras-chave da pesquisa.

Fonte: O autor 2018.

Após a definição das palavras-chave é preciso utilizar bases científicas de dados para a identificação dos trabalhos publicados a respeito dos assuntos a serem abordados. A busca nas bases de dados, obteve um retorno de 1.478 artigos conforme Tabela 1, a base Scopus retornou 548 artigos relacionados ao tema, Science Direct retornou 651 artigos e Web of Science retornou 279 artigos.

Conforme observado, e já esperado, as palavras-chave Simulação e Mineração de Processos assim como Simulação e MI acabaram gerando cerca de 80% dos artigos encontrados. Esta questão que demonstra que a simulação é uma ferramenta já utilizada e difundida a bastante tempo e que mesmo sendo aplicadas em algumas áreas consideradas novas o seu uso é visível.

Tabela 1 - Total de artigos pesquisados.

Palavras-chave		Scopus	Science Direct	Web of Science	Total
MI	Mineração de Processos	46	217	20	283
Simulação	MI	331	135	165	631
Simulação	Mineração de Processos	171	299	94	564
Total		548	651	279	1.478

Fonte: O autor 2018.

A próxima etapa é a filtragem do banco de artigos, que devido a quantidade de artigos identificados utilizou-se o aplicativo EndNote (Thomson Reuters), no qual as

referências foram importadas sendo verificadas 553 em duplicidade sendo, portanto foram eliminadas do processo, após a exclusão restaram 925 artigos para a sequência da análise. Na sequência ocorre a filtragem dos artigos restantes por meio da leitura dos títulos, esta etapa é importante pois consegue-se identificar a aderência dos mesmos com a pesquisa proposta.

Foram lidos os títulos de todos os 925 artigos resultando na eliminação de 545 referências, ao final desta etapa restaram 380 artigos mais aderentes ao tema desta pesquisa. Após a leitura dos títulos torna-se necessário refinar os artigos com a leitura dos resumos, possibilitando assim uma maior aderência ao escopo desta pesquisa. Optou-se pela leitura dos resumos, pois neles estão descritos o objetivo de cada pesquisa e o esboço dos resultados, ou seja, são informações essenciais para identificação do perfil de cada trabalho executado.

Após a leitura dos resumos, foram descartados 285 artigos restando até o momento 95 trabalhos aderentes ao escopo desta pesquisa, um fato interessante é que mais de 70% dos trabalhos foram publicados nos últimos 4 anos, provavelmente impulsionada por uma necessidade crescente das empresas em criar métodos mais robustos e confiáveis para a tomada de decisão na manutenção. Após a leitura dos 95 trabalhos publicados identificou-se que 76 deles abordam o tema, permitindo assim identificar uma lacuna que viabilizasse esta pesquisa, conforme Figura 6.

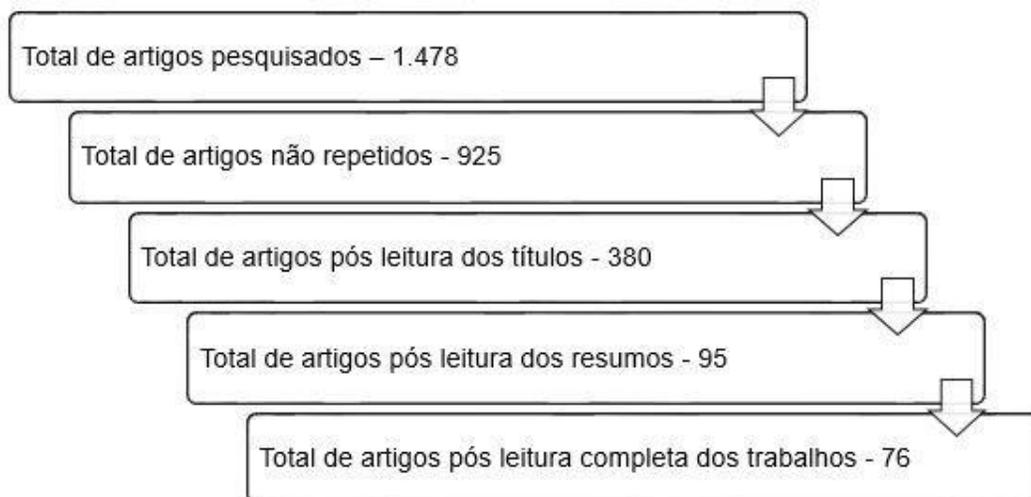


Figura 6 - Processo de filtragem dos artigos para base teórica.

Fonte: O autor 2018.

Após a extração das informações contidas nos trabalhos é possível verificar quais metodologias estão sendo utilizadas e se existe alguma integração entre a mineração de processos e simulação aplicadas no contexto da MI.

2.3 DESCRIÇÃO DO PORTIFÓLIO DE ARTIGOS

Nesta seção são verificados os trabalhos pesquisados de acordo com as palavras-chave visto na Figura 5. Os artigos estarão listados por data de publicação, sendo do mais antigo ao mais recente, apresentando em uma das colunas o nome dos autores e ano de publicação e em outra coluna uma breve descrição da contribuição de cada trabalho.

2.3.1 MI e simulação

Nesta seção foram tratados os trabalhos que utilizam a simulação computacional aplicada no contexto da MI, com o intuito de relatar rapidamente o que cada trabalho tem como objetivo e caso apresente algum procedimento ou modelo específico, o mesmo é demonstrado para uma melhor contribuição.

O Quadro 3, apresenta uma relação de 44 artigos que tratam dos assuntos “MI” e a “simulação” de maneira conjunta. Observa-se que aproximadamente 70% das pesquisas foram publicadas nos últimos 4 anos, esta questão permite observar que as empresas estão investindo cada vez mais na melhoria da manutenção, seja por meio de procedimentos técnicos ou controles gerenciais

As informações do Quadro 3, apresentam uma ordem de acordo com o ano de publicação, esta ordem será útil para relacionar os trabalhos com as áreas de aplicação na manutenção a serem vistas em seções futuras. Estas informações também ajudam o leitor a se localizar rapidamente caso queira se aprofundar em detalhes de cada pesquisa.

N°	Autor(es)/Ano	Proposta do trabalho
1	Dheeraj Bansal, David J. Evans, Barrie Jones (2005)	Classificaram os parâmetros do sistema da máquina com base no movimento atual, usando uma abordagem de rede neural
2	Vasile Anghel, George Draghici (2006)	Desenvolveram uma concepção preditiva de manutenção para a manutenção operacional, através da previsão do grau de desgaste dos sistemas dinâmicos criogênicos, tendo como variável o monitoramento da lubrificação do sistema de lubrificação dos componentes com função dinâmica
3	Zineb Simeu-Abazi, Zouhir Bouredji (2006)	Buscam modelar sistemas complexos por meio de modos de funcionamento identificados. Na abordagem proposta, a integração do monitoramento no sistema de fabricação é facilitada pelo desenvolvimento de um modelo genérico. O objetivo foi propor um sistema de monitoramento capaz de absorver a degradação interna de quaisquer variáveis e garantir a continuidade do serviço
4	Xiaojun Zhou, Lifeng Xi, Jay Lee (2006)	Desenvolveram uma política de manutenção oportunista dinâmica para um sistema em série de unidades múltiplas monitorado continuamente com integração de efeitos imperfeitos nas atividades de manutenção
5	Cher Ming Tan, Nagarajan Raghavan (2008)	Desenvolveram uma estrutura prática simples para o agendamento de sistemas multiestado (MSS) baseado em manutenção preditiva (PdM). Os planejamentos de manutenção são derivados de uma perspectiva do sistema, usando os tempos de falha do sistema geral, estimados a partir de suas tendências de degradação do desempenho
6	Ning Wang, Shudong Sun, Shubin Si (2009)	Propõem um modelo de manutenção preditiva para o sistema em deterioração com o processo semi-Markov e apresenta um método para determinar a melhor política de inspeção e manutenção em conjunto
7	Wenzhu Liao, Ershun Pan, Lifeng Xi (2009)	Propõem uma política sequencial de Manutenção Baseada em Condições (CBM) para sistemas monitorados inteligentes com base na priorização de custos e confiabilidade
8	Giuseppe Curcuru, Giacomo Galante, Alberto Lombardo (2010)	Propõem um procedimento para o cálculo do tempo de manutenção que minimiza o custo global de manutenção. Ao adotar um modelo estocástico para o processo de degradação e hipotetizar o uso de um sistema de monitoramento imperfeito, o procedimento é atualizado por uma abordagem bayesiana, usando os dados provenientes do sistema de monitoramento
9	Ming-Yi You, Guang Meng (2012)	Propõem uma estrutura de agendamento de manutenção preditiva em nível de componente na qual as informações de previsão de vida útil residual do sistema são utilizadas. Na estrutura proposta, o agendamento de manutenção preditiva é acionado apenas quando um sistema está próximo da falha
10	Chee Khiang Pang, Xiaoyun Wang, Junhong Zhou (2012)	Propõem uma estrutura de manutenção pré-cognitiva baseada em modelos mistos baseados em tempo e condição para prever o estágio de degradação da máquina e o desgaste
11	Kosta P. Boshnakov, et al. (2013)	Propõem método para a manutenção preditiva de uma caldeira metalúrgica com base em simulações de diagnóstico e previsão do estado atual de objetos de alta temperatura
12	T. Tinga, R.H.P. Janssen (2013)	Propõem uma estrutura de modelagem para quantificar o desempenho de diferentes políticas de manutenção
13	Christoph Prackwieser (2014)	Propôs um procedimento de modelagem para alcançar modelos compreensíveis da cadeia de suprimentos
14	Antti Puurunen, Jukka Majava, Pekka Kess (2014)	Avaliaram o uso de dados estatisticamente imperfeitos em uma otimização estocástica de inventário baseada em simulação, onde as características de falha dos itens são derivadas de dados históricos de consumo

Continua

Continuação

15	Abdullah Alrabghi, Ashutosh Tiwari (2015)	Relataram o estado da arte na otimização de manutenção baseada em simulação, classificando sistematicamente a literatura publicada e descrevendo as principais tendências na modelagem e otimização de sistemas de manutenção
16	Hatice Ucar Guner, Ratna Babu Chinnam, Alper Murat (2015)	Apresentaram um sistema de suporte à decisão de manutenção em nível de planta, que fornece orientações sobre prioridades de manutenção corretiva e preventiva com base nas classificações de gargalo do equipamento com o objetivo de melhorar o rendimento diário da planta
17	Hui Yin, Guojun Zhang, Haiping Zhu, Yuhao Deng, Fei He (2015)	Desenvolveram um modelo integrado de controle estatístico de processo e decisão de manutenção
18	Xin Lei, Peter A. Sandborn, Navid Goudarzi, Maira A. Bruck (2015)	Propõem um modelo de opção (escolha) de manutenção preditiva
19	Yuguo Xu, Yaohui Zhang, Shixin Zhang (2015)	Apresentaram um método de previsão da vida útil de componentes com objetivo de reduzir os custos de manutenção
20	Eduardo Gilabert, et al. (2015)	Apresentaram uma metodologia que fornece uma avaliação contínua das tecnologias de manutenção preditiva (PdM) em relação a cenários de negócios específicos. Essa simulação de Monte Carlo baseia-se nas informações de confiabilidade baseadas na distribuição de densidade de probabilidade de falha para o sistema ou componente, fornecendo como resultado a estratégia ideal entre as opções propostas
21	Abdullah Alrabghi, Ashutosh Tiwari (2016)	Propõem uma abordagem para modelar sistemas de manutenção complexos usando simulação de eventos discretos
22	Milan Vathoopan, Benjamin Brandenbourger, Alois Zoitl (2016)	Apresentaram uma metodologia de manutenção corretiva centrada no homem para componentes mecatrônicos, aproveitando os dados de engenharia interdisciplinar desses componentes. Um modelo de simulação em 3D dos princípios ciber-físicos é proposto para apoiar a ação de manutenção humana
23	Mohammad Dehghanimohammadabadi, Thomas K. Keyser, S., Hossein Cheraghi (2017)	Apresentaram uma estrutura exclusiva de Simulação Baseada em Otimização Iterativa (IOS), que inclui uma integração tripla de gerenciadores de simulação, otimização e banco de dados
24	Abdullah Alrabghi, Ashutosh Tiwari, Mark Savill (2017)	Investigaram a combinação ideal de estratégias de manutenção para um determinado sistema de fabricação
25	Kurt Matyas, Tanja Nemeth, Klaudia Kovacs, Robert Glawar (2017)	Propõem uma nova abordagem processual para o planejamento de manutenção prescritiva em empresas de manufatura. Com base nas correlações de dados identificadas e nos dados recebidos da máquina em tempo real, são previstas falhas no sistema e propostas medidas de manutenção prescritivas.
26	Václav Legát, František Mošna, Zdeněk ALeš, Vladimír Jurča (2017)	Apresentaram um método para determinar o intervalo ideal para manutenção periódica preventiva e um parâmetro diagnóstico ideal para manutenção preditiva
27	Nurul Afiqah A. Majid, Asan G.A. Muthalif (2017)	Apresentaram uma tecnologia mecatrônica que pode ajudar a implementar a manutenção preditiva, combinando instrumentos de manutenção preditivos e inteligentes. O equipamento de simulação de falhas de vibração (VFSR) foi projetado para simular e entender assinaturas de falhas
28	Rahmat Nurcahyo, A. E. Arisaputra (2017)	Apresentaram uma combinação de dados históricos e recomendações de fabricantes ou fornecedores, a fim de obter um programa de manutenção ideal e adequado. O método usa a simulação de Markov com base em peças de remoção não programadas para obter a remoção de tempo preditivo e a recomendação do fabricante ou fornecedor como manutenção preventiva

Continua

Continuação

29	Maximilian Zarte, Ude Wunder, Agnes Pechmann (2017)	Apresentaram um conceito e um primeiro estudo de caso para uma simulação de manutenção preditiva genérica
30	Liyun XU et al. (2017)	Apresentaram um algoritmo heurístico com o objetivo de determinar a política de manutenção ideal que minimizará o custo total do sistema por unidade de tempo
31	Jannie Sonderkaer Nielsen & John Dalsgaard Sorensen (2018)	Apresentaram uma estrutura computacional para o planejamento baseado em riscos de inspeções e reparos de componentes deteriorados. Dois tipos distintos de regras de decisão são usados para modelar decisões e dois modelos de decisão são desenvolvidos, ambos modelos baseados em redes Bayesianas dinâmicas (dBNs) para modelagem de deterioração
32	Jie Geng, Xu Peng, Ying Li, Chuan Lv, Zili Wang, Dong Zhou (2018)	Propõem a geração de uma simulação de manutenção virtual não imersiva ideal e razoável é sempre demorada, devido às operações humanas complicadas e aos relacionamentos lógicos envolvidos. Neste sentido os autores buscam propor uma abordagem semi-automática para aumentar a eficiência na implementação de simulação de manutenção virtual não imersiva
33	Jun Zhong, Wenyuan Li, Caisheng Wang and Juan Yu (2018)	Apresentaram uma abordagem baseada em dados para determinar a prioridade de manutenção de componentes. Comparado com os métodos convencionais, o método proposto pode considerar parâmetros de monitoramento de condições no nível do equipamento e índices de impacto na confiabilidade no nível do sistema, criar automaticamente pesos racionais entre os vários parâmetros / índices e manipular dados ausentes e inválidos
34	Hang Yang, Zhe Zhang, Xianggen Yin (2018)	Propõem uma nova estratégia de manutenção com base na análise de probabilidade de falha. Os autores usam a simulação para verificar se a estratégia de manutenção proposta consegue fornecer um ciclo de manutenção mais preciso do que a manutenção baseada em condições existente
35	Guo Qing Cheng, Bing Hai Zhou, Ling Li (2018)	Buscam otimizar conjuntamente o tamanho do lote, o limite de estoque, a manutenção preventiva e os limites de revisão, de modo que o custo total por unidade de tempo seja minimizado. Um modelo matemático estocástico é formulado e resolvido por uma abordagem de otimização baseada em simulação, acoplando a Simulação de Monte Carlo e a Metodologia de Superfície de Resposta
36	Huadong Mo, Giovanni Sansavini, Min Xie (2018)	Investigaram o modelo de sistemas de controle CBM e emprega o desempenho reduzido de controle como uma medida de degradação direta para decidir as atividades de manutenção
37	Wakiru, J.; Pintelon, L.; Muchiri, P.N.; Chemweno, P. (2018)	Os autores utilizam um modelo de simulação de eventos discretos para analisar o efeito de remanufatura e manutenção como parte de estratégias de economia circular, na disponibilidade da usina e no tempo de manutenção
38	Gary Linnéusson, Amos H. C., Tehseen Aslam (2018)	Buscaram otimizar o desempenho da manutenção com base na simulação, com objetivo de maximizar a disponibilidade, minimizar os custos de manutenção e minimizar os custos de consequência da manutenção
39	F. P. Santos, A. P. Teixeira, C. Guedes (2018)	Utilizaram Redes de Petri estocásticas generalizadas (GSPNs) com predicados acoplados à simulação de Monte Carlo (MCS) para modelar o planejamento de operações e atividades de manutenção
40	Aiping Jiang, et al. (2018)	Propõem uma estratégia de manutenção baseada em condições, considerando o consumo de energia e as emissões de dióxido de carbono. O objetivo é estender um modelo que integre aspectos ecológicos à tomada de decisão e otimização de manutenção
41	Y. Saada et al. (2018)	Propõem dois métodos de simulação matemática para avaliar os resultados de estratégias de manutenção preventiva condicional com base em controles e inspeções com desempenho ideal

Continua

		Conclusão
Nº	Autor(es)/Ano	Proposta do trabalho
42	Zahedi-Hosseini, F, Scarf, PA (2018a)	Apresentam uma estrutura para o estudo da interação de pedidos de peças de reposição com programação de manutenção. Foram utilizadas a simulação e uma ferramenta de otimização numérica para estudar a otimização de custos de várias políticas
43	Farhad Zahedi-Hosseini, Aris A. Syntetos, Philip A. Scarf (2018b)	Apresentam um modelo de simulação para determinar a política de inspeção com ótimo custo-benefício para um sistema de produção de várias linhas, levando em consideração o tempo de inatividade simultâneo
44	Yang Lu, Liping Sun, Xinyue Zhang, Feng Feng, Jichuan Kang, Guoqiang Fu (2018)	Propõem uma abordagem oportunista de otimização de CBM, na qual existe dependência econômica entre os componentes sujeitos ao monitoramento de condições. Uma rede neural artificial é usada para prever a porcentagem de vida, aproveitando as informações de monitoramento da condição

Quadro 3 – Trabalhos que integram MI e simulação.

Fonte: O autor 2018.

Puurunen, Majava e Kess (2014), realizaram um estudo para avaliar o uso de dados estatisticamente imperfeitos para otimização de estoques baseada em simulação estocástica, onde as características de falha dos itens são derivadas de dados históricos de consumo, o que representa uma situação real na implementação de tal modelo de otimização.

Alrabghi e Tiwari, (2015) investigaram áreas de aplicação e estudos de casos reais publicados, além de estratégias e políticas de manutenção, e a simulação de eventos discretos foi a técnica mais relatada para modelar sistemas de manutenção. Apesar da pesquisa limitada neste campo de desenvolvimento, parece ter um alto potencial, pois permite analisar e otimizar sistemas de manutenção complexos.

Guner, Chinnam e Murat (2015), apresentam um sistema, conforme Figura 7, de suporte à decisão de manutenção no nível de chão de fábrica, que fornece orientação sobre prioridades de manutenção corretiva e preventiva com base nos gargalos do equipamento e com o objetivo de melhorar o rendimento diário da planta. O sistema antecipa a dinâmica da planta (isto é, gargalos, níveis de buffer de hora em hora e probabilidade de quebras da máquina) para turnos futuros usando informações de estado de partida do turno de produção, por exemplo, histórico de manutenção de equipamentos, status operacional de máquinas, níveis de buffer e mix de modelo de produção programado.

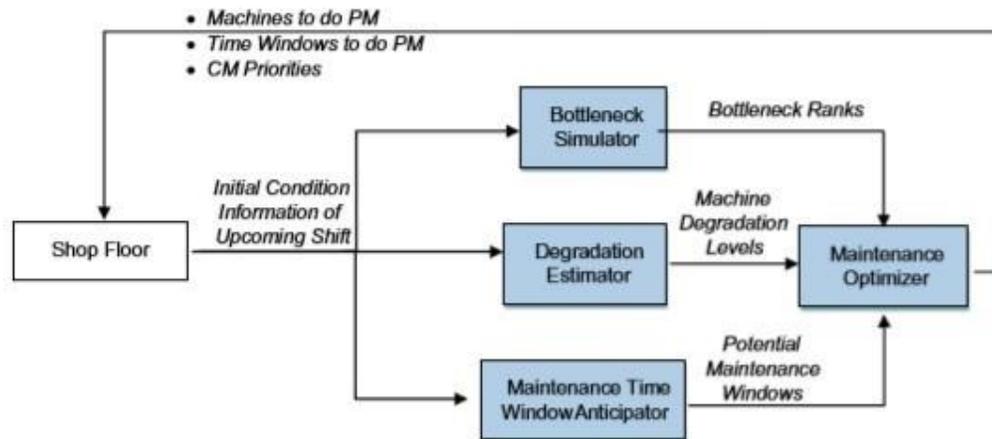


Figura 7 - Framework for APMDSS.

Fonte: Guner, Chinnam e Murat (2015).

O sistema permite que os supervisores de manutenção lidem com a complexidade das operações de manutenção e tomem decisões relacionadas à manutenção, o que ajuda a atingir as metas de produtividade da produção. Ele antecipa os gargalos e acumulações de buffer de hora em hora no próximo turno (s), observando o estado inicial do sistema de produção e estima a degradação da máquina usando um modelo estatístico. Em seguida, as informações são colocadas no otimizador de manutenção, que gera relatórios sobre prioridades de manutenção corretiva (CM) e manutenção preventiva (PM) e tempos oportunos para executar o PM (GUNER, CHINNAM e MURAT, 2015).

Guner, Chinnam e Murat (2015), comentam ainda que em contraste com a abordagem de análise de gargalo convencional, o APMDSS explora os estados iniciais, como tempos desde o último ciclo de PM em equipamentos individuais, níveis de buffer, falhas de equipamento iniciais conhecidas e informações de mix de modelo do sistema de produção em vez de usar apenas os dados históricos de gargalo.

Alrabghi e Tiwari (2016) propõem uma nova abordagem genérica para modelar as estratégias de manutenção, de acordo com a Figura 8, na qual pressupõe a disponibilidade de um modelo Simulação de Evento Discreto (DES) válido para o sistema de fabricação em questão, bem como a disponibilidade dos dados de manutenção necessários. Não há restrições quanto ao número de ativos no sistema de manufatura ou ao número de estratégias de manutenção definidas para cada ativo,

os ativos podem ser idênticos ou não idênticos. Da mesma forma, as estratégias de manutenção podem ser as mesmas para todas as máquinas ou cada ativo pode ter sua estratégia de manutenção exclusiva.

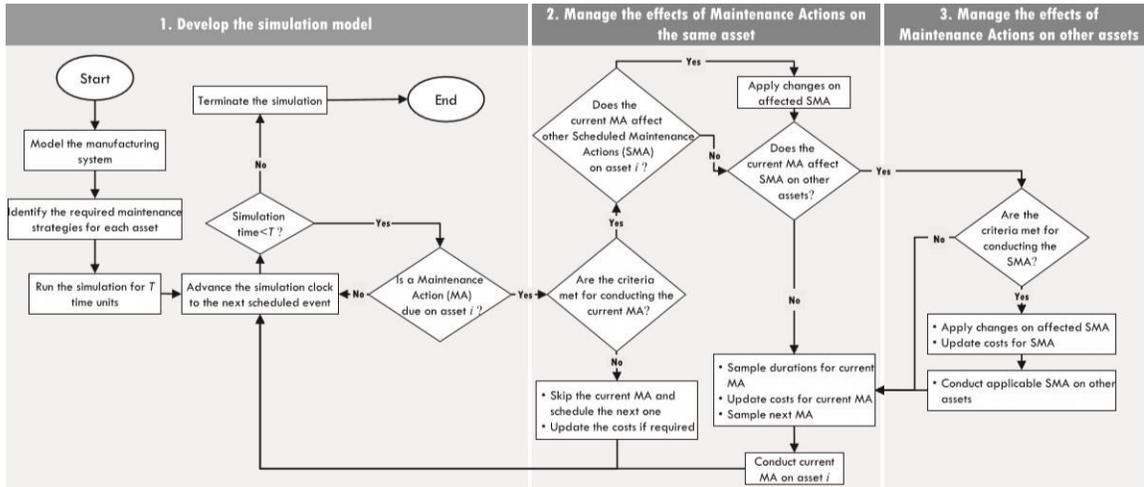


Figura 8 - Uma abordagem genérica para modelar estratégias de manutenção.

Fonte: Alrabghi e Tiwari, 2016.

A abordagem, vista na Figura 8, consiste em três etapas da seguinte maneira:

- modelagem do sistema de manufatura;
- gerenciar os efeitos das ações de manutenção no mesmo ativo;
- gerenciar os efeitos das ações de manutenção em outros ativos (ALRABGHI e TIWARI, 2016).

Dehghanimohammadabadi, Keyser e Cheraghi (2017) apresentaram uma estrutura única de simulação baseada em otimização iterativa (IOS), que ocorre no nível operacional no qual o gerenciador de otimização usa os dados operacionais como entrada para a modelagem analítica e resolve o problema de forma otimizada, conforme visto na Figura 9. A estrutura automaticamente reformula o modelo usando parâmetros atualizados e encontra uma solução em um período razoável de tempo. O gerenciador de banco de dados é então atualizado com base na solução ideal atual e a simulação continua a partir deste momento, esse ciclo pode ocorrer várias vezes durante uma única execução de simulação, dependendo do número de pontos de acionamento no modelo.

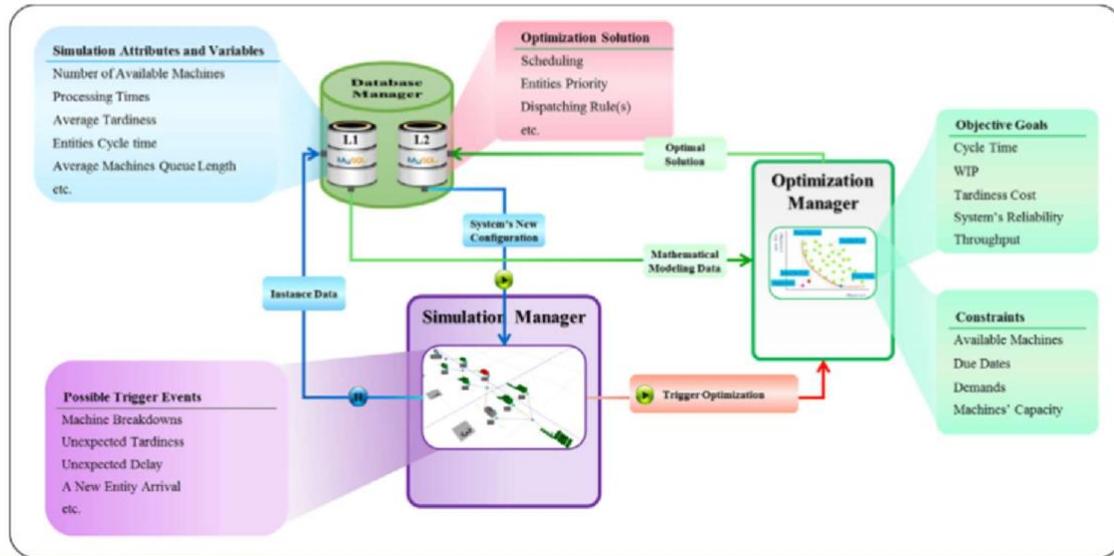


Figura 9 - Estrutura detalhada da estrutura proposta do IOS para um sistema de manufatura.

Fonte: Dehghanimohammadabadi, Keyser e Cheraghi, 2017.

No trabalho de Dehghanimohammadabadi, Keyser e Cheraghi (2017) os autores apresentam uma Otimização Baseada em Simulação (SBO), que de certa forma coleta dados operacionais para determinar uma solução ótima. Nesta situação a mineração de processos permitiria a entrada de dados discretos que interligado a um modelo de simulação contribuiria para a tomada de decisão de curto prazo.

Matyas et al. (2017), propõem uma abordagem processual para planejamento prescritivo de manutenção em empresas de manufatura, ferramentas de análise de dados e simulação multivariados são utilizados para analisar dados históricos (dados de qualidade do produto, falha da máquina e de programa de produção). Com base na correlação de dados identificados e dados da máquina em tempo real recebidas, falhas do sistema estão previstos e são propostas medidas de manutenção prescritivas.

A abordagem processual proposta para a realização de planejamento de manutenção prescritiva é composta por quatro elementos principais conforme Figura 10: Aquisição de Dados e Pré-Processamento; Análise de Dados e Simulação; Reação do Modelo; Manutenção prescritiva Sistema de Apoio à Decisão. No primeiro elemento, dados relevantes são capturados, classificados e estruturados, a análise de dados subsequente identifica as correlações nos dados pré-estruturados (MATYAS et al. 2017).

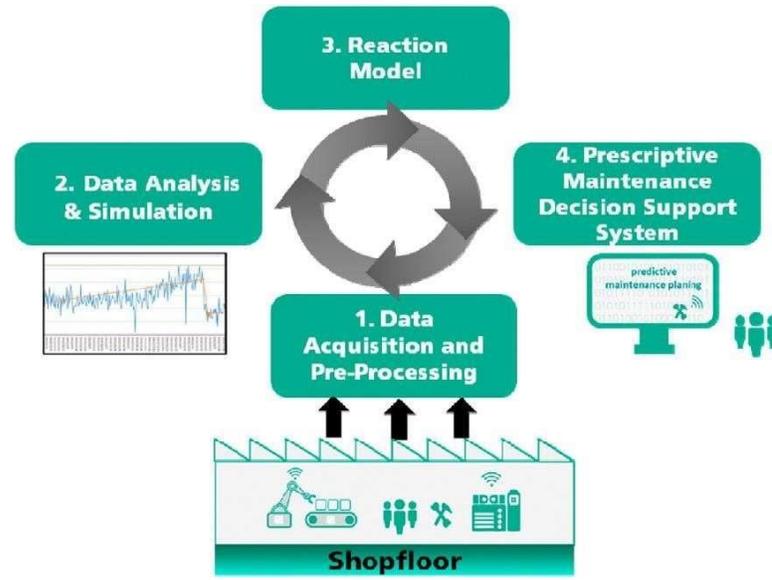


Figura 10 – abordagem processual para planejamento de manutenção prescritivo.

Fonte: Matyas et al. (2017).

A definição das regras é definida e parametrizada no terceiro elemento, que prevê falhas na máquina com base na condição e revela desvios de qualidade em tempo real, e finalmente, o quarto elemento prevê falhas no sistema e sugere medidas de manutenção prescritivas baseadas nessa lógica. Contudo, a decisão final, se as atividades de manutenção sugeridas devem ser realizadas ou rejeitadas, é realizada pelo operador, portanto, a abordagem desenvolvida visa um sistema de apoio à decisão que permita aos operadores tomar a decisão final (MATYAS et al. 2017).

Alrabghi, Tiwari e Savill (2017) apresentaram um estudo desenhado para dar uma contribuição importante para o campo da otimização baseada em simulação de manutenção, ilustrado na Figura 11. É um dos primeiros a otimizar várias estratégias de manutenção em simultâneo com os seus parâmetros em sistemas de produção industrial, enquanto considerando a dinâmica de produção. Modelos estocásticos discretos para simulação de eventos foram desenvolvidos e ligados a um mecanismo de otimização multi-objetivo. Várias estratégias de manutenção foram investigadas incluindo manutenção corretiva, preventiva, oportunista e Manutenção baseada na condição.

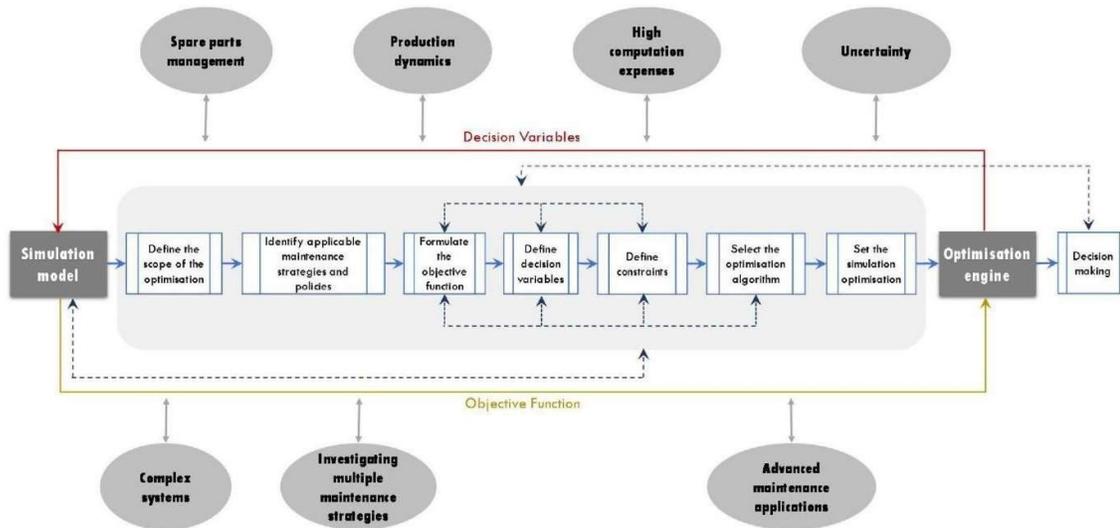


Figura 11 - Estrutura de otimização baseada em simulação para sistemas de manutenção.

Fonte: Alrabghi, Tiwari e Savill (2017).

A Figura 11 ilustrou um fluxograma passo-a-passo que orienta o usuário na definição do escopo otimização, identificando estratégias de manutenção aplicáveis a formulação do problema de otimização, selecionando o algoritmo de otimização, definindo os parâmetros simulação e interpretação dos resultados, permitindo assim aos profissionais e pesquisadores personalize o problema de manutenção as suas necessidades específicas (ALRABGHI, TIWARI e SAVILL, 2017).

2.3.2 Mineração de processos e MI

Nesta seção foram tratados os trabalhos que utilizam a mineração de processos como uma ferramenta para ajudar os gestores da área de manutenção a identificarem problemas e tomar melhores decisões. O intuito foi relatar rapidamente o que cada trabalho tem como objetivo e caso apresente algum procedimento ou modelo específico o mesmo será demonstrado para uma melhor contribuição.

O Quadro 4, apresenta os trabalhos relacionados a MI e a mineração de processos, no total foram identificados apenas 9 trabalhos, destes 6 foram publicados nos últimos dois anos, isto mostra que a mineração de processos é um assunto ainda muito pouco tratado dentro da MI. Algumas questões como desconhecimento sobre o assunto e também a falta de informações adequadas para trabalhar com as ferramentas de mineração de processos, podem ser consideradas barreiras existentes

que podem ser superadas com uma aplicação mais insistente neste ambiente de atuação.

N°	Autor (es)	Proposta do trabalho
1	Diego Galar, Anna G. B. Tormos, Luis Berges (2012)	Propõem uma metodologia baseada em mineração de dados para manutenção baseada em condições (CBM), considerando dados de Monitoramento de Condição (CM) e dados históricos de gerenciamento de manutenção
2	Mohamed-Hedi Karray, Brigitte Chebel-Morello, Noureddine Zerhouni (2014)	Propõem uma abordagem dinâmica de feedback da experiência para explorar os comportamentos do processo de manutenção na execução real da plataforma de manutenção. Um processo de aprendizado ativo que explora o log de eventos é introduzido levando em consideração o aspecto dinâmico do conhecimento usando a engenharia de rastreamento
3	Olivier S., Sandro P. Pires, Eduardo A. P. Santos, Eduardo de F. R. Loures, José M. P.A. Cestari (2015)	Propõem uma estrutura é baseada principalmente em conceitos de ontologia e mineração de processos para desempenho sustentável em MI
4	Edson Ruschel, Eduardo A. P. Santos, Eduardo de F. R. Loures (2017)	Buscam integrar modelos probabilísticos e preditivos construídos a partir de informações de logs de eventos, através de técnicas de mineração de processos, para estimar as variações do tempo do ciclo do processo
5	Flávio Piechnicki, Eduardo A. P. Santos, Eduardo de F. R. Loures (2017)	Propõem uma estrutura conceitual que concilia informações tácitas e explícitas da função de manutenção, gerando uma nova base de conhecimento usada na análise e aprimoramento de decisões na implantação de um modelo personalizado de RCM (Manutenção Centrada em Confiabilidade)
6	Monika Gupta (2017)	Propõem uma metodologia de análise e melhoria do processo de manutenção, explorando novas aplicações de mineração de processos e análise preditiva. Analisa-se o processo de manutenção de software aplicando mineração de processo em repositórios de software visando resolver as ineficiências identificadas usando análises preditivas
7	Edson Ruschel, Eduardo Alves Portela Santos, Eduardo F. Rocha Loures (2018)	Propõem um modelo probabilístico em redes bayesianas integradas a modelos preditivos com o auxílio da mineração de processos. O modelo probabilístico permite simular alterações na probabilidade de ocorrência de eventos, permitindo a visualização de vários cenários diferentes e fornecendo melhor suporte aos gerentes no planejamento de atividades de manutenção
8	Christoph M. Flath, Nikolai Stein (2018)	Buscam aprimorar o entendimento da modelagem preditiva com uso de algoritmos aplicados a processos industriais. Para isto é necessário aperfeiçoamento e consolidação constantes para melhorar o poder preditivo de uma solução de análise de negócios
9	Thaduri A. et al. (2018)	A mineração de processos está alcançando significado para resolver problemas específicos relacionados a processos, como classificação, clustering, descoberta de processos, previsão de gargalos, desenvolvimento de fluxo de trabalho de processos etc. Neste trabalho os autores utilizam o conceito de mineração de processos para mapear e compreender um conjunto de relatórios de manutenção, principalmente reparos ou substituições de algumas linhas da rede ferroviária

Quadro 4 - Integração entre manutenção e process mining.

Fonte: O autor 2018.

A área de manutenção está cada vez mais integrada ao processo produtivo industrial, os esforços têm sido cada vez mais intensos a fim de coletar, armazenar e disponibilizar de forma clara e de fácil entendimento aos tomadores de decisão em nível operacional. Torna-se necessário integrar dados de Monitoramento com dados de gerenciamento provenientes de sistemas de informação, que contém informações, tais como: falhas de componentes, dados relacionados a falhas, manutenção ou reparos e controle de inventário e assim por diante (FACCIO et al., 2014; ALRABGHI e TIWARI, 2016; KUMAR e GALAR, 2017).

Estes sistemas, chamados de Computer Maintenance Management Systems (CMMS), são o núcleo de práticas tradicionais de manutenção programada e dependem de observações em massa de dados históricos para fazer modificações para ações de manutenção regulamentados. O obstáculo mais óbvio na integração de CMMS, processo e dados de monitoramento é a natureza distinta dos tipos de dados envolvidos, e há várias tentativas para remediar esse problema. Embora, tenha havido muitos esforços recentes para coletar e manter grandes repositórios de estes tipos de dados, tem havido relativamente poucos estudos para identificar as maneiras estes a conjuntos de dados podem ser relacionados (GALAR et al., 2012).

Galar et al. (2012), procuram atender essa necessidade, propondo uma metodologia baseada em mineração de dados combinada para a manutenção baseada na confiabilidade considerando os dados de monitoramento e dados históricos. Esboça uma integração de sistemas de dados físicos e de gerenciamento que também suporta inteligência de negócios e mineração de dados, onde os conjuntos de dados podem ser combinados de maneiras não tradicionais. O objetivo é encontrar padrões novos e interessantes nos dados e de alguma forma usar o conhecimento adquirido nas decisões de manutenção. Os usuários devem ser capazes de identificar rapidamente possíveis diagnósticos de falhas e recuperar rapidamente as ações de manutenção histórica que foram efetivas para resolver o problema. Esse sistema seria facilmente escalável, permitindo que os mantenedores tenham informações sobre uma variedade de práticas que estão sendo realizadas em todo o campo.

O objetivo na manutenção é encontrar padrões novos e interessantes nos dados e de alguma forma usar o conhecimento adquirido nas decisões de manutenção. A integração dos resultados da mineração de processos no negócio

operacional geralmente é feita de forma ad hoc, mas com a integração da mineração, o foco muda para a implantação em aplicativos de negócios. A evolução desta integração deve se manifestar como uma interface de exploração de manutenção automatizada, os usuários devem ser capazes de identificar rapidamente possíveis diagnósticos de falhas e recuperar rapidamente as ações de manutenção histórica que foram efetivas para resolver o problema. Esta evolução seria facilmente escalável, permitindo que os mantenedores tenham informações sobre uma variedade de práticas que estão sendo realizadas em todo o campo (GALAR et al, 2012).

Karray, Chebel-Morello e Zerhouni (2014) estudaram o aspecto dinâmico do processo e dos serviços em uma plataforma de manutenção, um grande desafio na mineração de processos. Trata-se de uma abordagem de feedback de experiência dinâmica para explorar comportamentos de processos de manutenção na execução real da plataforma de manutenção, conforme Figura 12. O objetivo é extrair novas regras sobre transições e atividades em processos de manutenção de execuções de plataformas anteriores, bem como suas interações de usuários.

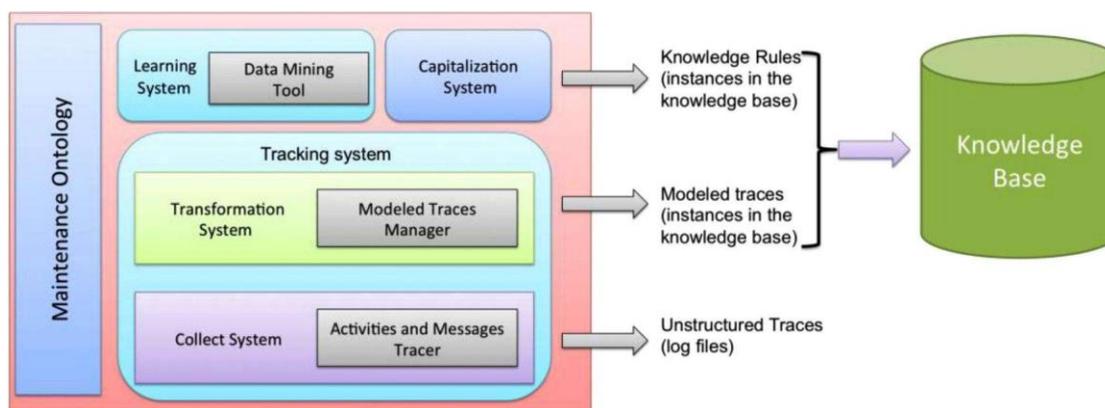


Figura 12 - Arquitetura PETRA.

Fonte: Karray, Chebel-Morello e Zerhouni (2014).

Conforme mostrado na Figura 12, o TBS (Trace-Based System) que se denomina PETRA baseia-se na ontologia do domínio de manutenção IMAMO elaborada por Karray, Chebel-Morello e Zerhouni (2014), de modo a modelar vestígios, bem como a interpretar e extrair conhecimento. Esta estrutura apresenta algumas etapas mostradas no quadro 5.

Etapa	Objetivo	Descrição
1	Coleta de eventos do processo	Durante interações entre operadores de manutenção e plataforma, o sistema de rastreamento coleta os dados e os armazena em arquivos de log.
2	Transformação e Estruturação	Nesta etapa, o sistema de transformação recupera os arquivos do log e os analisa criando um mapa (processo) entre o conteúdo do arquivo e o modelo IMAMO, depois armazena esses registros como novas instâncias na base de conhecimento.
3	Criação do conjunto de aprendizado	Esta etapa está incluída no sistema de aprendizado, o sistema recupera os registros modelados e os agrupa de forma abstrata para serem usados na fase de aprendizado.
4	Aprendizado	O sistema de aprendizado recupera os registros modelados de atividades e os adapta para aplicar o método de mineração de dados.
5	Validação	Nesta etapa, o sistema de aprendizagem aplica alguns indicadores e limites para validar as regras geradas na etapa anterior.
6	Capitalização	O sistema de aprendizagem adapta e formaliza as regras validadas para refletir a estrutura da base de conhecimento antes de salvá-las como novas instâncias. O objetivo desta etapa é compartilhar o conhecimento descoberto com a plataforma de manutenção, de modo a ser reutilizável.

Quadro 5 – Etapas para construção da estrutura PETRA.

Fonte: Adaptado de Karray, Chebel-Morello e Zerhouni (2014).

Karray, Chebel-Morello e Zerhouni (2014) comentam ainda que esta abordagem denominada PETRA para ser eficaz, requer um período substancial de execução da plataforma para coletar dados e traços suficientes, a fase de aprendizagem requer vestígios em grande escala se for para obter regras confiáveis.

Percebe-se características diferentes nos trabalhos de Galar et al. (2012) e Karray, Chebel-Morello e Zerhouni (2014), sendo o primeiro preocupado com encontrar uma maneira de obter os dados, buscando padrões novos e que de alguma forma possa ser usado para a tomada de decisões de manutenção. O segundo visa usar os dados minerados para avaliar um determinado sistema ou estrutura de auxílio a manutenção.

Sénéchal et al. (2015) propuseram um trabalho para estabelecer as inter-relações de manutenção no contexto da sustentabilidade, com foco em gestão de informação e transformação no contexto da gestão do conhecimento. Um quadro conceitual para o desempenho sustentável na manutenção foi proposto, com o objetivo em demonstrar, por meio de uma abordagem de baixo para cima, a estruturação do conhecimento tácito e sua transformação em ontologias, e paralelo usando a mineração de processos em um modelo híbrido. Nesta perspectiva

conceitual, a ontologia age diretamente na melhoria da interoperabilidade dos sistemas de informação da empresa, tendendo assim para evitar a ambiguidade semântica do conhecimento associado.

Piechnicki, Santos e Loures (2017), propõem um quadro conceitual que concilia informações tácito e explícito da função de manutenção, gerando uma nova base de conhecimento usada na análise e melhoria decisões na implantação de um modelo RCM (Manutenção Centrada na Confiabilidade) personalizado. A transformação de dados brutos em conhecimento formal deve gerar registros em um único banco de dados, sendo disponível para as fases de implantação RCM, ao identificar tendências e aplicação de técnicas de mineração de processo, padrões e relações ocultas podem ser descobertos. Métodos MCDM/A (Critérios múltiplos para Tomada de Decisão/Análise) serão utilizados para apoiar as decisões nas etapas de implementações RCM.

A Figura 13 mostra um quadro conceitual geral proposto, a fim de executar o processo de implantação, ele é composto de três partes: (i) um conhecimento do sistema de conciliação (tácito e explícito); (ii) um DCBD (dados de conhecimento descobriu) como uma fonte de conhecimento para ser aplicado em decisões RCM abordagens com apoio MCDM e (iii) as tarefas de análise da manutenção se dá por meio de técnicas MCDA e Mineração Processos, no acompanhamento da evolução de abstração conhecimento, para auxiliar na seleção das melhores políticas de manutenção e fornecer feedback sobre os resultados (PIECHNICKI, SANTOS e LOURES, 2017).

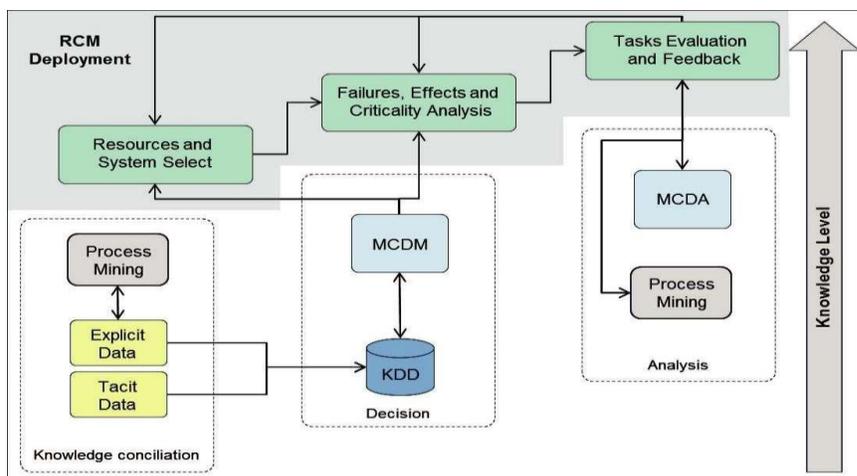


Figura 13 - Implantação conceitual RCM proposto.

Fonte: Piechnicki, Santos e Loures (2017).

Sénéchal et al. (2015) e Piechnicki, Santos e Loures (2017) se preocuparam com o conhecimento e as experiências adquiridas e que não estavam sendo utilizadas, neste caso procura-se usar a mineração de processos para tentar extrair o conhecimento tácito e usá-lo para a tomada de decisão na manutenção. Este trabalho integra modelos probabilísticos e preditivos construídos a partir de informações logs de eventos, por meio de técnicas de mineração de processo, para estimar as variações de tempo de ciclo do processo. A função para a disponibilidade dos equipamentos é definida e mudanças graduais em intervalos entre inspeções de manutenção são realizadas até que o tempo perdido para esta função é minimizada e o melhor intervalo é encontrado. Diferentes situações podem ser analisadas simulando variações nas probabilidades de ocorrência atividades, proporcionando um melhor apoio em atividades de manutenção de agendamento.

Gupta (2017), conforme Figura 14, analisou o processo de manutenção de software aplicando a mineração de processo em repositórios de software e resolveu as ineficiências identificadas usando a análise preditiva. Uma das questões a serem observadas é que a mineração de processos de logs de execução tem desafios, como a identificação de case ID e atividades, que necessitam de soluções genéricas e aprimoradas para obter maior precisão. A abordagem envolve três elementos: 1. processar a mineração de registros de ticket para analisar solicitações de entrada do usuário, 2. modelo preventivo para antecipar usuários com necessidades adicionais de informações no momento do envio do ticket, e 3. Modelo de detecção para identificar solicitações de entrada do usuário tático.

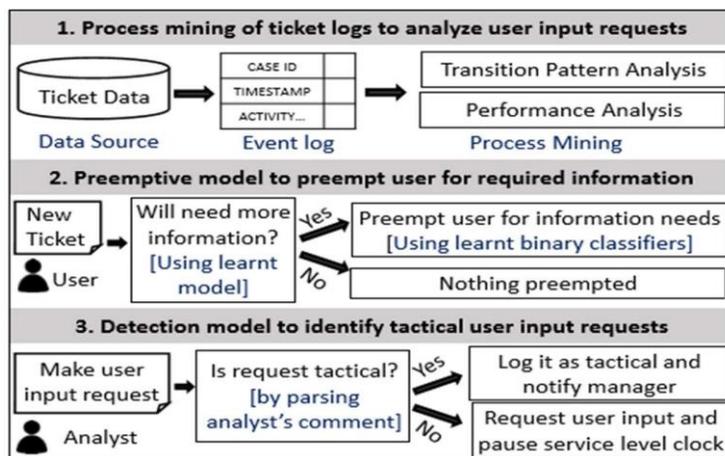


Figura 14 – Abordagem para analisar o processo de manutenção de software.
Fonte: Gupta (2017).

Recentemente Ruschel, Santos e Loures (2017, 2018) desenvolveram uma metodologia que integra modelos probabilísticos e preditivos construídos a partir de informações de logs de eventos, com o auxílio de técnicas de mineração de processos, para estimar as variações do tempo de ciclo do processo. Uma função para disponibilidade do equipamento é definida e mudanças graduais nos intervalos entre as inspeções de manutenção são realizadas até que o tempo perdido para essa função seja minimizado e o melhor intervalo seja encontrado.

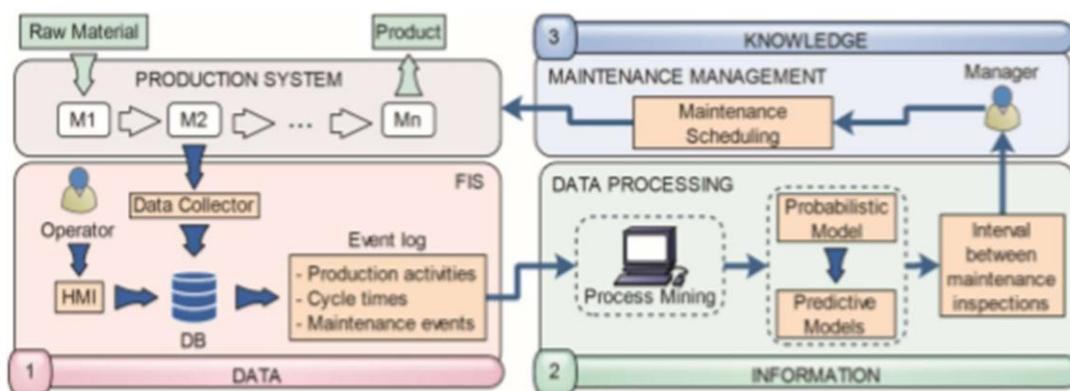


Figura 15 – Metodologia proposta.

Fonte: Ruschel, Santos e Loures (2017).

A metodologia representada na Figura 15 integra modelos preditivos alimentados com as durações das atividades do processo e uma rede bayesiana (BN) modelo probabilístico, construído a partir da informação de uma rede causal obtida com o auxílio de técnicas de mineração de processo. O modelo probabilístico BN é versátil e a integração com modelos preditivos garante a visualização de horizontes de médio e longo prazos que estimam satisfatoriamente o comportamento do processo, embora sejam necessários alguns estudos simulando variações nas probabilidades de diferentes atividades do processo, para evidenciar a real contribuição do modelo com o uso de BN (RUSCHEL, SANTOS e LOURES, 2017, 2018).

Flath e Stein (2018) desenvolveram uma ferramenta de dados para os tomadores de decisão na produção utilizando a análise preditiva. O uso de aprendizado de máquina torna-se inevitável, neste caso a capacidade de lidar com

dados não estruturados é importante pois o ambiente de produção apresenta sempre situações adversas e difíceis de previsão.

Ruschel, Santos e Loures (2017, 2018) e Flath e Stein (2018) buscaram relacionar as técnicas de mineração de dados e processos às necessidades de produção. Neste caso trabalha-se a necessidade de gerar dados relacionados à manutenção, mas que de forma direta ou indireta venha a interferir no desempenho do processo produtivo.

Thaduri et al. (2018) utilizam o conceito de mineração de processo para mapear e compreender um conjunto de relatórios de manutenção, principalmente reparo ou substituição de algumas linhas na rede ferroviária sueca. Os relatórios foram processados para extrair parâmetros de manutenção relacionados ao tempo, tais como tempos administrativos, logísticos e de reparo. Os gargalos são identificados no processo de manutenção e essas informações serão úteis para provedores de serviços de manutenção, gerentes de infraestrutura, proprietários de ativos e outras partes interessadas para melhoria e eficácia da manutenção.

2.3.3 Mineração de processos e simulação

Nesta seção foram tratados os trabalhos que utilizam a mineração de processos como uma ferramenta para ajudar na coleta de dados que permitam elaborar modelos de simulação em diversas áreas de negócios. Conforme Quadro 6, após o processo de filtragem dos trabalhos relacionados a “simulação” e a “mineração de processos” foram identificados apenas 23 trabalhos.

N°	Autor (es)	Proposta do trabalho
1	N.R.T.P. van Beest, Laura Maruster (2007)	Apresentam um estudo de caso envolvendo o redesenho de processos de uma empresa pertencente à indústria de gás. Para identificar intervenções adequadas de reprojeto, foram utilizadas técnicas de mineração de processos e simulação. Basicamente o estudo consiste em três etapas: (i) preparação de dados, (ii) mineração de processos e análise de desempenho e (iii) simulação dos modelos de processos atuais e reprojeto
2	A. Rozinat, et al. (2008)	Descrevem um sistema de simulação para suporte à decisão operacional no contexto do gerenciamento de fluxo de trabalho, para fazer isso, os autores exploram não apenas o design do fluxo de trabalho, mas também dados registrados que descrevem o comportamento histórico observado do sistema e informações extraídas sobre o estado atual do fluxo de trabalho. O uso de dados reais que capturam o estado atual e as informações históricas permite que as simulações prevejam com precisão comportamentos potenciais no futuro próximo para diferentes cenários

Continua

Continuação

3	A. Rozinat, R.S. Mans, M. Song, W.M.P. van der Aalst (2009)	Combinaram técnicas de mineração de processos para descobrir várias perspectivas (a saber, fluxo de controle, dados, desempenho e perspectiva de recursos) do processo a partir de dados históricos, e as integraram a um modelo de simulação abrangente. Este modelo de simulação é representado como uma rede de Petri colorida (CPN) e pode ser usado para analisar o processo, por exemplo, avaliar o desempenho de diferentes projetos alternativos
4	A. Rozinat, et al. (2009)	Complementam o estudo feito por A. Rozinat, et al. (2008) aprimorando o uso da mineração de processos em conjunto com a simulação
5	Laura Maruster, Nick R. T. P. van Beest (2009)	Propõem uma metodologia baseada em simulação e mineração de baixo para cima para ser empregada em atividades de redesenho, a metodologia começa com a identificação de problemas relevantes de desempenho, que são usados como base para o redesenho. Um modelo de processo é “extraído” e simulado como uma representação da situação existente, seguido pela simulação do modelo de processo reprojetoado como previsão do cenário futuro
6	Wil M.P. van der Aalst (2010)	O autor procura mostrar abordagens inovadoras de simulação, aproveitando as recentes descobertas na mineração de processos. O documento principal destaca alguns dos problemas que causam a adoção limitada da simulação, por exemplo, modelos de simulação tendem a simplificar demais a modelagem de pessoas que trabalham em período parcial em um processo. Além disso, os estudos de simulação geralmente se concentram no comportamento de estado estacionário dos processos de negócios, enquanto os gerentes estão mais interessados em resultados de curto prazo (um “botão de avanço rápido” no futuro) para a tomada de decisões operacionais
7	Ying Liu, Hui Zhang, Chunping Li, Roger Jianxin Jiao (2012)	Propõem uma abordagem genérica do BPS para suporte à decisão operacional, que inclui modelagem de processos de negócios e simulação de fluxo de trabalho com os modelos gerados. Os processos são modelados com gráficos de eventos por meio da mineração de processos a partir de logs de fluxo de trabalho que integram informações abrangentes sobre os aspectos de fluxo de controle, dados e recursos de um processo de negócios
8	Santiago Aguirre, Carlos Parra, Jorge Alvarado (2013)	Propõem uma abordagem metodológica para a integração de técnicas de mineração e simulação de processos em um projeto de redesenho de processos
9	Fernando Szimanski, et al. (2013)	Apresentaram uma abordagem capaz de capturar esse relacionamento entre o modelo de processo e o comportamento em tempo de execução em um modelo hierárquico. Além disso, por meio de uma combinação de mineração de processo e simulação baseada em agente, a abordagem suporta a melhoria do modelo de processo, para que ele se torne uma melhor representação do comportamento dos agentes no processo
10	Ivan Khodyrev, Svetlana Popova (2014)	Propõem uma abordagem para modelagem de processos de negócios para previsão de KPI de curto prazo, com base em logs de eventos e valores de variáveis de ambiente. O modelo de processo pronto para simulação é construído de forma semi-automática, somente os especialistas inserem as variáveis desejadas do ambiente, que são usadas como recursos durante o processo de aprendizado

Continua

Continuação

11	Niels Martin, Benoit Depaire, An Caris (2014)	Descreveram uma estrutura geral de um modelo de BPS. Com base nessas fundações, são identificadas tarefas de modelagem para os principais componentes de um modelo de BPS, além disso, o valor potencial da mineração de processos e o estado da arte na literatura são discutidos
12	Converso Giuseppe, et al. (2014)	Propõem uma metodologia e um modelo de simulação de "Projeto de design ao Risco de Conformidade", a fim de apoiar o modelador a passar de um diagnóstico para uma visão preventiva e de design do assunto da conformidade
13	Vincent Augusto, et al. (2014)	Demonstraram um método baseado em mineração de processos para gerenciamento e aprimoramento de processos de assistência médica, esse método é capaz de descobrir um conhecimento significativo. Com base nos resultados da mineração de processos, é proposto um modelo de simulação de eventos discretos para analisar quantitativamente o centro clínico
14	Piera Centobelli, et al. (2015)	Propõem uma abordagem que visa a impedir a ocorrência de erros e, se necessário, iniciar operações de recuperação. Existe uma crescente necessidade de sistemas que mostrem erros ou desvios o estado desejado do sistema, levando os operadores em direção à execução adequada de tarefas e redução do "risco de conformidade"
15	Arik Senderovich (2015)	O objetivo principal da pesquisa proposta é preencher a lacuna entre mineração de processos operacionais e análise de serviços; concretamente, a pesquisa visa em descobrir modelos de enfileiramento de logs de eventos e aplicá-los a problemas operacionais. O objetivo secundário desta pesquisa é fornecer validade (baseada em banco de dados) para resultados teóricos estabelecidos na Teoria de Filas
16	Paolo Pileggi, Alejandro Rivero-Rodriguez, Ossi Nykänen (2015)	Demonstraram que modelos de processo inteligentes podem ser explorados para analisar a atividade real do sistema a partir de perspectivas de contexto alternativas. Foi explicado como o relacionamento próximo entre os modelos derivados da mineração de processos e a simulação orientada a eventos pode ser explorado para ajudar não apenas a entender melhor o que está acontecendo nesses sistemas, mas também fornece modelos alternativos para as soluções inteligentes que eles suportam, como inferência de contexto
17	Niels Martin, Benoit Depaire, An Caris (2016)	Demonstraram o uso da mineração de processo para apoiar a construção de modelos de simulação de processos de negócios (BPS). Para fornecer uma base sólida para trabalhos futuros, este artigo apresenta uma visão geral estruturada das tarefas de modelagem de BPS e como a mineração de processos pode apoiá-las
18	Niels Martin, Benoit Depaire, An Caris (2016)	Demonstraram processo de modelagem do tempo entre chegadas de entidades, ou seja, o tempo entre a chegada de entidades consecutivas. A modelagem precisa da chegada da entidade é crucial, pois influencia as métricas de desempenho do processo, como o tempo médio de espera. A esse respeito, a análise dos logs de eventos pode ser útil
19	Waleed A., Ahmed Ramy, Amr Arisha (2017)	Apresentaram uma estrutura híbrida de Modelagem e Simulação para enfrentar os desafios dos processos de negócios. A estrutura integrou técnicas de mineração de processos na fase de modelagem conceitual para apoiar o desenvolvimento de modelos de simulação imparciais e reflexos próximos da realidade em tempo hábil

Continua

Conclusão		
N°	Autor (es)	Proposta do trabalho
20	Yan Wang, et al. (2017)	Este artigo apresenta uma ferramenta madura, aplicando o método D2FD (Data to Fuzzy-DEVS model). Essa ferramenta é implementada como um plug-in disponível e dedicado no ProM, kit de ferramentas de mineração de processo de código-fonte aberto
21	Titas Savickas, Olegas Vasilecas (2018)	Propõem uma abordagem sobre como automaticamente é apresentado um modelo dinâmico de simulação de processos de negócios. A abordagem descobre a rede de atividade do processo a partir de um log de eventos e a utiliza para gerar um modelo de simulação automaticamente, esse modelo pode ser posteriormente personalizado para facilitar a análise
22	Yan Wang, et al. (2018)	Propõem um novo método de inferência do sistema, o método estende a técnica de mineração de processos para extrair conhecimento dos dados e representar sistemas complexos. Os aspectos de modularidade, frequência e tempo podem ser extraídos dos dados, eles são integrados juntos para construir o modelo Fuzzy-Discrete Event System Specification (Fuzzy-DEVS)
23	Brian Keith Norambuena (2018)	Apresentam um estudo sobre a aplicação de técnicas de mineração de processos em simulação e a integração entre as duas. Especificamente, mostra uma série de desenvolvimentos no campo que ilustram as possíveis aplicações, além disso, são expostos os principais desafios atuais da integração da mineração de processos e simulação

Quadro 6 - Integração entre process mining e simulação.

Fonte: O autor 2018.

A simulação por computador é uma ferramenta útil e versátil para obter informações sobre o funcionamento dos sistemas. Geralmente, um modelo que representa certas características-chave ou comportamentos do sistema é analisado para mostrar os eventuais efeitos reais de condições alternativas e cursos de ação, a força da simulação é que permite “olhar para o futuro”, sob determinados pressupostos (Rozinat et al., 2009a). Neste contexto a mineração de processos torna-se importante para fornecedor dados que são armazenados em log de eventos, tais dados são registros de situações reais que ocorrem no dia a dia dentro de uma organização.

Maruster e Van Beest (2007 e 2009), conforme Figura 16, propõem uma metodologia que combina a mineração de processos com a simulação, que permite a uma organização redesenhar o processo de negócios e prever o desempenho futuro desse processo com base na simulação. Principalmente apoiado pela simulação CPN,

o método consiste em três fases: variável de desempenho do processo, análise de processo e redesenho de processo.

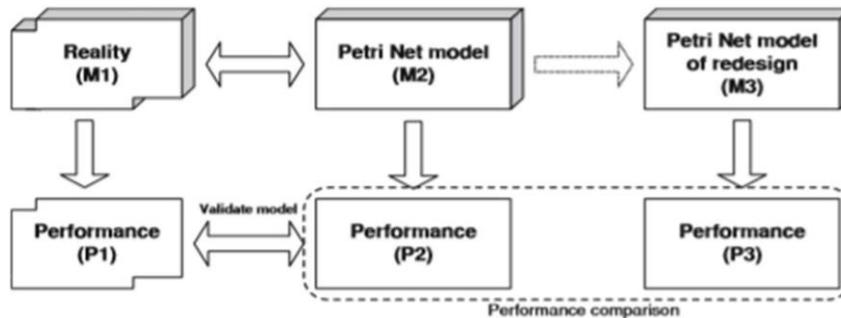


Figura 16 - Abordagem geral da proposta.

Fonte: Maruster e Van Beest (2007, 2009).

Para Maruster e Van Beest (2009), um modelo de processo é estruturado e simulado como uma representação da situação existente, seguido da simulação do modelo de processo redesenhado como previsão do cenário futuro. Finalmente, os critérios de desempenho do modelo de processo de negócios atual e do modelo de processo de negócios redesenhado são comparados, de modo que os ganhos de desempenho potenciais do redesenho podem ser previstos (MARUSTER e VAN BEEST, 2009).

Rozinat et al. (2008 e 2009b) apresentaram um sistema de simulação de apoio à decisão no contexto do gerenciamento do fluxo de trabalho. Para fazer isso, foi explorado não apenas o design do fluxo de trabalho, mas também registros descrevendo o comportamento histórico observado do sistema e as informações extraídas sobre o estado atual do fluxo de trabalho. O uso de dados reais que capturam o estado atual e informações históricas permite que as simulações possam prever os próximos comportamentos para diferentes situações. A abordagem é apoiada por um conjunto prático de ferramentas que combina o sistema de gerenciamento de fluxo de trabalho YAWL e a estrutura de mineração de processo ProM.

Com base nesta abordagem, o projeto do sistema da Figura 17 permite diferentes experiências de simulação a ser conduzida. Para esta situação os processos simulados e do mundo real devem se sobrepor o máximo possível, ou seja, os dois processos "nuvens", coincidem. Para a situação "futura", as diferenças observadas entre os processos simulados e do mundo real podem ser exploradas e

quantificadas. Nesta implementação, procurou-se garantir que os logs de simulação tenham o mesmo formato dos logs de eventos registrados pelo sistema de fluxo de trabalho, desta forma, é possível usar as mesmas ferramentas para analisar processos simulados e reais (ROZINAT et al., 2008 e 2009b).

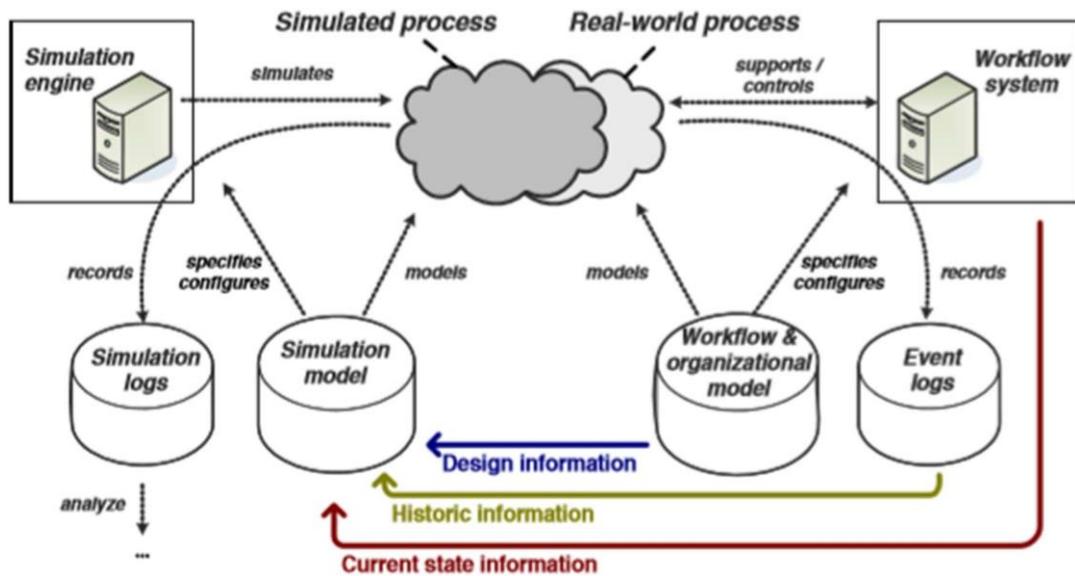


Figura 17 - Visão geral do sistema integrado de fluxo de trabalho e simulação.

Fonte: Rozinat (2008 e 2009b).

Rozinat et al. (2009a) propuseram usar técnicas de mineração de processo para descobrir semi-automaticamente um modelo de simulação com base nas informações de um log de eventos. Este modelo de simulação é representado como uma rede PETRI colorida (CPN) e pode ser usado para analisar o processo. Desta forma chegou-se muito mais rápido a um primeiro modelo de simulação que posteriormente seria avaliado e possivelmente modificado, do que uma abordagem tradicional, além disso, é provável que represente melhor a realidade, pois esta é baseada em informações objetivas. Os autores comentam ainda que um bom conhecimento do processo operacional observado é inevitável para tirar conclusões de uma execução de simulação e, portanto, esse modelo gerado não torna os conhecimentos de domínio e de modelagem obsoletos.

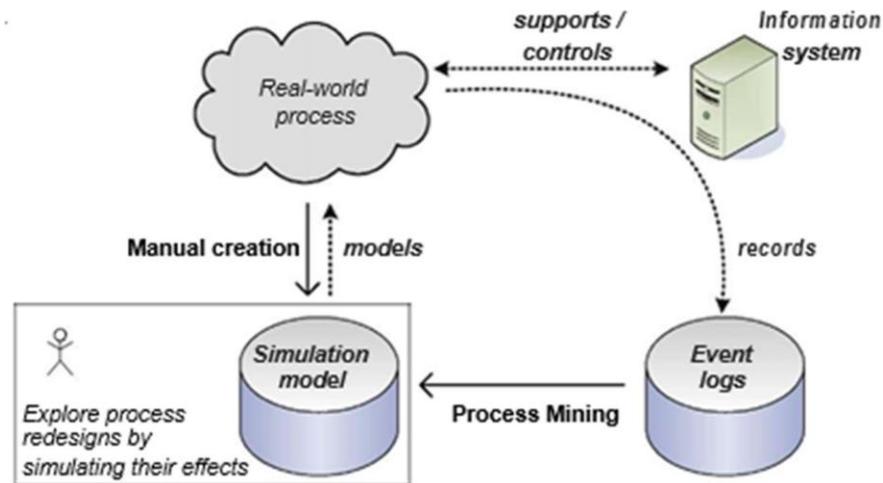


Figura 18 - Descoberta de modelos de simulação usando técnicas de mineração de processo.

Fonte: Rozinat et al (2009a).

A aplicabilidade da abordagem apresentada depende diretamente da disponibilidade de logs adequados, felizmente, pode-se observar que mais e mais eventos estão sendo registrados em uma grande variedade de sistemas. É importante fornecer informações bem detalhadas sobre as atividades que foram executadas. Além disso, também pode-se encontrar logs em situações onde o sistema de informação não é diretamente perceptível (ROZINAT et al., 2009a).

VAN DER AALST (2010), destaca alguns dos problemas que causam a adoção limitada de simulação, por exemplo, modelos de simulação tendem a simplificar a modelagem de pessoas que trabalham em tempo parcial em um processo. Também estudos de simulação geralmente se concentram no comportamento de estado estável de processos de negócios enquanto os gestores estão mais interessados em resultados de curto prazo (um “botão de avanço rápido” para o futuro) para a tomada de decisão operacional.

Liu et al. (2012) propuseram uma abordagem de simulação de fluxo de trabalho com base em gráficos de eventos para suporte a decisão operacional que são construídos a partir de arquivos de registro por meio da mineração de processos, conforme Figura 19. Os resultados de análises das simulações permitem que as empresas tomem decisões operacionais, que são críticas para gerenciamento e melhoria de processos de negócios.

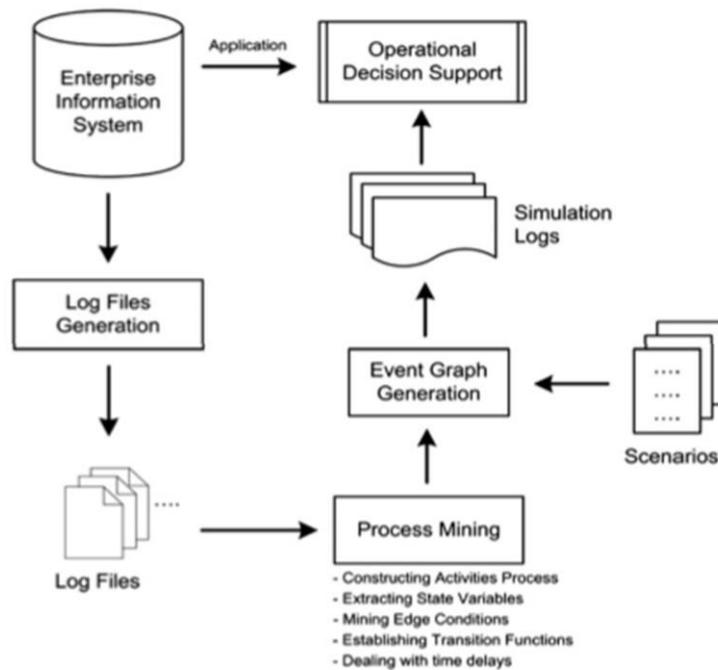


Figura 19 - A abordagem de simulação de fluxo de trabalho baseada em gráficos de eventos.

Fonte: Liu et al (2012).

Liu et al. (2012) veem o processo de negócios como uma combinação de diferentes atividades com estruturação que descreve a ordem e a dependência de redes, e procuram modelar um processo construindo um gráfico de eventos onde o próprio gráfico é descoberto por meio da mineração de processos. O gráfico do evento formado ajuda a simular o processo em diferentes cenários para o suporte à decisão operacional, além do aspecto do controle os gráficos de eventos combinam outras informações da empresa, como aspecto de dados e aspecto de recursos.

Ainda no estudo de Liu et al. (2012) foi utilizado o modelo de fluxo de trabalho YAWL, conforme Figura 20, no qual foi possível gerar logs de eventos seguindo as seguintes etapas:

- 1) importar o fluxo de trabalho e o modelo organizacional e o log de eventos do YAWL e analisá-los no ProM3;
- 2) integrar informações relevantes para a simulação do modelo organizacional e análise de logs no modelo YAWL via ProM;
- 3) converter o modelo YAWL em um modelo de rede de Petri via ProM;
- 4) exportar o modelo integrado e convertido como um modelo de Rede de Petri Colorida via ProM;

5) simular os arquivos CPN; 6) agregar os arquivos de log MXML parciais ao log MXML final.

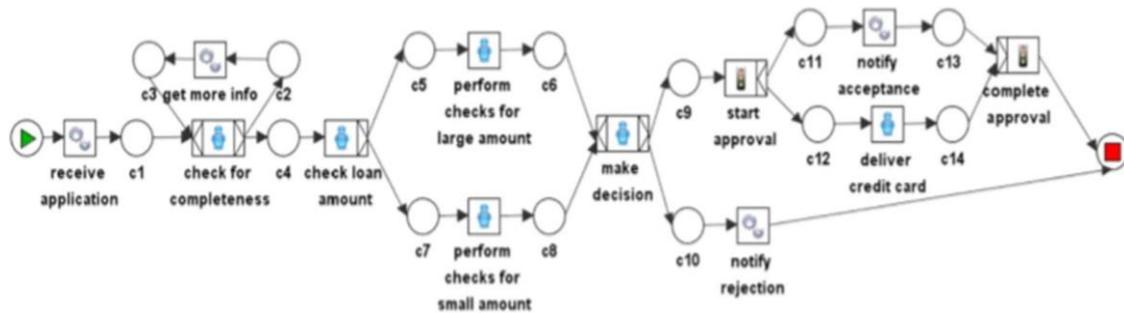


Figura 20 - Processo modelado em YAWL.

Fonte: Liu et al. (2012).

Aguirre, Parra e Alvarado (2013), propõem uma abordagem, a ser vista na Figura 21, que se concentra em complementar a metodologia proposta por Maruster (2009), enfatizando a fase de compreensão do projeto, caracterizada pela análise do escopo do processo, análise de metas de redesenho do processo e análise de lacunas de desempenho. Basicamente apresenta uma metodologia para o processo de redesenho que combina técnicas de simulação, mineração de dados e ferramentas de mineração de processos.

Incluindo ferramentas de mineração e simulação de processos, Aguirre, Parra e Alvarado (2013) para o desenvolvimento da metodologia atual os autores levaram em consideração tanto o método de Harmon e Davenport (2010) quanto a abordagem de Maruster e Van Beest (2009). Compreende as seguintes fases:

Fase I: Entendimento do projeto;

Fase II: Análise do Processo Empresarial;

Fase III: Redesenho do Processo Empresarial (TO-BE);

Fase IV: Implementação.

Um projeto de redesenho de processos exige mais do que uma única ferramenta para alcançar os resultados esperados. Embora a mineração de processos forneça ferramentas para o diagnóstico e análise de processos, ela deve ser

complementada com outras metodologias e técnicas como a simulação e outras ferramentas de melhoria de processos que permitem compreender e planejar o esforço de redesenho do processo (AGUIRRE, PARRA E ALVARADO, 2013).

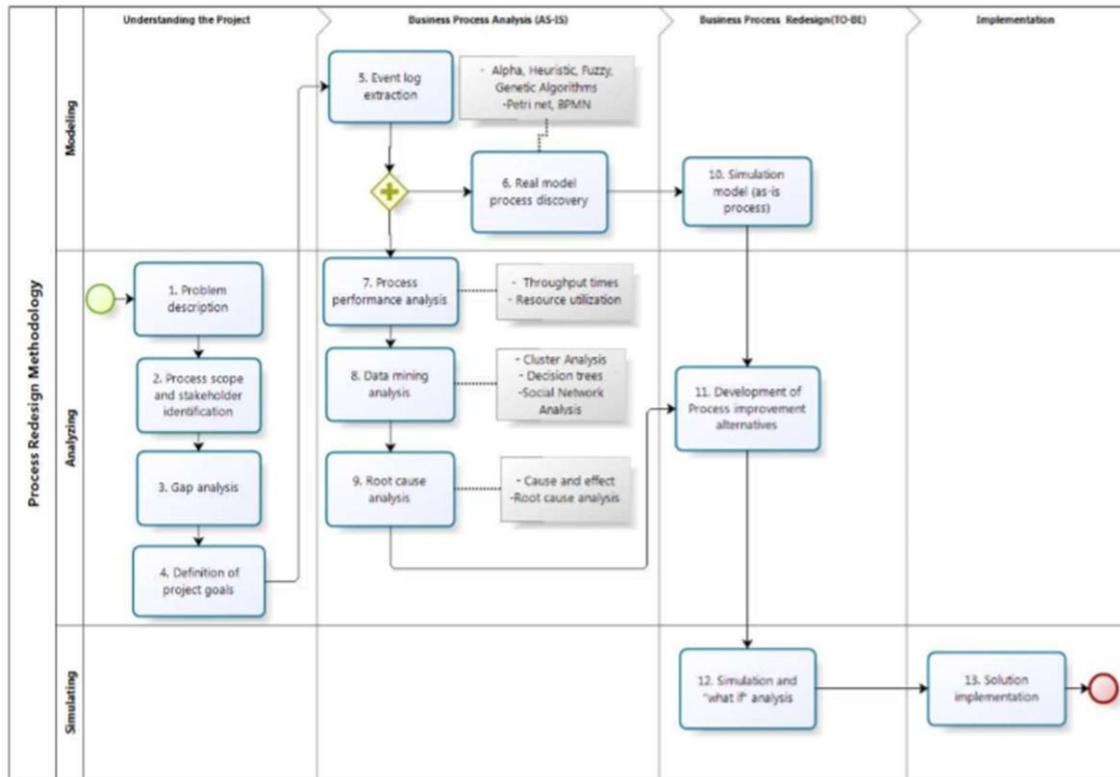


Figura 21 - Metodologia proposta com fases, atividades e ferramentas.

Fonte: Aguirre, Parra e Alvarado (2013).

Szimanski, et al. (2013) descrevem uma abordagem iterativa para a melhoria dos modelos de processos de negócios com base em mineração processo e simulação. A necessidade desta abordagem é justificada pelo fato de que existe uma diferença entre o alto nível de abstração em que os processos são geralmente modelados e a natureza de baixo nível de eventos que são gerados durante a execução. A técnica de mineração de processo usada neste trabalho é capaz de capturar essa relação na forma de um modelo hierárquico Markov e uma plataforma de simulação é utilizada como um meio para gerar o comportamento de baixo nível para novas versões do processo.

Khodyrev e Popova (2014), apresentam uma abordagem para modelagem de processos de negócios para previsão de curto prazo, com base em registros de

eventos e valores de variáveis de ambiente. O modelo de processo pronto para simulação é construído semi-automaticamente, o especialista apenas insere as variáveis de ambiente desejadas, que são usadas como recursos durante o processo de aprendizagem. O fluxo de trabalho do processo é extraído como um modelo da rede Petri usando uma combinação de algoritmos de mineração de processos, dependências entre recursos e variáveis de processo são formalizadas usando técnicas de árvores de decisão e regressão.

A abordagem proposta baseia-se na simulação de modelos de processo, construídos a partir dos dados, que foram gerados pelo sistema de informação. Além disso, informações sobre ambiente, devem ser configuradas por um especialista. Ele deve incluir um conjunto de variáveis com forma unificada para obter seus valores para uma determinada data (DYREV e POPOVA, 2014).

Com base em informações de registros de eventos e fontes externas, um modelo complexo é construído, permitindo que as experiências de simulação sejam executadas. O resultado de experimentos é uma predição de valores para uma ou mais variáveis, relacionadas ao processo simulado. (KHODYREV e POPOVA, 2014). Os estágios desta abordagem estão descritos no Quadro 7.

Estágio	Descrição
Filtragem de log de eventos e extração de modelo de processo	Filtragem de log de eventos usando a abordagem baseada em frequência. Todas as instâncias do processo são classificadas como ativas, não ativas e concluídas. O modelo de workflow na notação de Petri Net é extraído usando algoritmo combinado.
Criação de modelo de ambiente	Os principais recursos ambientais são selecionados por um especialista. Recursos de contexto local são encontrados se estiver presente no arquivo de log. O conjunto de recursos é formado e o modelo de ambiente é criado.
Enriquecimento do Modelo de Processo	Modelos matemáticos com elementos de processo são construídos usando conjunto universal de recursos e registro de informações. Os elementos do processo são: tempo de execução do evento, probabilidade de decisão em uma situação de escolha, tempo até a próxima inicialização da instância do processo.
Integração de modelos	Integração do modelo de fluxo de trabalho com o modelo de ambiente em um modelo de processo de negócios pronto para simulação.
Experimento de simulação	Experimentos de simulação com o número apropriado de sub-execuções para estimar valores médios de variáveis previstas.

Quadro 7 - Etapas da abordagem de previsão.

Fonte: Khodyrev e Popova (2014).

Centobelli et al, (2015) desenvolveram uma metodologia e um modelo de simulação para apoiar os tomadores de decisão na modelagem dos processos de negócios. A ferramenta de simulação foi desenvolvida usando uma combinação do sistema de inferência Fuzzy Matlab® e do software Powersim Studio para modelar a relação entre os parâmetros característicos do sistema de design simulado.

A ferramenta de simulação proposta permite aos usuários avaliar a inclusão de "padrões de conformidade" no processo de planejamento, sob certas condições de custos operacionais e tempos de processo, simulando a influência da ação humana na execução do processo projetado. O modelo de simulação mede os desvios no processo entre as versões mapeadas e implementadas, uma das análises fundamentais a serem executadas durante a execução do processo. Nesse sentido o processo de mapeamento é usado como uma ferramenta para evitar derrapagens em execução, permitindo o projeto de soluções apropriadas para esse fenômeno durante as fases iniciais de análise e mineração (CENTOBELLI et al, 2015).

Norambuena (2018), apresenta um estudo para mostrar a importância e a utilidade prática da aplicação de abordagens de mineração de processo na simulação, procura abordar os principais aspectos necessários para entender a importância da mineração de processos e sua integração com a simulação de processos. Além disso, os diferentes desafios e problemas enfrentados pela mineração de processos são identificados podem ser vistos nos Quadros 8 e 9.

Problema	Descrição
Conhecimento do processo	Sistemas de informação podem ser diagnósticos para processos de negócios. Isso significa que as ações executadas nos sistemas são mantidas em algum registro, mas os sistemas não sabem a que processo essas atividades correspondem. No caso de sistemas agnósticos de processo, seus registros podem não ter dados suficientes para aplicar algoritmos de mineração de processo
Dados não estruturados	A mineração de processo depende fortemente da qualidade dos dados coletados e armazenados. Grandes quantidades de dados devem ser filtradas com frequência devido a instâncias de processo incompletas. A eficácia e eficiência da mineração de processos podem ser substancialmente beneficiadas por conjuntos de dados bem estruturados e bem definidos, além de guias de coleta que permitem a obtenção de conjuntos de dados de alta qualidade
Dados ruidosos	Outro problema nos conjuntos de dados é o ruído. Isso às vezes pode surgir devido a processos inesperados (atividades que não devem ocorrer ou ocorrer em posições incorretas)

Continua

		Conclusão
Problema	Descrição	
Nível de abstração	Devido às características dos dados ou dos sistemas de informações de origem, em alguns casos a quantidade de detalhes é excessiva e a complexidade do modelo resultante torna isso impraticável. O oposto também é válido, no sentido de que pode não haver dados suficientes para fornecer um modelo detalhado. Em geral, todo bom modelo deve manter um equilíbrio entre a precisão e a representação da realidade e a complexidade computacional.	

Quadro 8 - Desafios da mineração de processos em uma perspectiva organizacional.

Fonte: Van der Aalst, 2011; Bose, Mans, Van der Aalst, 2013; Burattin, 2015.

Como a mineração de processos é um campo relativamente novo em comparação com as disciplinas que a formam, seu potencial de crescimento é bastante alto, tanto em termos teóricos quanto práticos e, como tal, espera-se que melhores ferramentas e capacidades de integração sejam desenvolvidas nos próximos anos. Os desafios que devem ser enfrentados no campo da mineração de processo também são descritos. Um dos principais desafios é a disponibilidade de dados adequados fornecidos por sistemas de informação conscientes dos processos de negócios (NORAMBUENA, 2018).

Problema	Descrição
Avaliação de resultados	A avaliação do processo obtido com o auxílio de técnicas de mineração de processo é um desafio, porque é necessário definir um procedimento padrão e rigoroso para avaliar sua qualidade
Otimização	Outro desafio para a implementação de técnicas de mineração de processo é que os algoritmos devem ser devidamente parametrizados. A busca de parametrização ótima pode ser uma tarefa complexa devido ao número de parâmetros disponíveis
Uso	Na literatura correspondente, a integração com outras metodologias e técnicas analíticas ainda é uma questão em aberto

Quadro 9 - Desafios da mineração de processos sob uma perspectiva metodológica.

Fonte: Van der Aalst, 2011; Aguirre, Parra, Alvarado, 2013; Burattin, 2015.

Embora tenha havido vários desenvolvimentos na integração de processos de mineração e simulação, existem várias questões existentes que devem ser abordadas antes que uma adoção generalizada dessas técnicas possa ser vista nas indústrias. O primeiro e principal desafio é, obviamente, a falta de compatibilidade entre as diferentes ferramentas usadas para mineração de processo e outros campos. No

entanto, existem outros desafios gerais enfrentados pela mineração de processos (VAN DER AALST, 2011; AGUIRRE, PARRA, ALVARADO, 2013; BOSE, MANS, VAN DER AALST, 2013; BURATTIN, 2015; NORAMBUENA, 2018).

2.4 ENQUADRAMENTO DOS TRABALHOS PUBLICADOS

Esta seção apresenta a análise dos artigos selecionados e descritos na seção 2.3 seguindo o procedimento de pesquisa estabelecido neste trabalho. De acordo com objetivos deste estudo, procurou-se identificar em quais áreas da MI estão direcionados os trabalhos pesquisados, permitindo assim uma visualização de uma “lacuna” não explorada ou que apresente pouca clareza quanto sua importância neste contexto.

Para estabelecer as áreas da manutenção a serem enquadrados os trabalhos pesquisados, utilizou-se um estudo realizado por Ruschel, Santos e Loures (2017), no qual foi feita uma revisão sistemática da literatura, onde os artigos selecionados são submetidos a uma avaliação de conteúdo e agrupados de acordo com as áreas de aplicação. Ao final da análise, o trabalho resultou em 15 áreas de aplicação que são tomadas as decisões relacionadas a MI no qual as pesquisas estavam concentradas, as quais estão apresentadas e descritas no Quadro 10.

Área de Aplicação	Sigla	Descrição
Gerenciamento da manutenção	GM	Artigos que destacam a importância de revisar continuamente as políticas adotadas e os modelos de tomada de decisão utilizados para a seleção dessas políticas e o planejamento subsequente
Planejamento da manutenção	PM	Essa área delimita os limites entre a seleção de políticas de manutenção e o gerenciamento subsequente. Inclui modelos que permitem definir as ações de manutenção com base nas políticas adotadas e as informações relacionadas aos impactos e riscos envolvidos, por exemplo, por meio de métodos de simulação
Seleção de políticas de manutenção	SPM	Esta área inclui trabalhos que apresentam modelos e métodos para avaliar a melhor política a ser adotada com base em sua viabilidade, nível de maturidade organizacional e possibilidade de redução adicional de custos
Análise da eficiência da manutenção	AEM	Os métodos e modelos dessa área fornecem informações qualitativas e quantitativas usando, por exemplo, indicadores de desempenho
Gestão do ciclo de vida dos equipamentos	GCV	Os trabalhos nessa área apresentam modelos que se preocupam em avaliar decisões entre reparos e trocas de equipamentos, além de fornecer informações que permitem a definição dos melhores métodos e ferramentas de prognóstico

Continua

Conclusão

Área de Aplicação	Sigla	Descrição
Análise do monitoramento dos processos	AMP	Os trabalhos nesta área utilizam essencialmente informações relacionadas às áreas de Gerenciamento do Ciclo de Vida do Equipamento e Prognóstico da Saúde da Máquina, garantindo que as melhores técnicas sejam aplicadas ao monitoramento
Prognóstico da saúde da máquina	PSM	Os métodos presentes em artigos desta área fornecem estimativas relacionadas à frequência de falhas. Modelos preditivos e probabilísticos, além da análise de dados históricos, são comumente usados para fornecer o suporte necessário para os programas
Análise da confiabilidade	AC	Estritamente relacionada à área de Prognóstico de Saúde da Máquina. Os métodos presentes nos trabalhos desta área utilizam informações das condições do equipamento, permitindo, com o auxílio de ferramentas probabilísticas, a modelagem e balanceamento entre os objetivos de custos e confiabilidade
Degradação de sistemas e componentes	DSC	Os documentos presentes nesta área utilizam as taxas de degradação para minimizar os custos de longo prazo, além de permitir o agendamento e a antecipação de ações de manutenção preventiva
Otimização conjunta	OJ	Esta área corresponde aos papéis que apresentam modelos preocupados em otimizar os resultados de manutenção, considerando os objetivos do sistema de produção
Integração de sistemas de múltiplos níveis	IMN	Documentos que apresentam modelos de tomada de decisões em vários níveis compõem essa área. Eles consideram o número de componentes do sistema, identificando grupos distintos para ações de manutenção
Otimização de sistemas Multi-Estado	OME	Esta área cobre alguns métodos e modelos aplicados a sistemas que permitem a identificação de estágios intermediários de sua condição, para que tais modelos possam ser usados
Análise de risco e consequência	ARC	Os documentos nessa área apresentam modelos de tomada de decisão que envolvem principalmente preferências agregadas de tomadores de decisões com questões financeiras. Os modelos utilizados também fornecem uma classificação dos componentes críticos do sistema, para os quais mais atenção deve ser direcionada
Estimativa dos custos de manutenção	ECM	Embora um número considerável de modelos lide com questões de custo, os trabalhos selecionados para esta área apresentam modelos que permitem, além da redução comumente utilizada, estimar e calcular os custos de manutenção para diferentes situações
Inspeções e intervalos de manutenção	IIM	Esta área corresponde aos trabalhos que apresentam métodos e modelos para auxiliar no cálculo e definição dos melhores intervalos entre as inspeções de manutenção, conforme diversos objetivos, há também uma inclinação considerável para questões relacionadas à redução de custos

Quadro 10 - Áreas de aplicação na MI.

Fonte: Adaptado de Ruschel, Santos e Loures (2017).

Após utilizar como base as áreas de aplicação relacionadas as decisões de manutenção de Ruschel, Santos e Loures (2017), foi possível verificar em qual destas áreas os artigos pesquisados estariam enquadrados. O Quadro 11 mostra os 44 trabalhos relacionados a MI e simulação listados no Quadro 3 e que estão de acordo com a descrição do Quadro 10.

Para cada artigo foi verificado quais áreas de aplicação o mesmo estaria relacionado, permitindo desta maneira uma análise visual mais clara e objetiva. As

marcações com círculo “O” mostram que o objetivo do artigo está diretamente relacionado com a área de aplicação e o (s) “X” marcado (s) na cor preta indica (m) que o trabalho publicado tem algum tipo de relação ou tratam de maneira indireta a área de aplicação na MI.

Optou-se em mostrar desta maneira porque as áreas de aplicação relacionadas as decisões de manutenção de Ruschel, Santos e Loures (2017), por apresentam uma classificação mais robusta, algumas delas são muito similares, o que de fato pode gerar interpretações divergentes.

De acordo com os dados do Quadro 11 é possível verificar uma grande concentração de trabalhos preocupados em selecionar uma política de manutenção, confiabilidade dos equipamentos e também com um controle preditivo por meio do monitoramento do desgaste de sistemas e componentes. Tal constatação reflete uma preocupação das empresas em ter um procedimento de manutenção definido e estar em constante monitoramento de seus equipamentos para evitar falhas inesperadas, que possivelmente refletiria em parada no processo produtivo.

Artigos M/S	GM	PM	SPM	AEM	GCV	AMP	PSM	AC	DSC	OJ	IMN	OME	ARC	ECM	IIM
1						x	x	O							
2						x	x		O			x			
3						x	x	O				x			
4		x	O			x								x	
5		x			x			O	x						x
6			x						O	x					
7			O			x	x	x	x				x		x
8		x	O			x			x			x			
9		x			x	O	x				x				
10							x	x	O						
11						x	x	O	x						
12			O											x	
13	x									x	O				
14	x									x	O				
15			x							O		x			
16	x		O					x			x				
17						x	x	O	x				x		
18												O			
19							O	x	x						
20			O					x							

Continua

Conclusão

Artigos M/S	GM	PM	SPM	AEM	GCV	AMP	PSM	AC	DSC	OJ	IMN	OME	ARC	ECM	IIM
21			O							x					x
22										O					
23	x											O			
24			x					x				O			
25		O	x				x								
26							x	x							O
27		O	x						x						
28	x	O													x
29		O		x					x						
30			O					x						x	
31								x	O						
32	x	O													
33			x			x		O							
34			O		x			x							
35			x					x		O					
36								O	x						x
37			x				x		x	O					x
38		x										O			
39		O	x												x
40			O				x	x				x			
41			x									O			x
42			x						x	O					
43			x				x		x			O			x
44					x			O	x						x

Quadro 11 – Artigos MI “AND” Simulação por área de aplicação.**Fonte: O autor 2018.**

O Gráfico 1 ilustra as de maneira quantitativa os dados do Quadro 11, no qual fica claro as informações comentadas no parágrafo anterior, tanto no Gráfico 1 quanto no Quadro 11 é possível verificar que a uma área de aplicação que se destaca por haver apenas um trabalho relacionado de maneira indireta.

Além da questão envolvendo indicadores de desempenho, observa-se que a análise de risco e estimativa de custos de manutenção apresentam poucos estudos no contexto estudado, pois apresentam apenas 2 e 3 constatações respectivamente.

Estas três áreas de aplicação com pouca representatividade constatas no Quadro 11 e no Gráfico 1 representam uma oportunidade de estudo já que as questões que envolvem risco e custos estão relacionadas com indicadores de desempenho. Abre-se uma janela que apresenta como ponto principal melhorar a

eficiência da manutenção com a utilização tanto de parâmetros técnicos como de econômicos e organizacionais.

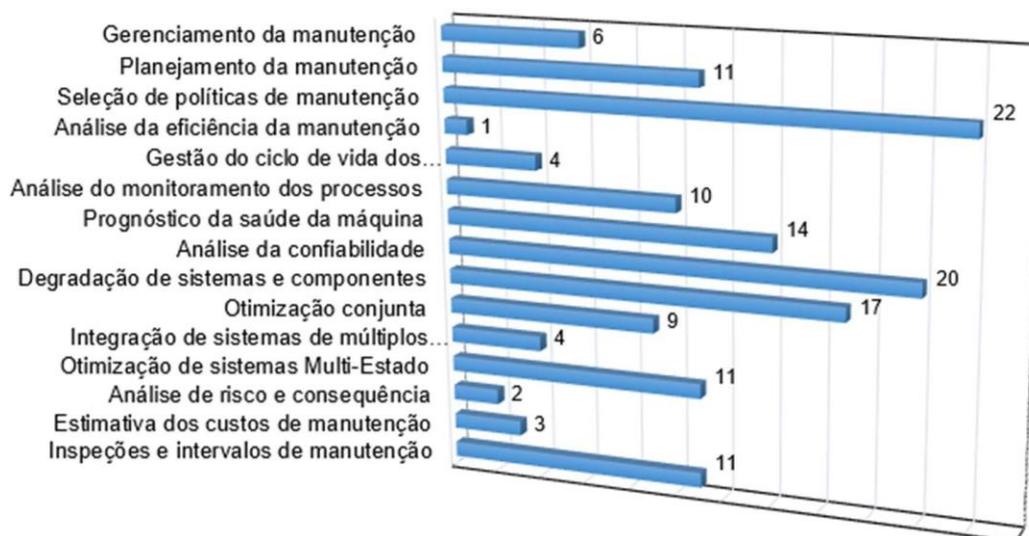


Gráfico 1 – Artigos MI “AND” Simulação por área de aplicação.

Fonte: O autor 2018.

O mesmo processo foi feito para os artigos relacionados a manutenção e mineração de processos, o Quadro 12 apresenta a relação de trabalhos e sua relação com as áreas de tomadas de decisões na manutenção de Ruschel, Santos e Loures (2017). A relação de artigos segue a sequência descrita no Quadro 4 sendo que cada artigo pode ter relação com uma ou mais áreas mencionadas.

Artigos M/PM	GM	PM	SPM	AEM	GCV	AMP	PSM	AC	DSC	OJ	IMN	OME	ARC	ECM	IIM
1					x		x	O	x						
2						O	x	x	x						
3	O									x		x			
4					x		x		x						O
5			x					O							
6	O										x	x			
7					O			x							x
8	O	x								x					
9		x			O	x									x

Quadro 12 – Artigos MI “AND” Mineração de Processos por área de aplicação.

Fonte: O autor 2018.

De acordo com os dados do Quadro 12 foi possível verificar que os trabalhos que utilizam a mineração de processos como ferramenta de análise não estão direcionados a melhoria nos índices de desempenho, ou seja, da eficiência no contexto da MI. Percebe-se que a área relacionada a eficiência na manutenção não é mencionada nos trabalhos pesquisados e as áreas mais visíveis seguem praticamente o mesmo raciocínio nos estudos presentes no escopo MI e simulação.



Gráfico 2 – Quantidade de Artigos “manutenção” AND “process mining” por área de aplicação.

Fonte: O autor 2018.

O Gráfico 2 apresenta uma síntese do Quadro 12, no qual é possível verificar que não há qualquer citação a área relacionada a análise da eficiência na manutenção. É possível também constatar que as áreas de estimativa de custos e análise de risco não são mencionadas, vale ressaltar que estas duas últimas áreas comentadas são fundamentais para a verificação ou medição do desempenho da MI.

Todas estas evidências deixam claro a necessidade de direcionar esforços para a melhoria da eficiência na MI, a qual de acordo com Ruschel, Santos e Loures (20147) pode ser representada por métodos ou modelos que possam fornecer informações qualitativas e quantitativas usando, por exemplo, indicadores de desempenho. Essas informações podem ser usadas diretamente no planejamento e gerenciamento de manutenção, dessa maneira, no contexto estudado, os indicadores de performance da manutenção (Maintenance Performance Indicator – MPI) serão utilizados para avaliar o desempenho da manutenção realizada, sendo que a escolha dos MPI's depende da maneira do conhecimento tácito dos responsáveis pela manutenção.

Portanto este trabalho buscará apresentar em sua proposta de pesquisa, a utilização de indicadores de desempenho no ambiente de MI. Contudo apenas isto não é suficiente, conforme foi visto na Figura 5 a mineração de processos e simulação são técnicas que também serão utilizadas para se chegar ao resultado esperado, portanto são elementos que também fazem parte do escopo da pesquisa e devem ser explorados.

Para se trabalhar com simulação computacional e mineração de processos em conjunto é preciso utilizar ferramentas que tenham a capacidade de se comunicar, portanto a simulação precisa gerar informações que sejam possíveis de ser importadas pela mineração de processos. Para atender a esta necessidade, foi verificado na literatura quais ferramentas e softwares foram utilizados até o momento para gerar e extrair as informações e que atendam o objetivo deste trabalho.

Para a revisão da literatura com as palavras chave “simulação” e “mineração de processos”, a intenção foi verificar quais ferramentas já foram utilizadas em conjunto, mesmo que seja em outras áreas, e analisar se podem ser utilizadas no contexto da MI. A pesquisa literária apresentou diversas ferramentas utilizando estes dois elementos em conjunto, sendo bastante difundido para a simulação de processos de negócios.

Para a simulação, as redes de Petri coloridas (redes de Petri + linguagem de programação) foi a técnica mais utilizada, sendo que para sua aplicação a ferramenta CPN Tools foi a mais explorada. Para a mineração de processos, as ferramentas ProM e Disco@ foram as mais utilizadas, sendo que o ProM considerado uma ferramenta mais robusta com diversos plugins tanto para extração quanto análise dos dados.

2.5 ESCOPO DA PESQUISA

Após a verificação dos trabalhos pesquisados referentes as áreas de pesquisa: MI e Simulação e MI e Mineração de Processos, percebeu-se que algumas áreas de aplicação das decisões de manutenção de Ruschel, Santos e Loures (2017), não apresentam relações com as áreas de pesquisa citadas neste parágrafo. Isto indica que dentro do contexto da MI, existem algumas áreas que não estão sendo exploradas quando se aplica ferramentas de simulação ou mineração de processos.

Esta questão pode ser vista na Figura 22 o qual mostra uma janela pesquisa contemplando as três áreas de aplicação não estudadas em um ambiente de MI com a utilização da simulação auxiliada pela mineração de processos.

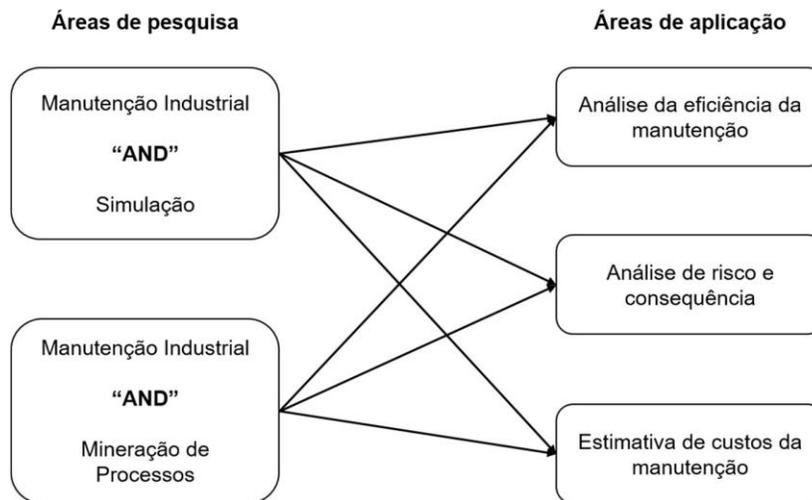


Figura 22 – Áreas de aplicação de decisões na manutenção com pouca ou nenhuma citação.

Fonte: O autor 2018.

Após a identificação de uma lacuna de pesquisa, torna-se necessário explicar como as três áreas de aplicação, conforme Figura 23, podem ser utilizadas na MI, neste caso é importante verificar se possuem alguma afinidade ou podem ser trabalhadas em conjunto. A primeira área de aplicação a ser analisada foi “análise da eficiência da manutenção” pois o termo “eficiência” pode ser considerado mais abrangente e automaticamente estar incorporando outras áreas da manutenção.

De acordo com as áreas de aplicação das decisões de manutenção de Ruschel, Santos e Loures (2017), a “análise da eficiência da manutenção” pode estar relacionada com a utilização de indicadores de desempenho. Torna-se necessário neste caso trabalhar com uma base de informações consistentes e que sejam aplicadas por empresas a nível mundial.

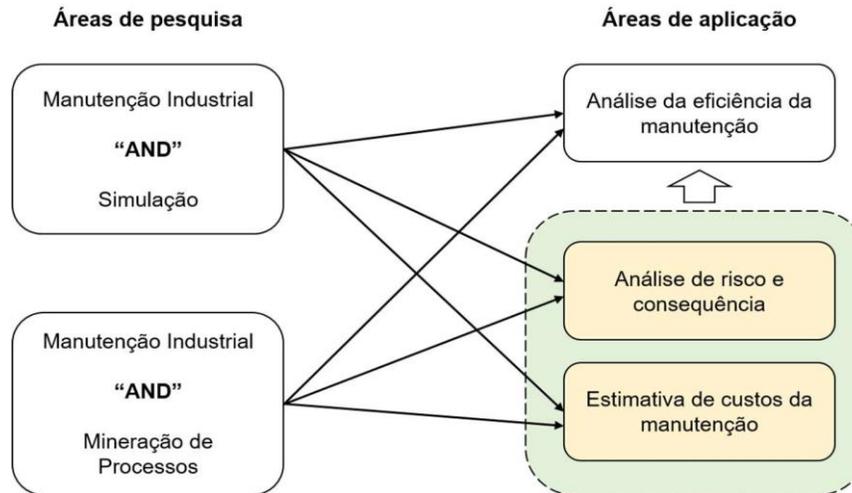


Figura 23 – Ajuste do foco da pesquisa para a eficiência da manutenção.

Fonte: O autor 2018.

Para este caso pensou-se em utilizar a Norma Europeia (EN 15341: 2007), Anexo 1, a qual foi lançada em 2007 e fornece os principais indicadores de desempenho de manutenção para apoiar o gerenciamento na obtenção de excelência em manutenção e utilizar os ativos técnicos de maneira competitiva. Trata-se de um padrão internacional utilizado por empresas europeias altamente competitivas, fornecendo assim uma base sólida de conhecimento e conseqüentemente um nível maior de confiança nos resultados deste trabalho.

A maioria destes indicadores aplicam-se a todas as instalações industriais e de apoio e devem ser usados para medir o status, comparar (benchmarks internos e externos), diagnosticar (análise de pontos fortes e fracos), identificar objetivos e definir metas a serem atingidas, planejar ações de melhoria e medir continuamente as mudanças ao longo do tempo.

O grupo “indicadores econômicos” descrito na Norma Europeia (EN 15341: 2007), é composto por 24 indicadores e abordam as questões relacionadas aos aspectos financeiros e custos, esta é uma informação importante pois pode-se relacionar este grupo de indicadores às áreas de aplicação “estimativa de custos” e “análise de risco”, vistos na Figura 23. Neste caso não é necessário abordar separadamente cada área de aplicação, já que as mesmas estão inseridas no contexto da análise da eficiência da manutenção com a aplicação de indicadores de desempenho.

Neste caso há um ajuste do foco da pesquisa no qual se tem uma visão mais específica da proposta a ser desenvolvida. Conforme visto na Figura 23, o objetivo é trabalhar na eficiência da manutenção com a utilização da simulação computacional sendo auxiliada pela mineração de processos.

2.5.1 Análise da eficiência da manutenção

O foco desta pesquisa é trabalhar com a eficiência da manutenção, a qual de acordo com Ruschel, Santos e Loures (2017), pode ser representada por métodos ou modelos que possam fornecer informações qualitativas e quantitativas usando, por exemplo, indicadores de desempenho. Essas informações podem ser usadas diretamente no planejamento e gerenciamento de manutenção.

Dessa maneira, no contexto estudado, os indicadores de performance da manutenção (Maintenance Performance Indicator – MPI) são utilizados para avaliar o desempenho da manutenção realizada, sendo que a escolha dos MPI's depende da maneira na qual o sistema foi construído (PARIDA e KUMAR, 2006). Portanto, pode-se inferir que indicadores são medidas ou conjunto de dados numéricos sobre processos que se desejam controlar e melhorar (KUMAR et al., 2013).

Medir a eficiência da manutenção dos equipamentos, permite aos gerentes de manutenção avaliar o sucesso dos seus planos, o desempenho dos seus funcionários e a utilização de recursos, para tanto torna-se interessante utilizar indicadores para que seja possível realizar avaliações periódicas possibilitando tomadas de decisões mais acertadas na manutenção. A medição do desempenho de manutenção (MPM) é uma parte dos processos de gerenciamento de manutenção e uma ferramenta de gerenciamento para a viabilidade econômica de longo prazo da organização. Indicadores de desempenho bem definidos podem potencialmente apoiar a identificação de lacunas de desempenho, entre o desempenho atual e o desejado, e podem indicar o progresso para o fechamento das lacunas (ASSAF et al., 2015; STEFANOVIC et al., 2017, MUCHIRI et al, 2011).

Algumas abordagens de medição do desempenho de manutenção têm sido propostas na literatura. Tsang (1998) propõe uma abordagem estratégica de gerenciamento de desempenho de manutenção pelo uso do balanced scorecard proposto por Kaplan e Norton, 1992 e Kaplan e Norton, 1996. O sucesso da abordagem do balanced scorecard depende do fato de que a estratégia tem um efeito

forte e positivo no desempenho de uma empresa. Dwight (1999) propôs o uso de uma abordagem de auditoria de sistema na medição do desempenho da contribuição do sistema de manutenção para o sucesso organizacional. Chamada medição de desempenho baseada em valor, leva em consideração o impacto das atividades de manutenção no valor futuro da organização.

Alguns autores defendem o uso de medidas agregadas, como o índice de produtividade de manutenção, que mede a proporção entre a produção de manutenção e a entrada de manutenção. A principal falha desta abordagem é que ela fornece uma visão muito limitada do desempenho de manutenção e o desafio óbvio de quantificar diferentes tipos de entradas de manutenção (LOFSTEN, 2002).

Weber e Thomas (2006) desenvolveram uma estrutura para definir o principal indicador de desempenho para gerenciar a função de manutenção com base nos requisitos de gerenciamento de ativos físicos e no processo de confiabilidade de ativos. A estrutura consiste em planejamento de manutenção, melhoria de processo e controle de manutenção onde para cada processo, os principais indicadores de desempenho são definidos. Essa estrutura é focada no alinhamento da função de manutenção com as metas de negócios e no gerenciamento de suporte na medição e no gerenciamento da função de manutenção.

Al-Najjar (2007) propõe um modelo para descrever e quantificar o impacto da manutenção nos principais objetivos competitivos do negócio relacionados à produção, qualidade e custos. O modelo pode ser usado para avaliar a relação custo-eficácia do investimento em manutenção e no apoio à decisão estratégica na escolha de diferentes planos de melhoria.

Muchiri et al., (2011) propõem uma estrutura conceitual que fornece diretrizes para a escolha de indicadores de desempenho da função de manutenção a qual alinhar os objetivos de manutenção com os objetivos corporativos e de fabricação e fornece uma ligação entre os objetivos de manutenção e, com isto, direciona os esforços de manutenção para alcançar o desempenho necessário e a melhoria da eficiência do equipamento de produção. Com base nessa estrutura conceitual, os indicadores de desempenho do processo de manutenção e os resultados de manutenção são identificados para cada categoria.

Medina-Oliva, Weber e Lung (2013) propuseram um modelo para avaliar o impacto na manutenção por meio da análise de indicadores de desempenho. O conhecimento de dimensões qualitativas e quantitativas permite a criação de regras

semânticas que, por sua vez, garantem consistência e robustez no desenvolvimento de modelos de estratégia de manutenção. Assaf et al. (2015) descreveram a importância da manutenção sem interrupções do sistema, os autores usam indicadores de desempenho que, segundo eles, nunca foram colocados juntos em um modelo para medir a eficiência de manutenção e fornecer uma tomada de decisão otimizada. Medina-Oliva, Weber e Lung (2015) e Lung et al. (2012) avaliaram a influência de estratégias de manutenção na eficiência global de um sistema de produção, de acordo com os padrões de disponibilidade aplicados ao Modelo Relacional Probabilístico (PRM).

Atualmente existem vários caminhos potenciais, bem como conjuntos de questões na pesquisa da MPM, a maior parte do foco tem sido na concepção de um sistema de medição de desempenho (PMS) com alguns estudos ilustrando os problemas na implementação e uso de PMS. Outras pesquisas concluíram que a área de desempenho e gerenciamento de manutenção requer pesquisa significativa e sistemática no futuro, juntamente com esforços adicionais visando solidificar os construtos teóricos e promover a utilização de aplicações mais práticas (NUDURUPATI, 2011; SIMOES, 2011; KOTZE, 2012).

Várias pesquisas foram focadas na seleção correta de KPIs ou diferentes estruturas aplicadas em diferentes setores. Estruturas de MPM também foram desenvolvidas e discutidas para setores específicos, como a indústria de mineração ou aviação militar, ou uma classe específica de empresas, como pequenas e médias empresas (PMEs) (ASSAF et al., 2015; STEFANOVIC et al., 2017).

Diferentes categorias de medidas de manutenção podem ser identificadas na literatura. Campbell (1995) classifica as medidas comumente usadas de desempenho de manutenção em três categorias com base em seu foco. Essas categorias são medidas de desempenho do equipamento, medidas de desempenho de custo e medidas de desempenho do processo.

Dwight (1999) classifica as medidas de desempenho em uma hierarquia de acordo com suas suposições implícitas sobre o impacto do sistema de manutenção no negócio. Ele dá cinco níveis na hierarquia, ou seja, impacto visível, impacto sobre a perda de lucros e impacto aos custos, medidas instantâneas de efetividade, abordagem de auditoria do sistema e medição de desempenho relacionada ao tempo. Komonen (2002) apresentou um sistema hierárquico de indicadores de desempenho de manutenção e classificou os indicadores em três dimensões principais de

desempenho de manutenção (OEE, custos de produção e qualidade de produção). O objetivo do sistema é explicar o propósito e a importância de vários indicadores em diferentes hierarquias.

Um bom exemplo é a estrutura hierárquica multicritério para medição de desempenho de manutenção (Parida e Chattopadhyay, 2007) que consiste em indicadores multicritério para cada nível de gerenciamento (estratégico, tático e operacional). O padrão europeu para indicadores-chave de desempenho de manutenção (EN: 15341, 2007) fornece três categorias principais de indicadores: indicadores econômicos, indicadores técnicos e indicadores organizacionais. Para cada categoria, é fornecida uma lista de indicadores para escolher.

Outro exemplo pode ser visto no trabalho de Assaf et al. (2015), no qual uma equipe de especialistas em manutenção, identificaram 14 indicadores de desempenho de manutenção mais adequados na planta de manutenção petroquímica. A equipe decidiu dividir os KPIs em cinco categorias: confiabilidade, custos, tempo de calendário, trabalhos de manutenção não comuns e equipe de manutenção. O Quadro 13 ilustra os indicadores utilizados para verificar a confiabilidade, apresenta a descrição e o cálculo utilizado.

KPI	Descrição	Equação
Tempo médio entre falhas (MTBF) (meta > 36 meses)	MTBF é a quantidade média de tempo que o equipamento funciona antes de falhar. É tipicamente representado em unidades de horas / dias / meses.	$MTBF = \frac{\sum Uptime}{Number\ of\ failures - 1}$
Disponibilidade do equipamento (τ) (meta > 90%)	τ indica a proporção de tempo de atividade para um determinado período	$r = \frac{Up\ time}{Up\ time + Down\ time}$
Taxa de manutenção preventiva (PMR) (meta 40-60%)	PMR é a razão entre as horas PM e o total de horas reais de manutenção. Este indicador é útil para determinar as horas-homem do PM sendo utilizadas para garantir a disponibilidade e confiabilidade do equipamento.	$PMR = \frac{PM\ man\ hours}{Total\ maintenance\ hours}$

Quadro 13 - Indicadores chave de desempenho de confiabilidade.

Fonte: Assaf et al. (2015).

Vários autores como Campbell (1995), Dwight (1999), Parida e Chattopadhyay, (2007), Muchiri et al., (2011), Kumar et al. (2013), Medina-Oliva, Weber e Lung (2015), Stefanovic et al. (2017), comentam sobre ser gerenciada visando um aspecto mais abrangente contemplando diversos níveis organizacionais, neste caso engloba questões estratégicas (relacionada a estratégia da empresa); táticas (decisões que

contribuem para o uso eficaz e eficiente dos recursos); e operacionais (refere-se ao nível mais baixo, com foco na execução das atividades com decisões de curto-prazo).

Um exemplo de segmentação realizada referente ao nível hierárquico, pode ser visto em Campbell e Reyes-Picknell (2016) os quais classificam os indicadores em três grupos de análise (performance do equipamento, performance de custo, e performance do processo. Em grupos foram utilizados e ampliados posteriormente por Piechnicki (2018) o qual adicionou em sua pesquisa o grupo de avaliação de risco. Tais grupos são apresentados a seguir:

- Performance do equipamento: medidas que estão relacionadas com a maneira que o equipamento foi projetado e construído, levando em consideração disponibilidade dos recursos, análise de falha, tempos de reparo, entre outros; isto é, esse grupo apresenta características que suportam os níveis táticos e operacionais;
- Performance de custo: as análises de custos estão concentradas no nível estratégico das empresas, pois nesse nível os gestores analisam qual o custo por unidade produzida, avaliando, portanto, a necessidade ou não de investimentos na planta por meio de indicadores de segurança, meio-ambiente, custo operacional e unitário, entre outros;
- Performance do processo: indicadores responsáveis por avaliar como está o desenvolvimento das atividades e recursos da planta baseando-se em indicadores de disponibilidade, confiabilidade, qualidade, entre outros; logo, estão presentes em todos os níveis hierárquicos, porém com visões e/ou interpretações diferenciadas;
- Avaliação de risco: indicadores comumente usados nos sistemas industriais com o objetivo de mitigar ou eliminar riscos potenciais, sejam eles de segurança, ambientais ou operacionais; no que diz respeito ao nível hierárquico, esse grupo apresenta relação com os níveis estratégico (por exemplo, otimizar e maximizar a produção) e tático (por exemplo, redução das falhas potenciais).

3 FUNDAMENTOS

Para o desenvolvimento deste trabalho alguns métodos e ferramentas são necessários para que se atenda aos objetivos estabelecidos. Neste capítulo serão demonstrados alguns fundamentos sobre mineração de processos e os métodos MCDM a serem utilizados.

3.1 MINERAÇÃO DE PROCESSOS

A mineração de processos, do inglês Process Mining (PM), é uma técnica de gerenciamento de processos dedicada a descoberta, monitoramento e melhoria de processos reais através da extração de conhecimento dos logs de eventos disponíveis nos atuais sistemas de informação (AALST et al., 2007; AALST et al., 2012). Portanto, esta técnica é um campo de pesquisa que se preocupa com a análise a posteriori de um processo de negócio, baseando-se nos registros de sua execução com o objetivo de extrair informações agregadas e de relevância sobre diversos aspectos do processo em análise (GÜNTHER, 2009).

O ponto de partida para a mineração processo é um log de eventos, todas as técnicas de mineração processo assume que é possível sequencialmente gravar eventos de tal modo que cada evento refere-se a uma atividade e está relacionada com um caso particular, isto é, um exemplo de processo (van der AALST, 2011). Conforme a Figura 24, existem três tipos básicos de mineração de processos: descoberta de processos, conformidade e aprimoramento.

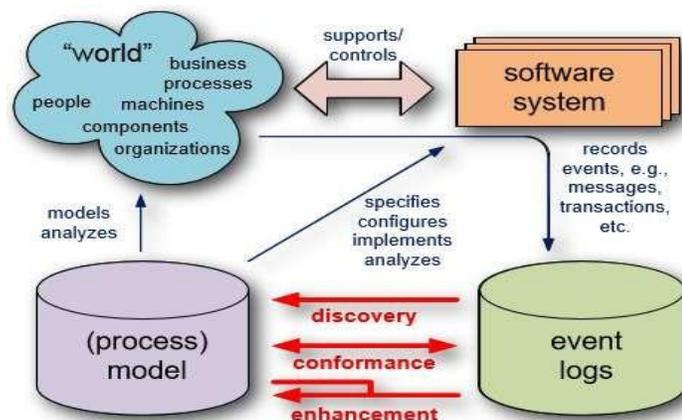


Figura 24 – Principais tipos de mineração de processos.

Fonte: Aalst (2011)

O primeiro tipo de mineração processo é descoberta, uma técnica descoberta leva um log de eventos e produz um modelo sem o uso de qualquer informação a priori. O segundo tipo de mineração processo é conformidade, aqui um modelo de processo existente é comparado com um log de eventos do mesmo processo, a verificação de conformidade pode ser usada para verificar se a realidade, como registrado no log, está conforme o modelo e vice-versa. O terceiro tipo de mineração processo é o aprimoramento, aqui a ideia é estender ou melhorar um modelo de processo já existente usando informações sobre o processo real gravado em algum registro de eventos (AALST et al, 2011).

Van der Aalst (2012) argumenta que a mineração de processos possui características que a diferencia de outras abordagens de análise: i) é centrada em processos; ii) é verdadeiramente inteligente; iii) é baseada em informações obtidas a partir de conhecimento registrado em log de eventos ao invés de opiniões.

Nos atuais sistemas de produção, as informações normalmente são armazenadas em logs – registros de eventos que capturam e armazenam dados do processo. Ainda que esses dados estejam corretos, é comum que as organizações diagnostiquem o problema por meio de fatos imaginários, não refletindo o verdadeiro comportamento da planta. Nesse contexto, a mineração de processo surge para analisar esses dados e determinar como (how?), onde (where?), quando (when?), quem (who?), porque (why?) e quais (what?) os motivos que acarretaram um determinado comportamento no sistema (SANTOS, 2015).

Este tipo de conhecimento é um recurso estratégico para a organização, pois com o uso adequado do mesmo é possível ganhar/criar vantagem competitiva (LI et al., 2011). Logo, a mineração de processos não só permite que as empresas se beneficiem das informações armazenadas, mas também que as utilizem para verificar a conformidade dos processos, detectar pontos de estrangulamento e prever problemas de execução (SANTOS, 2015).

Todavia, para alcançar essa maturidade de análise, o conhecimento gerado deve apresentar qualidade, visto que uma pequena parte incorreta ou inconsistente no log de eventos pode afetar todo o trabalho, isto é, a qualidade da mineração de processos tem uma relação direta com a qualidade dos dados de entrada (LI et al., 2011; WEERDT et al., 2013).

Sendo assim, algumas informações são necessárias para realizar a mineração de processos, as quais podem ser consideradas básicas, porém essenciais aos algoritmos de análise. Logo, para cada evento armazenado, Aalst et al. (2007) comenta que:

- cada evento refere-se a uma atividade, ou seja, uma etapa bem-definida no processo;
- em cada registro um case é associado, isto é, uma instância do processo;
- O evento pode ter um executante/originador (recurso), ou seja, uma pessoa que executa ou inicia a atividade;
- os registros devem conter um timestamp (informações de dia e hora) e serem ordenados (estruturados).

Case ID	Atividade ID	Recurso ID	Timestamp
Case 1	Atividade A	Funcionário 1	9/mar/2004 – 15:01
Case 2	Atividade A	Funcionário 1	9/mar/2004 – 15:12
Case 3	Atividade B	Funcionário 2	9/mar/2004 – 16:03
Case 3	Atividade B	Funcionário 3	9/mar/2004 – 16:07
Case 1	Atividade B	Funcionário 4	9/mar/2004 – 18:25
Case 1	Atividade C	Funcionário 1	10/mar/2004 – 09:23
Case 2	Atividade A	Funcionário 4	10/mar/2004 – 10:34
(...)	(...)	(...)	(...)

Quadro 14 – Exemplo de um registro de eventos.

Fonte: adaptado de Aalst et al. (2007).

O Quadro 14 consolida e apresenta, de maneira genérica, as informações mínimas requeridas para realizar a mineração de processos. Todavia, sabe-se que nem sempre os logs contêm todos os campos preenchidos e, neste caso, o analista deve optar por desconsiderar/excluir o registro (como, por exemplo, case, atividade e/ou recurso) ou interpolar o evento (aplicado somente ao timestamp).

3.2 MÉTODOS MULTICRITÉRIO DE APOIO A DECISÃO

A partir da década de 70 começaram a surgir os primeiros métodos de apoio ou decisão com o objetivo de enfrentar situações específicas, nas quais a pessoa responsável pelas decisões, deveria resolver um problema em que vários eram os objetivos a serem alcançados de forma simultânea. Alguns dos métodos criados para

apoio a tomada de decisão são: AHP (Analytic Hierarchy Process), ELECTRE (Elimination and Choice Expressing Reality), PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations), entre outros (GOMES et al., 2004; SABAEI et al., 2015).

A vantagem da utilização de métodos multicritério para tomada de decisão (MCDM) ocorre principalmente pelo fato de que não há uma preferência evidente nas escolhas. Geralmente não há alternativas que sejam, ao mesmo tempo, ótimas sob todos os pontos de análise (critérios); portanto, nesse contexto, métodos MCDM fazem com que seja feita a seleção da melhor opção possível (BRIOZO e MUSETTI, 2015).

Na área de MI métodos MCDM são aplicados para auxiliar os gestores de manutenção na tomada de decisão. Questões como seleção das estratégias de manutenção com aplicação de MCDMs podem ser vistos no trabalho de Shafiee (2015). Clemente et al. (2013), também utilizam dos conceitos dos métodos MCDM como apoio ao sistema de suporte à decisão baseado na abordagem da MCC (Manutenção Centrada na Confiabilidade) para definição das estratégias de manutenção, uma vez que é necessário lidar com dados de falha, disponibilidade, manutenibilidade e confiabilidade de equipamentos.

Já em Almeida et al. (2015), os autores visam a classificação e atribuição da prioridade de manutenção, a fim de permitir a otimização do planejamento de manutenção com foco na disponibilidade, manutenibilidade, detectabilidade, segurança, confiabilidade e custo estabelecendo trade-offs entre múltiplos critérios. Na publicação de Alencar e Almeida (2015), os autores propõem um modelo de decisão baseado em um método MCDM específico e pontual com o auxílio da Manutenção Centrada em Confiabilidade para fornecer uma melhor avaliação das consequências de falhas, permitindo um planejamento da manutenção mais eficaz.

Ao longo do tempo vários autores vêm utilizando métodos MCDM na MI, como por exemplo Behzadian et al., (2012), Wan Lung Ng, (2008), Garg e Deshmukh (2006), Bevilacqua e Braglia (2000), Chareonsuk et al. (1997). Todos esses trabalhos, e muitos outros presentes na academia, são usados de maneira pontual, ou seja, os mesmos são aplicados ou para seleção da estratégia de manutenção, ou para determinação do intervalo de manutenção, ou para o planejamento da manutenção, ou seleção do critério mais crítico ao setor de Manutenção, e assim por diante.

Portanto, o campo para utilização dos métodos multicritério para tomada de decisão é vasto e promissor, sendo aplicado em diversos setores e segmentos das companhias, abordando diferentes problemas e, por consequência, objetivos. Nesse contexto, a presente pesquisa propõe o uso de métodos MCDM em contexto gerencial na qual uma decisão irá abranger vários aspectos dentro da MI. Com o uso destes métodos pretende-se fornecer robustez nas etapas de tomada de decisão na MI, aumentando a confiabilidade das informações e melhorando a qualidade das seleções das alternativas disponíveis.

Neste trabalho, os métodos escolhidos para apresentação e explanação são: AHP, PROMETHEE e TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*). Todavia, como este trabalho busca aplicar os métodos, obter os resultados e interpretar os mesmos, sugere-se a leitura de Saaty (1980), Brans e Vincke (1985) e Hwang (1981), respectivamente, para compreensão da maneira com que os cálculos numéricos são desenvolvidos.

3.2.1 AHP

O método AHP é uma das técnicas analíticas mais clássicas e populares para análises de problemas complexos em tomada de decisão. Consiste em uma família de procedimentos que usa a comparação par a par de critérios perguntando o quão importante é um critério em relação ao outro, sendo uma maneira simples, intuitiva e flexível para que os decisores analisem o problema (HUANG et al., 2011).

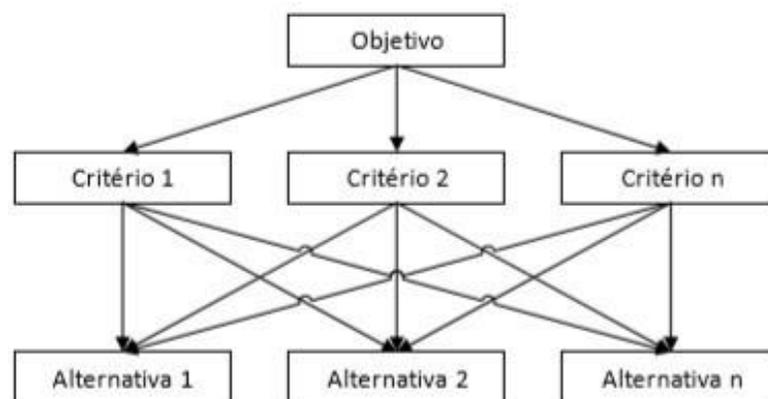


Figura 25 – Modelo hierárquico e genérico do AHP.
Adaptado de Saaty (1987).

A Figura 25 apresenta um modelo genérico e hierárquico da estrutura desse método. Observa-se nesse modelo que o problema é segmentado em subproblemas, os quais podem ser compreendidos e avaliados subjetivamente de maneira mais fácil através de objetivos, atributos, critérios e alternativas. Portanto, a hierarquia AHP pode conter quantos níveis forem necessários para caracterizar o espaço-problema de tomada de decisão (SANTOS et al., 2017).

O método consiste em ordenar alternativas e considera trocas entre critérios, os tomadores de decisão devem atribuir pesos em uma escala de 1 a 10 para cada critério, comparando-os peerly Lung Ng (2008). Este método só pode ser usado quando os parâmetros são passivos e têm sua importância medida em uma escala de quociente ou razão, ou seja, todos os parâmetros devem ser comparáveis entre si. Como exemplo Lung Ng (2008), comparando os critérios a_1 , a_2 e a_3 em que $a_1 > a_2 > a_3$, ou seja:

$$\begin{aligned} a_1 &= p_{12} * a_2 = x * a_2 \\ a_2 &= p_{23} * a_3 = 2x * a_3 \end{aligned}$$

Consequentemente,

$$a_1 = p_{13} * a_3 = 3x * a_3$$

Onde p_{ij} representa o grau de importância do critério i em relação ao critério j . Com essas informações, a tabela de prioridade de critérios é configurada. Após esta montagem, a soma das linhas é obtida obtendo o valor w_{ij} e, em seguida, os resultados obtidos devem ser. A etapa subsequente é o teste de inconsistência, usado para verificar a existência de um desvio entre as comparações, onde o resultado zero indica a consistência perfeita, enquanto valores maiores que 0,1 podem aumentar substancialmente o erro de decisão. O resultado da consistência (CR) é determinado pela equação LUNG NG (2008):

$$RC = \frac{\left(\frac{\mu_{\max} - n}{(n - 1)} \right)}{RI}$$

$$\mu_{\max} = \frac{1}{n * \sum w_n}$$

Em que:

μ_{max} = Índice que relaciona os critérios da Matriz de Consistência e os pesos dos Critérios;

n = número de critérios;

RI = Tabela de índice em função de n .

Após realizar todas as etapas, o cálculo da RC será o fator decisivo para a aceitação do resultado obtido, fazendo com que novas análises sejam feitas, alterando pesos variáveis ou desconsiderando momentaneamente algumas restrições para entender a lógica do resultado, se os valores encontrados não são satisfatórios.

Complementando as informações sobre a metodologia AHP, Bhushan e Rai (2004), a descrevem em seis etapas:

- i. O problema deve ser decomposto em hierarquia (relacionamento entre elementos de um nível com o outro) de objetivo, critérios, subcritérios e alternativas;
- ii. Dados são coletados por especialistas ou tomadores de decisão correspondendo a estrutura hierárquica com o objetivo de realizar uma comparação par a par qualitativa com base na escala Saaty;
- iii. As comparações, par a par, dos diversos critérios gerados no passo anterior são organizadas em uma matriz quadrada (o tamanho da matriz refere-se à quantidade de alternativas);
- iv. Os autovalores e seus respectivos auto vetores são normalizados, dando a importância relativa dos critérios comparados, sendo que os elementos do auto vetor são os pesos de cada comparação;
- v. A consistência da matriz deve ser calculada/avaliada, sendo que se a razão de consistência apresentar valor maior que 0.1 (10%) é sugerido reavaliar as respostas;
- vi. O índice de cada alternativa é multiplicado pelo peso de cada subcritério e/ou critério, objetivando, ao final, a obtenção de um ranking global das opções.

Santos (2018) comenta sobre a facilidade de implementação desse método, o qual pode ser desenvolvido por meio de tabelas e planilhas eletrônicas, traz também algumas vantagens e desvantagens do método em relação aos outros métodos, as

quais foram observadas nos trabalhos de Macharis et al., 2004; Kumar et al., 2017), e são descritas a seguir:

Vantagens: estruturação hierárquica dos problemas de decisão; determinação dos pesos de cada critério; adaptável, fácil e intuitivo para equipes que contém mais de um tomador de decisão; simplicidade na comparação par a par; entre outras.

Desvantagens: a comparação par a par pode ser considerada uma forma superficial de comparar um conjunto de opções, e se for considerado a escala Saaty de nove valores, essa fragilidade fica mais evidente; para um nível de inconsistência maior que 10% é sugerido que os tomadores de decisão reavaliem suas escolhas; pode facilmente haver divergências de respostas entre os tomadores de decisão e, portanto, resultados distintos; os dados analisados são baseados somente na experiência dos usuários; entre outros.

3.2.2 PROMETHEE

De acordo com Bogdanovic et al. (2011), o PROMETHEE é um sistema de apoio a decisão bem estabelecido e consolidado que lida com a avaliação e seleção de um conjunto de opções com base em vários critérios, objetivando a obtenção de um ranking entre eles. O grande diferencial desse método é sua simplicidade e habilidade de aproximar a maneira como a mente humana expressa e sintetiza as preferências quando enfrenta múltiplas perspectivas de decisão contraditórias entre si, sendo uma das razões pela qual essa técnica pode lidar com informações incertas, incluindo critérios qualitativos e quantitativos.

O método PROMETHEE foi desenvolvido a partir do ELECTRE, e o seu objetivo foi criar um procedimento mais simples em relação ao seu precursor, visto que o primeiro necessita de muitos parâmetros que, muitas vezes, não apresentam sentido ao decisor. Ainda que ambas as técnicas sejam vulneráveis a subjetividade, principalmente para parâmetros técnicos, o PROMETHEE demonstra maior resistência para variações nos parâmetros, apresentando, portanto, maior solidez nos resultados (BRANS e MARESCHAL, 2005; CAMPOS, 2011).

A família PROMETHEE contém ramificações (versões) – I, II, III, IV, V, VI, GDSS, GAIA, TRI e CLUSTER – que tem por finalidade a resolução de problemas de ordenação e aplicação em sistemas que envolvam preferências nebulosas. Esses métodos também utilizam de comparações par a par com o objetivo de ordenar as

alternativas em relação aos critérios previamente especificados, apresentando facilidade no uso e baixa complexidade (BRANS e MARESCHAL, 2005; BEHZADIAN et al., 2010; CAMPOS, 2011; POHEKAR e RAMACHANDRAN, 2013).

Semelhante ao AHP, o PROMETHEE também compara as alternativas entre si, indicando o desempenho de cada um para um determinado critério LUNG NG (2008). Para executar a metodologia PROMETHEE, é necessário calcular:

$$\mathbf{G}(a, b) = \sum_{i=1}^n w_i * P_{i(a,b)}$$

Onde:

$\square(a, b)$ = Grau de preferência da alternativa a em relação a b , para todos os critérios;

w_i = Peso do critério i ($i = 1, 2, \dots, n$); $P_i(a, b)$ = Função de preferência.

$$\begin{aligned} \phi_{(a)}^- &= \frac{1}{n-1} * \sum_{b \in A} * \mathbf{G}(a, b), \\ \phi_{(a)}^+ &= \frac{1}{n-1} * \sum_{b \in A} * \mathbf{G}(b, a), \end{aligned}$$

As etapas para implementação do PROMETHEE são descritas por Behzadian et al. (2010), a saber: i. Determinar os desvios baseados nas comparações par a par; ii. Escolher e aplicar a função de preferência – usual, formato U (quase critério), formato V (limiar de preferência), níveis (pseudo critério), formato V deslocado (área de indiferença) ou gaussiano; iii. Calcular o índice de preferência global (ou total); iv. Calcular os fluxos de ordenação (ranqueamento parcial – PROMETHEE I); v. Calcular o fluxo líquido (resultante) de ordenação (ranqueamento completo – PROMETHEE II);

O fluxo de ordenação mencionado nas etapas de implementação refere-se aos cálculos matemáticos que analisam o quanto uma alternativa supera (do inglês, “outranking”) todas as outras (ordenação positiva) e o quanto essa alternativa é superada (do inglês, “outranked”) por todas as outras (ordenação negativa) (BRANS e MARESCHAL, 2005). Este fluxo de ordenação (positivo e negativo) é apresentado na Figura 26.

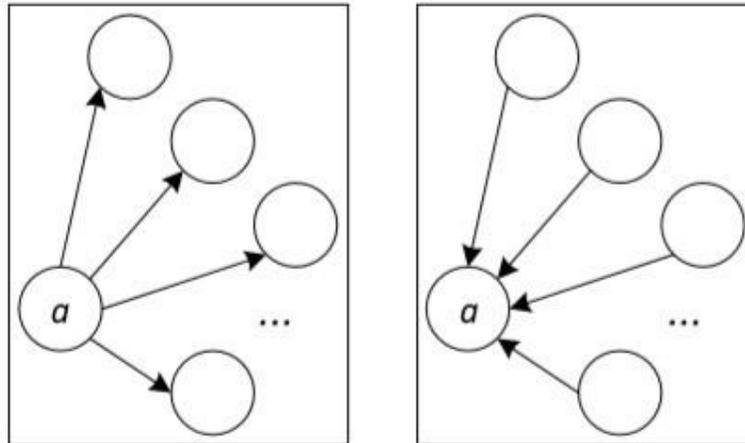


Figura 26 – Fluxo de ordenação: positivo (esquerda) e negativo (direita).

Fonte: Adaptado de Brans e Mareschal (2005).

Santos (2018) descreve em sua pesquisa algumas vantagens e desvantagens do método PROMETHEE extraídas do trabalho de Kumar et al., 2017, no apresenta como características fortes a possibilidade de envolver a decisão em nível de grupo, lida com informações quali-quantitativas e incorpora incertezas e informações nebulosas (fuzzy) em suas análises. Como pontos fracos, esse método não estrutura o objetivo adequadamente, depende que o tomador de decisão atribua um peso aos critérios e apresenta um nível de complexidade maior que o AHP, sendo necessário, em alguns casos, a presença de um especialista.

3.2.3 TOPSIS

O algoritmo TOPSIS foi desenvolvido por Hwang e Yoon e é uma técnica de avaliação de performances de alternativas através da similaridade da mesma com uma solução ideal. O princípio básico é que a alternativa escolhida deve ter a menor distância da solução ideal e a maior distância da solução negativa ideal (GOMES e RANGEL, 2009; BEHZADIAN et al. 2012).

Para a aplicação do TOPSIS, uma sequência de cálculos deve ser realizada, seguindo a ordem tradicional, são elas: desenvolvimento da matriz de decisão normalizada, desenvolvimento da matriz de decisão ponderada, distância da solução ideal positiva (PIS) e solução ideal negativa (NIS) e proximidade relativa (BEHZADIAN et al. 2012, JAIN et al. (2016).

O desenvolvimento do método TOPSIS para este trabalho será descrito na seção 5.2.1 o qual pode ser realizado com a execução de 6 etapas.

3.3 REDES DE PETRI

A Rede de Petri (RdP) é uma ferramenta matemática gráfica para a modelagem e o estudo de sistemas caracterizados como concorrentes, assíncronos, distribuídos, paralelos, não determinísticos e/ou estocásticos. Basicamente é um grafo bipartido formada por dois conjuntos: transição e lugar, estes dois componentes, também definidos como nós, são interconectados por arcos dirigidos (MURATA, 1989, JENSEN, 1996).

As RdP foram criadas com o objetivo de desenvolver uma linguagem de modelagem de processos que fosse, ao mesmo tempo, teoricamente bem fundamentada e versátil o suficiente para ser utilizada em projetos de processos industriais, combinando as forças da rede de Petri com as linguagens de programação de software. (MURATA, 1989; MACHADO, 2015, JENSEN, 1996).

Para a modelagem e interpretação de sistemas, utilizam-se marcas ou fichas (tokens) atribuídas aos lugares, que representam a situação do estado do sistema, e a movimentação das marcas por meio dos lugares, junto com regras bem definidas, representa a dinâmica do sistema a ser modelado (NORRIS, 1998).

Em relação à análise de protocolos de rede, as Redes de Petri Estocásticas Stochastic Petri Net (SPN) são aplicadas na análise de desempenho das redes de computador e sistemas de comunicação, pois possibilita a análise de probabilidade de estados do sistema. Porém, as SPNs são limitadas em modelos complexos, como modelos de dimensões industriais, por exemplo (MACHADO, 2015; NORRIS, 1998).

No caso das Redes de Petri Coloridas (CPN - Colored Petri Nets), que combinam as Redes de Petri (RdP) com linguagem de programação, são também um super conjunto das redes de Petri ordinárias. Em CPN as fichas carregam a informação definida como a "cor" (tipificação), que pode ser tipo, tamanho, nome, registro, estado, etc. Lugares que aceitam fichas "coloridas" são coloridos também, como exemplo, lugares que suportam "cores" do tipo nome não suportam "cores" do tipo tamanho. Em relação às linguagens orientadas a objeto, diz-se que as "cores" são as classes dos objetos. As transições avaliam as fichas vindas dos seus lugares de

entrada, podendo modificar a informação da ficha e carregá-la para o lugar de saída (PETRI, 1968).

Nas Redes de Petri Coloridas, a temporização é uma outra propriedade usada para diferentes análises de desempenho, em redes de Petri ordinárias tem-se que o disparo é instantâneo, no entanto, sabendo-se que sistemas reais possuem tempos envolvidos, as fichas temporizadas carregam mais uma informação, que é a estampa de tempo (timestamp). A estampa de tempo é a informação de quando a ficha estará disponível, ou seja, em que espaço de tempo a ficha está habilitada. Isto permite avaliar tempo de trânsito de mensagem, disponibilidade de recursos, e garantir uma análise estocástica do sistema (MACHADO, 2015).

Outra característica importante que o uso das Redes de Petri Coloridas possibilita é a hierarquia de redes, algumas partes dos modelos podem ser agrupadas em módulos (subsistemas), intitulados "transições de substituição", e podem ser reusadas múltiplas vezes em um modelo, facilitando o processo de modelagem. Elas também escondem a complexidade do comportamento do usuário permitindo melhor entendimento do processo como um todo (SILVA et al., 2017).

Para maior compreensão do sistema, pode-se olhar dentro do subsistema. Com isso, diz-se que a modelagem por meio das Redes de Petri Colorida possui maior capacidade de abstração (SILVA et al., 2017).

Chiola (1993) e Gharbi (2009) apresentam a definição matemática para as CPNs que é representada pela teoria de conjuntos:

$$CPN = \{P, T, CB, C, W^-, W^+, W^n, Pri, M_0, \theta\}$$

- P é o conjunto finito de lugares;
- T é o conjunto finito de transições temporizadas e imediatas, $P \cap T = \emptyset$, $P \cup T \neq \emptyset$;
- CB é a família das classes de cores básicas: $CB = \{C_1 \dots, C_n\}$ com $C_i \cap C_j = \emptyset$
- C é uma função de $P \cup T$ que associa a qualquer nó r um domínio de cor $C(r)$ que é o produto cartesiano dos elementos de CB ;
- W^e, W^+, W^h : $W^-(p, t), W^+(p, t), W^h(p, t), \in [C(t) \rightarrow Bag(C(p))]$ são funções que rotulam respectivamente os arcos de entrada, saída e inibidores entre as transições t e lugares p ;
- Pri é a função de prioridade definida como se segue: $\forall t \in T, Pri(t) : C(t) \rightarrow N$. $Pri(t, c)$ é a prioridade da instância $[t, c]$;
- M_0 é a marcação inicial que descreve o estado inicial do sistema;

- θ é a função definida no conjunto de transições T dado que $\theta(t)$ é a função de tempo do modelo.

3.4 SOFTWARE CPN TOOLS

O CPN Tools é uma ferramenta desenvolvida para editar, simular e analisar redes coloridas de Petri, com verificação de sintaxe, geração de código e geração de data-logs, o que possibilita simular um processo e gerar relatórios que poderão ser analisados por meio da mineração de processos. O software simula tanto Redes de Petri ordinárias como Redes de Petri Coloridas complexas (CPN Tools, 2018).

O CPN tools utiliza a linguagem CPN Markup Language (CPN ML), que é baseada na linguagem de programação ML. Usando CPN ML é possível definir estruturas com dados complexos, e funções para lidar com estas estruturas. Dentre as facilidades que este software oferece, têm-se que enquanto o modelo é desenvolvido, pode-se gerar códigos e suas respectivas análises de sintaxe (MACHADO, 2015).

Com isto, torna-se possível simular e analisar as partes do modelo sintaxicamente corretos, enquanto as partes erradas ou incorretas são ignoradas. Pode-se também criar blocos monitores que avaliam as condições da simulação como formação de filas, disparo de transições e outras funções que avaliam as condições de lugares e transições (MACHADO, 2015).

As funções básicas no CPN Tools consistem em: criação e edição de um modelo; análise do comportamento do modelo por meio de simulação; criação e análise do espaço de estados do modelo. Para a criação de modelos, é fornecido um editor gráfico especial de redes de Petri coloridas, o editor permite que se desenhe uma rede de Petri na tela do computador, bem como, se escreva os atributos dos elementos da rede e declarações adicionais (BARROSO e SOARES, 2016).

O modelo pode ser constituído de várias páginas que são conectadas fornecendo uma estrutura hierárquica. Para modelos muito simples, a geração de seu espaço de estados completo (gráfico de alcançabilidade) é possível. Infelizmente, para modelos mais complexos, o espaço de estados pode ser muito grande e sua criação ser impraticável (BARROSO e SOARES, 2016).

De acordo com os trabalhos verificados no Quadro 5 deste trabalho o CPN Tools foi a ferramenta de simulação mais utilizada para simular processos de negócios

tendo como suporte a mineração de processos com o uso do ProM como ferramenta de mineração. De 2011 a 2017 houve um certo “desinteresse” no uso da ferramenta CPN Tools e uma ascensão de ferramentas Business Process Simulation (BPS), com algumas atualizações a ferramenta volta a ser utilizada com maior frequência a partir de 2018.

4 FRAMEWORK PROPOSTO

A estrutura proposta neste estudo, visa mostrar um processo para auxiliar o gestor de manutenção na tomada de decisões, o objetivo é propor um framework de simulação com o auxílio da mineração de processos. Para a tomada de decisão, pretende-se utilizar métodos MCDM para análise dos dados qualitativos e integração com os quantitativos.

Pelo fato de a estrutura proposta envolver indicadores de desempenho é necessário definir quais serão utilizados, pois todas as etapas do framework estarão diretamente relacionadas com tais indicadores. Portanto, nesta seção será demonstrado qual a base de indicadores será utilizada e quais irão compor este trabalho mediante processo estruturado de seleção.

Conforme apresentado na Seção 2.5.1, indicadores são medidas, na grande maioria, numéricas utilizados para controlar e/ou melhorar os processos. Normalmente, os indicadores são customizáveis para cada companhia com base nos objetivos gerais da organização. Assim sendo, existem diversos MPI's e KPI's (Key Performance Indicators) disponíveis para medição, controle e melhoria dos processos. Nesse contexto, é importante utilizar indicadores que englobem tanto aspectos técnicos quanto financeiros e organizacionais, visando com isto ter uma visão mais abrangente do desempenho da manutenção.

Para atender a esta necessidade optou-se por escolher a Norma Europeia (EN 15341: 2007), conforme Anexo 1, e que representa o padrão Europeu que fornece os principais indicadores de desempenho de manutenção. De acordo com a Norma Europeia (EN 15341:2007), o desempenho da manutenção é o resultado do uso ativo de recursos para reter um item ou restaurá-lo para um estado no qual ele possa executar sua função necessária.

Este sistema de indicadores-chave de desempenho descrito na Norma Europeia (EN 15341: 2007) pode ser visualizado na Figura 27 e está estruturado em três grupos: econômico, técnico e organizacional. Esses indicadores propostos podem ser avaliados como uma razão entre fatores (numerador e denominador) que medem atividades, recursos ou eventos, de acordo com uma determinada fórmula.

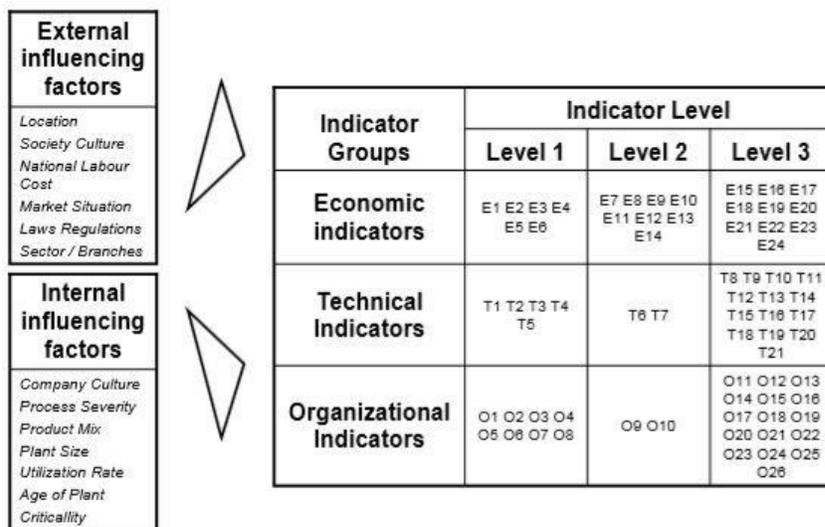


Figura 27 – Fatores que influenciam a manutenção e os principais indicadores de desempenho.

Fonte: EN 15341: 2007.

Conforme já comentado e vistos na Figura 27 os indicadores estão distribuídos em três grupos. Os indicadores do grupo econômico estão diretamente relacionados a custos, neste caso qualquer processo de manufatura gera custos com manutenção de máquinas e equipamentos e o objetivo é reduzir ao máximo o custo com a melhoria do desempenho. Este indicador orienta para um possível impacto financeiro relativo as ações para o desenvolvimento da manutenção.

Os indicadores do grupo técnico estão relacionados as falhas que ocorrem e uma máquina por exemplo, assim como os tempos envolvidos para a correção das mesmas. Alguns dos indicadores mais conhecidos e utilizados na MI, como o tempo médio entre falhas (MTBF) e o tempo médio para reparo (MTTR) fazem parte dos indicadores técnicos, portanto neste caso pretende-se abordar uma quantidade maior de índices para que se tenha um grau de confiança maior para a tomada de decisão. Este grupo de indicadores estão associados a confiabilidade pois utiliza-se de das informações de falhas de um equipamento visando projetar um cenário futuro.

O último grupo de indicadores a ser abordado é o organizacional, que está relacionado principalmente com os serviços executados pelos especialistas da manutenção. A preocupação com o tempo gasto para realizar a manutenção de um determinado equipamento, são importantes para verificar a produtividade e a

qualidade dos responsáveis pela execução das tarefas, assim como sua influência no desempenho da equipe ou departamento de manutenção.

Difícilmente todos os indicadores previstos na EN 15341: 2007, serão possíveis de serem calculados pois por exemplo questões como “maneiras diferentes de produção” e objetivos organizacionais acabam delimitando dados necessários aos cálculos. Neste ponto é importante analisar todos os indicadores e selecionar os que são considerados mais importantes, para isto é fundamental basear-se no conhecimento de pessoas envolvidas diretamente na área da MI.

4.1 ESTRUTURA DO FRAMEWORK

O framework proposto é composto de várias atividades que envolve basicamente a mineração de processos, modelagem e simulação e tomada de decisão. Para um melhor entendimento, será demonstrado por meio das Figuras 28, 29 e 30 um processo simples para tomada de decisão e também quais elementos serão integrados até ser apresentado o framework completo.

Basicamente um processo simples para cálculo de indicadores de manutenção envolvendo a mineração de processos, pode ser visto na Figura 28 o qual utiliza um log de eventos originado em um ambiente de manutenção. O log contém dados que são importados por ferramentas de mineração de processos e geram informações necessárias para calcular os indicadores de desempenho.

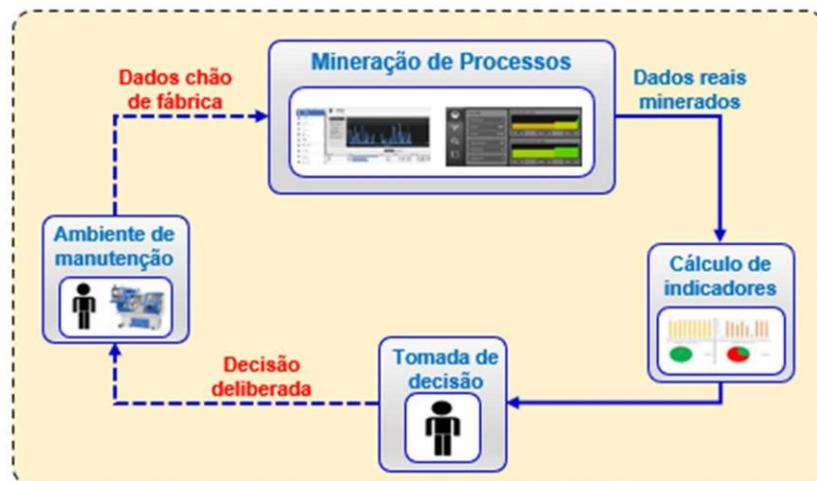


Figura 28 – Visão simples para cálculo de indicadores.

Fonte: O autor 2019.

Mesmo se tratando de um processo simples, na literatura conforme visto na Seção 2.3.2, não existem trabalhos que utilizam a mineração de processos e indicadores de desempenho para a tomada de decisão na MI. Este pode ser considerado um ponto importante do framework, pois vai contribuir para o fechamento desta lacuna identificada na literatura.

No processo visto na Figura 28 a tomada de decisão é simples considerando como base apenas os valores dos indicadores calculados (dados quantitativos). A decisão do gestor de manutenção é importante, portanto, ela deve ser a mais adequada, neste caso é fundamental considerar o máximo de informações possíveis, como por exemplo o conhecimento prático dos responsáveis diretos pela manutenção.

Para tornar o processo de tomada de decisão mais robusto, optou-se pela utilização de métodos MCDM os quais são utilizados amplamente em diversas áreas de atuação. Por se tratar de procedimentos consistentes para a tomada de decisão, espera-se contribuir de maneira significativa para uma decisão mais segura e confiável. A Figura 29 demonstra como será apresentada as atividades para se chegar a uma tomada de decisão, são três elementos: cálculo de indicadores, definição dos pesos dos indicadores e priorização de cenários.

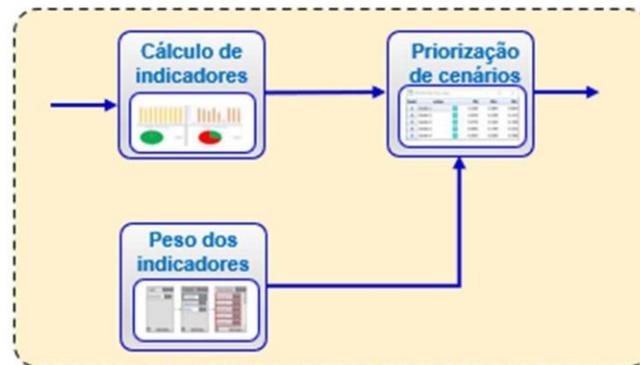


Figura 29 – Elementos para tomada de decisão.

Fonte: O autor 2019.

Até o momento tem-se um processo que envolve o uso de ferramentas de mineração de processos e tomada de decisão, o objetivo é agregar a este processo um ambiente que permita realizar simulações e gerar logs de eventos para o cálculo de indicadores e tomada de decisão. Para atender a esta exigência será agregada mais quatro atividades apresentadas na Figura 30, as quais são: seleção de indicadores, modelagem, simulação e geração de logs artificiais.

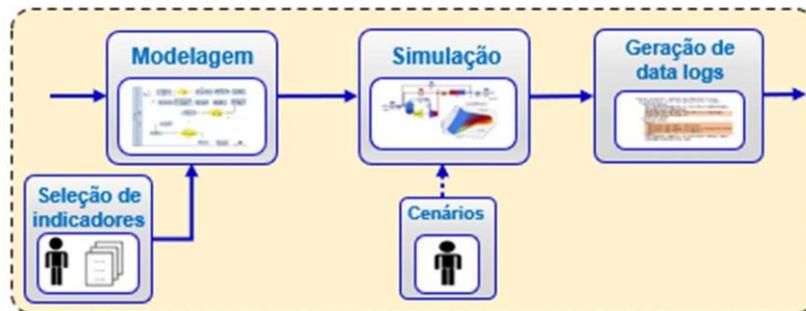


Figura 30 – Ambiente de simulação a ser integrado.

Fonte: O autor 2019.

Com a integração de um ambiente de simulação é possível verificar na Figura 31 a estrutura do Framework proposto. Como aplicação prática, a estrutura proposta busca oferecer as pessoas envolvidas nas tomadas de decisão na manutenção, condições suficientes para simular vários cenários diferentes e consiga compará-los por meio do desempenho gerado por indicadores.

O log de eventos, contendo registros de atividades de um processo produtivo pode ser obtido de diferentes formas, seja por dados informados manualmente pelo operador por meio de uma IHM (interface homem-máquina) ou de forma automática por meio de um sistema coletor de dados anexado ao maquinário ou, ainda, por meio de uma integração entre estas. Este log é padronizado com a utilização de técnicas de mineração de processos utilizando ferramentas especiais, para permitir a criação de um modelo que melhor represente o comportamento real do processo. Os dados são processados para gerar modelos numéricos, que serão utilizados como parâmetros de entrada do modelo de simulação.

Após os dados minerados, sugere-se a aplicação de metodologia de Maruster e Van Beest (2007 e 2009) e Rozinat (2009a) para a extração de modelos de processos no qual é possível verificar as atividades realizadas com base nos dados gerados pelo sistema de informação, tais modelos estão no formato de Redes de Petri e podem ser trabalhados em softwares com este tipo de linguagem matemática. Além do modelo é preciso obter os dados quantitativos, portanto é preciso utilizar ferramentas de mineração de processos para gerar as informações que permitam construir uma estrutura que possibilite realizar a simulação de uma situação futura.

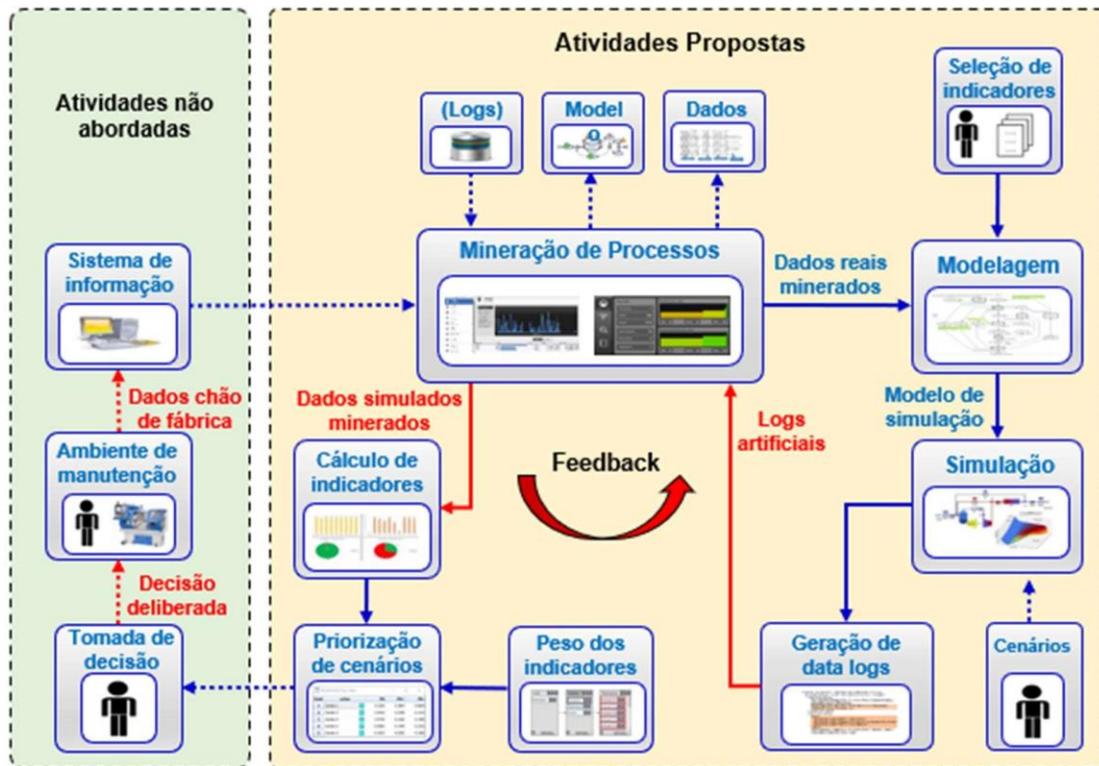


Figura 31 – Framework proposto.

Fonte: O autor 2019.

Com as informações oriundas da mineração de processos é possível desenvolver a modelagem, o software utilizado para esta atividade consegue importar o modelo gerado na mineração de processos, com isto tem-se uma disposição exata do processo estudado. A partir do modelo podem ser simulados possíveis cenários na MI e as saídas do modelo serão necessárias para calcular os indicadores de desempenho e que estão relacionadas as questões econômica, técnica e organizacional previstos na Norma Europeia (EN 15341:2007). A cada parâmetro modificado no modelo, a simulação apresentará outro comportamento e consequentemente resultará em indicadores diferentes que servirão para comparação do desempenho.

A parte final do framework consiste em utilizar métodos MCDM para auxiliar o gestor de manutenção na tomada de decisão. O uso de métodos MCDM permite utilizar em conjunto os valores dos indicadores já calculados com o conhecimento tácito das pessoas envolvidas diretamente na manutenção e ao final chegar a uma decisão mais acertada.

Para um melhor entendimento das etapas que compõem o framework, a Figura 32 apresenta uma modelagem apresentada em IDEF0 e demonstram as mesmas etapas vistas na Figura 31. Em cada bloco, as entradas e saídas são representadas pelas flechas direcionais na horizontal, sendo que as flechas verticais superiores fazem referência aos controles (metodologias, regras, etc.) de cada atividade e as verticais inferiores aos meios e/ou métodos (equipamento, ferramentas, pessoas, etc.) para executar a ação desejada.

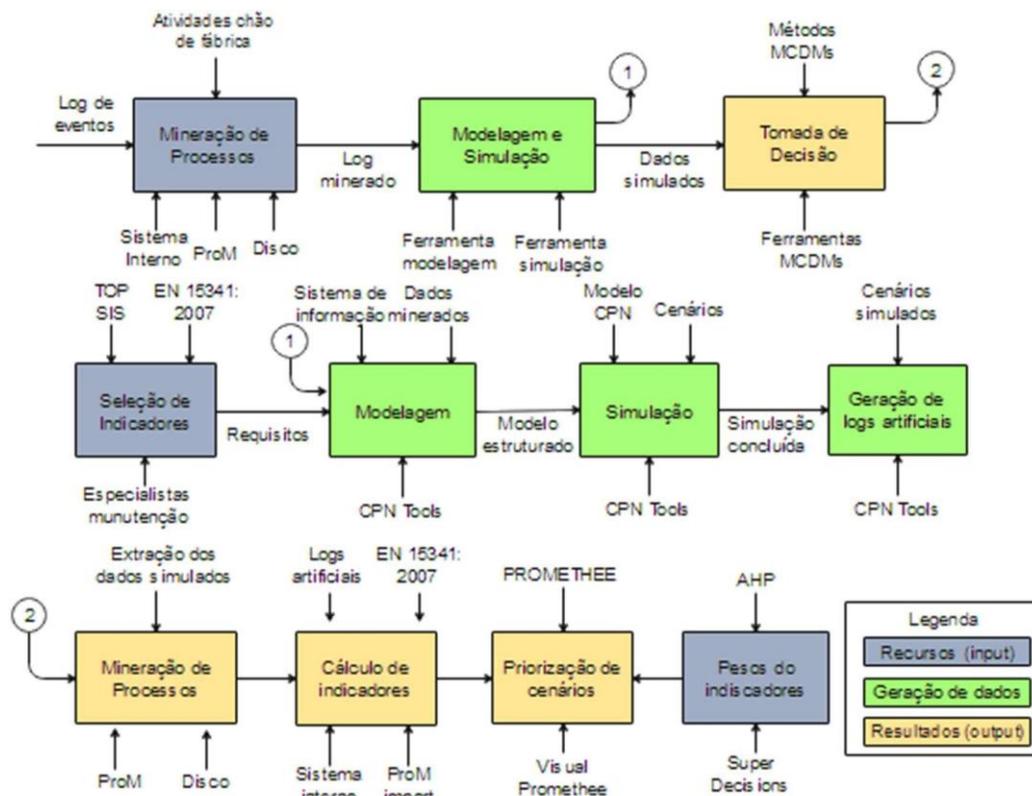


Figura 32 - Fluxograma das atividades que compõem o framework.

Fonte: O autor 2019.

As próximas seções deste capítulo serão destinadas a explicar o que significa e como são executadas cada uma das etapas. Para um melhor entendimento as atividades foram agrupadas em três ambientes distintos: mineração de processos, modelagem e simulação e tomada de decisão utilizando informações quantitativas e qualitativas.

4.2 MINERAÇÃO DE PROCESSOS

Os sistemas de informações atuais voltados a manutenção são capazes de fornecer uma grande quantidade de dados referentes a um fluxo de trabalho e seus detalhes por meio de logs de eventos. A maioria dos logs pode ser apresentada como linhas, cada uma contendo a seguinte data do evento de início / término, valores das variáveis de contexto, se houver. Existe uma série de formatos de log unificados: MXML (Mining eXtensible Markup Language) e seu sucessor Open XES (eXtensible Event Stream).

Na área da computação, log de eventos é o registro de atividades, tarefas ou eventos propriamente ditos, utilizado para se conhecer o comportamento passado de um determinado sistema. Num processo produtivo, tais registros podem ser analisados com o intuito de gerar diagnósticos acerca de problemas detectados ou ainda prover melhorias em tal processo. A Tabela 2 apresenta um modelo genérico de log de eventos contendo quatro registros de atividades, neste exemplo há seis campos para informações distintas.

Tabela 2 - Exemplo de um log de eventos genérico.

ID inst	ID evento	Tempo início	Tempo fim	Recurso	Máquina
615792	PProg	2016-04-01 23:54:05	23:54:05 00:19:45	1	1
615792	Ajuste	2016-04-01 23:54:05	23:54:05 00:19:45	1	1
615897	Operação	2016-04-01 23:54:05	23:54:05 03:41:41	2	3
615848	STOP1	2016-04-01 23:54:05	23:54:05 03:41:41	2	3

Fonte: O autor 2018.

O primeiro campo é destinado à identificação da instância ou, do inglês, (case); o segundo campo permite o registro da identificação do evento ou atividade realizada; o terceiro e quarto campos são destinados aos registros de início e fim do evento em questão. Os demais campos permitem o registro de informações adicionais como recursos (operadores) e máquinas.

Os dados contidos em um log de eventos, conforme descrito na Tabela 2, é basicamente uma sequência de atividades que visualmente é difícil de ser analisado. Com a utilização de ferramentas de mineração de processos tais dados são melhor compreendidos, pois são representados por um modelo de processo, conforme Figura

33, permitindo uma visualização rápida de questões como frequência, causalidade e dependência entre as atividades.

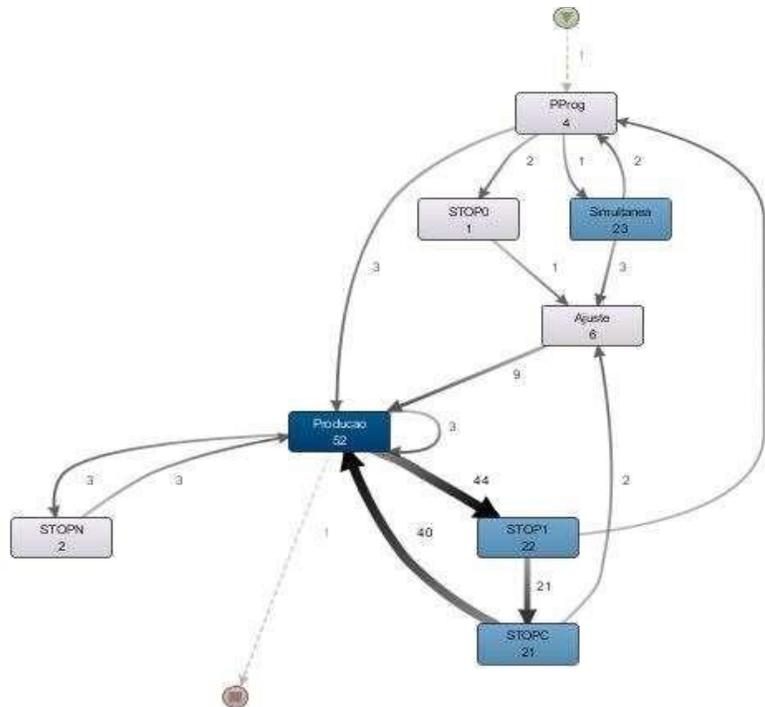


Figura 33 - Exemplo de um modelo de processo obtido por meio da mineração de processos.
Fonte: O autor 2018.

Uma das principais dificuldades em qualquer trabalho relacionado a mineração de processos é obter os data-logs adequados para serem minerados, isto pode ser observado na Tabela 2 onde é possível perceber que para algumas situações, assim como no caso deste exemplo, as instâncias do processo não seguem uma ordem facilmente compreendida. Neste caso, diferentes atividades pertencentes a instâncias distintas podem ser iniciadas ou finalizadas de forma independente, tornando a identificação do comportamento do processo pouco trivial.

Isto enfatiza a necessidade da utilização de ferramentas adequadas de mineração de processos, outra questão importante diz respeito aos inúmeros modelos de log de eventos existentes, tornando altamente necessária uma filtragem dos mesmos antes de sua utilização. A filtragem é efetuada, utilizando algoritmos de mineração de processos, para eliminar instâncias incompletas ou que possuem dados armazenados de forma errada, por exemplo com tempos de ciclo muito acima do

O próximo passo executado foi converter o mapa heurístico em uma rede de Petri, conforme Figura 35, isto é possível clicando com o botão direito do mouse sobre o mapa gerado. Após a rede de Petri ser exibida é preciso salvá-la em uma extensão de arquivo que possa ser lido pela ferramenta CPN Tools, isto pode ser feito clicando com o botão direito do mouse sobre a rede de Petri e escolher a opção “analysis” e depois a opção “Export to CPN Tools 2.0”.

Nesta etapa o CPN Tools importa todas as atividades do processo assim como a sequência delas, neste caso é preciso estabelecer as condições para que a ferramenta consiga simular um cenário e apresentar uma informação útil para tomada de decisão. As etapas do processo serão representadas no CPN Tools com a mesma sequência de atividades e a partir deste modelo são inseridas as demais informações e regras de transições para a simulação dos eventos.

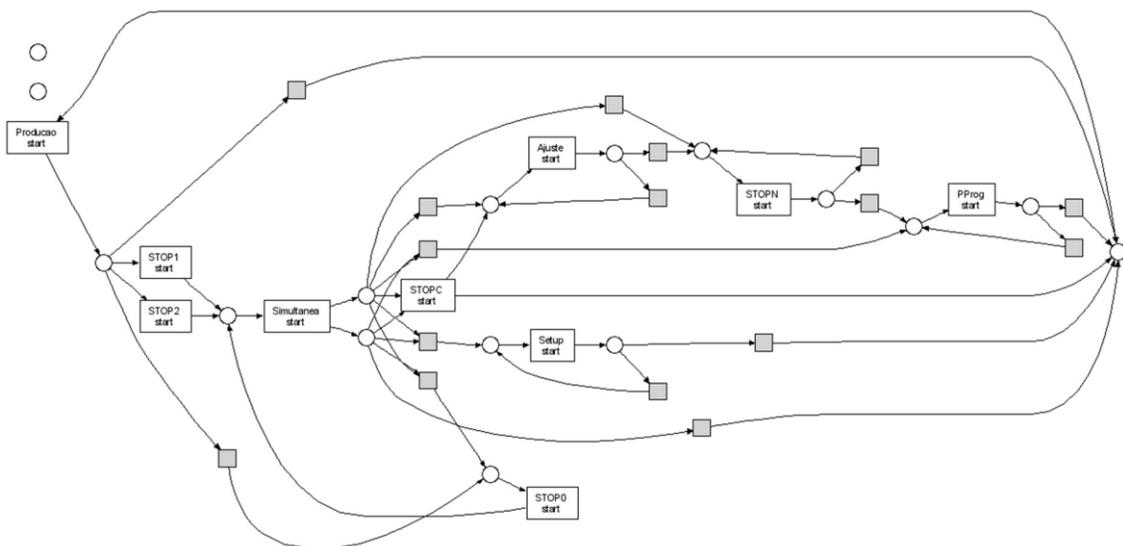


Figura 35 – Exemplo de rede de Petri.

Fonte: O autor 2018.

É importante deixar claro até este momento que, para o CPN Tools conseguir importar um determinado processo é necessário primeiro gerar o mapa heurístico e a partir deste gerar uma rede de Petri. Neste caso é possível chegar a uma extensão de arquivo que permita demonstrar no CPN Tools o processo contido do log de eventos e, partir deste, fazer as modificações para atingir um objetivo determinado.

Além do modelo gerado, as ferramentas de mineração de processos também fornecem informações de frequências relativas aos eventos de interesse, as informações também podem ser extraídas de maneira fracionada permitindo gerar novos logs com maior detalhamento, conforme exemplo da Figura 36. A metodologia proposta define eventos de interesse qualquer atividade ou evento que venha a acarretar queda no desempenho do processo produtivo e por consequência, variação nos índices de desempenho da manutenção.

Paradas operacionais, tempos de paradas e recursos utilizados são exemplos de atividades e eventos de interesse, qualquer evento que ocorra entre as atividades de produção será evento não desejável. Para a seleção dos eventos de interesse, tem-se o suporte das ferramentas de mineração de processos para se obter as frequências de todas as atividades e eventos que antecedem cada ocorrência de cada um dos eventos, inclusive frequência 0 (zero).

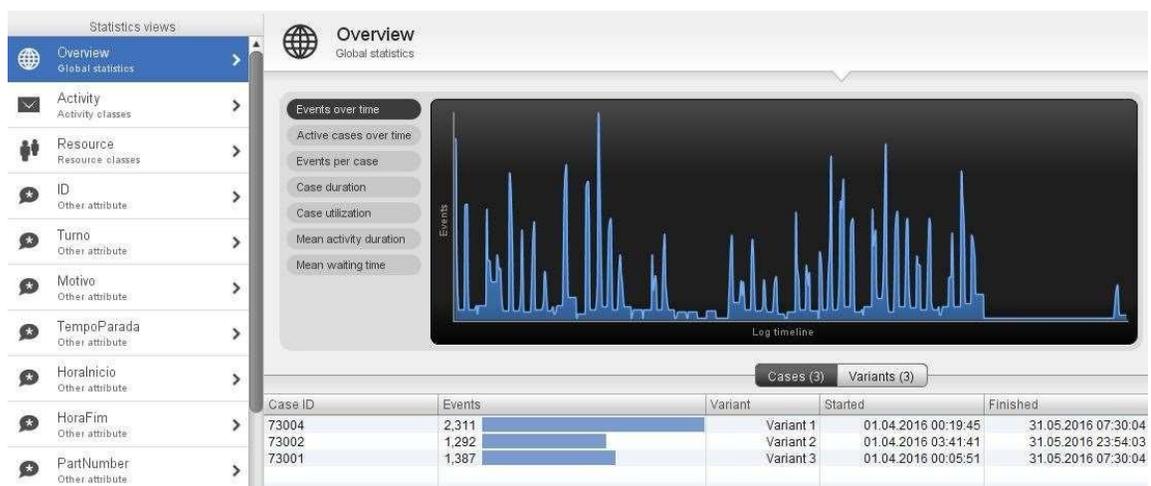


Figura 36 - Informações do log carregados em ferramentas de mineração de processos.

Fonte: O autor 2018.

O software ProM oferece uma vasta opção de plug-ins disponíveis para escolha, neste caso é preciso identificar quais são úteis e tentar extrair o máximo de informações possíveis. A seguir serão relacionados alguns plug-ins que oferecem as informações necessárias para atender as exigências desta proposta.

- Genetic Algorithm Plug-in: este plug-in utiliza algoritmos genéticos para minerar os processos a partir dos logs de eventos; o resultado (saída) desta análise é um

conjunto de modelos de processos que são ordenados/ranqueados por ordem descendente em relação ao valor fitness, isto é, medida que indica o quão próximo o modelo minerado conseguiu reproduzir e representar o comportamento presente no log de eventos;

- Basic Log Statistics: tem por objetivo sintetizar as atividades gravadas no log exibindo seus valores absolutos (quantidade de execuções), tempo de duração, os valores mínimo, máximo, média aritmética e média geométrica das atividades; permite que as informações sejam exportadas em formato de texto/dados (os quais serão usados neste trabalho) ou de maneira gráfica;
- Fuzzy Miner: apresentando um resultado similar ao plug-in Genetic Algorithm, este utiliza de técnicas fuzzy para minerar e descobrir o processo, sendo indicado para processos que são menos estruturados, ou seja, sistemas que apresentam grande quantidade de comportamento não-estruturado e/ou conflitante; diferentemente do primeiro plug-in, a saída é um modelo contendo informações de frequência, sendo que o mesmo proporciona uma análise gráfica dinâmica, pois consegue verificar o caminho e comportamento das instâncias por meio de animações visuais;
- Heuristics Miner: O minerador de heurístico é considerado um algoritmo mais robusto para situações reais, sendo menos sensível a ruído e informações incompletas no log de eventos. Para isso, ele leva em consideração a frequência das relações entre cada par de atividades, com a construção de um grafo de dependência.

Apesar de serem selecionados e apresentados quatro plug-ins, de modo geral, os que serão mais utilizados são o Genetic Algorithm Plugin e o Basic Log Statistics, visto que estes se encaixam melhor na proposta desse trabalho. Todavia, os demais plug-ins são utilizados como ferramentas de apoio para suportar as avaliações e validar o uso dos primeiros. Em relação ao Disco®, este software é útil para descobrir o processo e obter avaliações preliminares do log de eventos, ele traz muitas informações quantitativas consideradas essenciais para o cálculo dos indicadores de manutenção.

De maneira geral, a mineração de processos mostra-se uma ferramenta poderosa e confiável para extração de conhecimento a fim de compreender o comportamento do sistema sob análise. Com o auxílio de algoritmos e esforço computacional consegue-se descobrir os processos e os caminhos realizados pelas

instâncias, assim como avaliar se as atividades executadas estão em conformidade com o que foi previamente planejado, extraíndo, inclusive, informações de duração e frequência das mesmas.

4.3 MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Para que seja possível a estruturação do modelo de simulação é preciso saber quais tipos de informações o log de eventos precisa apresentar. Para se chegar a essas informações é preciso selecionar os indicadores previstos na Norma Europeia (EN 15341:2007) e verificar que tipos de informações é necessária para calcular cada indicador.

Nesta fase do trabalho é preciso deixar claro que o modelo de simulação será estruturado para gerar informações para o cálculo dos indicadores selecionados. Mas para dar uma melhor contribuição às pesquisas futuras, serão relacionadas todas as informações necessárias para o cálculo de todos os indicadores previstos na Norma Europeia (EN 15341: 2007), a descrição completa é apresentada nos apêndices 1 e 2.

4.3.1 Seleção de indicadores

Conforme já foi comentado neste trabalho, pretende-se utilizar os indicadores previstos na Norma Europeia (EN 15341:2007) para se chegar uma tomada de decisão. Mas devido à grande quantidade de indicadores previstos neste documento, optou-se por utilizar um método MCDM para selecionar os mais importantes utilizando para isto a opinião de especialistas de manutenção inseridos em ambiente industrial. Como instrumento para a seleção dos indicadores da MI vistos no anexo 1, pretende-se utilizar o método TOPSIS, cada integrante da uma equipe de manutenção atribuiu para cada indicador um peso de 1 a 10 com relação a sua importância no contexto da manutenção. A seguir, são descritas as etapas para se chegar aos indicadores selecionados, os quais foram adaptados dos trabalhos de Jain et al. (2016) e Arese et al. (2017).

1ª etapa: Construir a matriz de decisão

Deve-se realizar inicialmente a montagem da matriz de decisão $a \times c$, em que “a” são as alternativas e “c” os critérios. A partir daí, inicia-se a aplicação das etapas sugeridas pelo método TOPSIS.

$$M = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_j & \dots & C_m \\ \begin{matrix} A_1 \\ \vdots \\ A_i \\ \vdots \\ A_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1j} & \dots & m_{1m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ m_{i1} & m_{i2} & \dots & m_{ij} & \dots & m_{im} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \dots & m_{nj} & \dots & m_{nm} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

(1)

2ª etapa: Calcular a matriz normalizada

A normalização da matriz de decisão pode ser realizada de diversos modos. Neste trabalho, foi utilizada a normalização linear, conforme a fórmula abaixo:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum x_{ij}^2}}$$

(2)

Em que x_{ij} representa o escore do j -ésimo critério para a i -ésima fonte de dados.

3ª etapa: Calcular a matriz com os pesos

Multiplica-se a matriz normalizada pelos respectivos pesos dos critérios. A definição dos pesos é realizada de acordo com percepções de valor do decisor ou de um grupo de decisores. Neste trabalho, se optou por utilizar peso linear

$$v_{ij} = w_{ij} r_{ij}$$

(3)

Onde w_{ij} é o peso definido para cada atributo ou critério

4ª etapa: Identificação da solução ideal (PIS) e da solução anti-ideal (NIS)

Nesta etapa, determina-se os melhores níveis, que representam a solução ideal (S+) para cada um dos critérios analisados. Procede-se do mesmo modo para os piores níveis, que representam a solução anti-ideal, (S-). As seguintes equações são utilizadas:

$$S^+ \{(\max v_{ij} | j \in J), (\min v_{ij} | j \in J')\}$$

$$S^- \{(\min v_{ij} | j \in J), (\max v_{ij} | j \in J')\}$$

$$(4)$$

Onde j e j' representam o conjunto de critérios

5ª etapa: Calcular as distâncias entre a situação ideal positiva e cada alternativa (D^+) e a situação ideal negativa e cada alternativa (D^-)

Calcula-se a medida de separação para cada alternativa em relação à solução ideal e anti-ideal. Essas distâncias euclidianas entre cada alternativa e sua solução ideal positiva (D^+) e sua solução anti-ideal (D^-) são calculadas da seguinte forma

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n [v_{ij}(x) - v_j^+(x)]^2}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n [v_{ij}(x) - v_j^-(x)]^2}$$

$$(5)$$

6ª etapa: Calcular a similaridade para a posição ideal positiva

Por fim, chega-se ao coeficiente C ou resultado da aproximação da situação ideal (C_i) e a definição da ordenação das alternativas, através da equação:

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}$$

$$(6)$$

As alternativas são classificadas em ordem decrescente de acordo com os valores do coeficiente de aproximação, definido no intervalo $[0,0,1,0]$, considera-se que as alternativas mais próximas de 1,0 são as melhores. No capítulo de resultados será demonstrado os cálculos até chegar ao grupo de indicadores selecionados para as etapas futuras.

4.3.2 Modelagem

O Quadro 15 traz os plug-ins comentados na seção 4.2 deste trabalho, assim como as informações necessárias para o cálculo dos indicadores a serem selecionados na seção 5.2.1 deste trabalho. É importante comentar que algumas informações podem ser conseguidas parte por meio dos softwares de mineração de processos e parte oriundas do sistema interno da empresa, ou seja, talvez para se chegar ao valor integral de uma informação necessária ao cálculo de um indicador é necessário utilizar tanto os dados da mineração de processo quanto do sistema interno da empresa.

Conforme Quadro 15 a coluna informação mostra os dados quantitativos necessários para alimentar as fórmulas de cálculo estabelecidos na Norma Europeia (EN 15341: 2007), um breve descritivo destas informações pode ser visto no Anexo 1. As colunas com os plug-ins do ProM mostram a origem dos dados da coluna informação, em alguns casos uma informação pode ser verificada em vários plug-ins, isto porque o ProM por apresentar muitos plug-ins, vários deles são complementos de outros.

A coluna com o software Disco® tem a mesma função dos plug-ins do ProM, neste caso não há plug-ins, mas sim uma série de filtros para detalhamento das atividades. A última coluna mostra quais informações podem ser obtidas com o auxílio do sistema de informação da empresa além das que já foram extraídas dos logs de eventos, são informações complementares que irão dar suporte para o cálculo dos indicadores.

Informações necessários para cálculo dos indicadores da manutenção							
Nº	Informação	Plugin's / softwares					Sistema interno
		Basic Log Statistics	Fuzzy Miner	Heuristics Miner	Genetic Algorithm Plug-in	Disco	
1	Custo total de manutenção						X
9	Custo interno total de pessoal gasto em manutenção						X
15	Custo de manutenção corretiva	X	X	X	X	X	X
16	Custo de manutenção preventiva	X	X	X	X	X	X
17	Custo de manutenção baseado em condições	X	X	X	X	X	X
20	Custo de paradas de manutenção	X		X	X	X	X
21	Custo de treinamento para manutenção						X
22	Número de pessoal de manutenção					X	
26	Tempo total de operação	X				X	
27	Tempo de inatividade devido a manutenção	X				X	
35	Tempo de inatividade relacionado a falhas	X				X	
36	Tempo de inatividade total relacionado à manutenção						
38	Tempo de manutenção preventiva causando tempo de inatividade					X	
39	Tempo de manutenção preditiva que causa tempo de inatividade					X	
42	Número total de falhas	X	X	X	X	X	
50	Horas de trabalho usadas para planejamento de manutenção					X	
51	Total de horas de pessoal de manutenção					X	
53	Tempo total para restauração	X				X	
63	Horas de trabalho usadas para melhoria contínua						X
66	Tempo de manutenção corretiva					X	
71	Horas corretivas imediatas	X					
72	Horas de manutenção preventiva					X	

Quadro 15 – Extrato das Informações para cálculo de indicadores da manutenção.

Fonte: O autor 2019.

Para um maior detalhamento e melhor compreensão, o Quadro 16 traz as informações necessárias para a estruturação do modelo de simulação, o objetivo é mostrar qual o tipo de informações é preciso e de qual fonte é proveniente. Este detalhamento contribui para uma melhor estruturação de logs de eventos, pois mostra que tipo de informação é preciso incluir nos registros de eventos de uma máquina por exemplo.

Ordem	Informação para cálculo	Dados necessários	
		Mineração de processos	Sistema interno
1	Custo total de manutenção	-	Idem
9	Custo interno total de pessoal gasto em manutenção	-	Idem
15	Custo de manutenção corretiva	\sum Horas manutenção corretiva	Custo total de manutenção
16	Custo de manutenção preventiva	\sum Horas de manutenção preventiva	Custo total de manutenção
17	Custo de manutenção baseado em condições	\sum Horas manutenção CBM	Custo total de manutenção
20	Custo de paradas de manutenção	Total de paradas corretivas	Custo total de manutenção corretiva
21	Custo de treinamento para manutenção	-	Idem
22	Número de pessoal de manutenção	Idem	Idem
26	Tempo total de operação	Idem	-
27	Tempo de inatividade devido a manutenção	Tempos de cada parada para manutenção	-
35	Tempo de inatividade relacionado a falhas	\sum Tempos de paradas devido às falhas	-
36	Tempo de inatividade total relacionado à manutenção	\sum Tempos de paradas para manutenção com parada na produção	-
38	Tempo de manutenção preventiva causando tempo de inatividade	\sum Tempos de manutenção preventiva com parada na produção	-
39	Tempo de manutenção preditiva que causa tempo de inatividade	\sum Tempos de manutenção preditiva com parada na produção	-
42	Número total de falhas	Idem	-
50	Horas de trabalho usadas para planejamento de manutenção	\sum Tempos para planejamento da manutenção	-
51	Total de horas de pessoal de manutenção	Idem	-
53	Tempo total para restauração	\sum Tempos de reparo	-
63	Horas de trabalho usadas para melhoria contínua	-	Idem
66	Tempo de manutenção corretiva	\sum Tempos de manutenção corretiva interna	-
71	Homem-horas de manutenção corretiva	\sum Tempos de manutenção corretiva	-
72	Homem-horas de manutenção preventiva	\sum Tempos de manutenção preventiva	-

Quadro 16 – Detalhamento das informações para cálculo dos indicadores de manutenção.

Fonte: O autor 2019.

Com a definição dos indicadores selecionados e as informações necessárias, é possível estruturar o modelo de simulação para gerar os dados necessários aos cálculos dos indicadores. O modelo de simulação será elaborado em RdP Colorida com a utilização do software CPN Tools, sendo usado como referência o modelo de Pierezan (2011) o qual ampliou o modelo de estados e transições de Ron e Rooda (2005) para o contexto de manufatura e não apenas aos estados relativos à uma máquina. Neste modelo de Pierezan (2011) para as simulações foram considerados os eventos externos à máquina, como falta matéria prima, ou ainda, a falta de mão de obra.

A rede de Petri, como já foi comentada neste trabalho, é uma metodologia difundida e aceita na comunidade acadêmica e profissional para modelagem e simulação de processos discretos, uma vez que os modelos simulados podem aproximar-se da realidade da planta. Em complemento, as técnicas de mineração de processos podem ser usadas para extração de informação e conhecimento dos processos executados, objetivando análises estatísticas, funcionais e de causalidade.

A Figura 37 apresenta o modelo de Pierezan (2011) representando um processo geral de manufatura, onde os elementos ovais representam os lugares, os elementos de conexão entre as formas são os arcos e os retângulos são as transições. Os lugares mostram os estados das ordens de produção e dos recursos que fazem parte do processo macro, 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 (PIEREZAN, 2011).

O modelo de simulação apresentará uma estrutura hierárquica, onde o processo é visto de forma macro, observando-se as transições de substituição desenhadas com linhas duplas e definidas como subpáginas as quais descrevem a suas funções dentro do macroprocesso. De forma geral o objetivo é modelar um processo direcionado apenas as etapas de transformação de um produto (linha de produção), desta forma tem-se os elementos diretamente relacionados a MI que possibilita estabelecer e calcular indicadores para verificação da eficiência da manutenção.

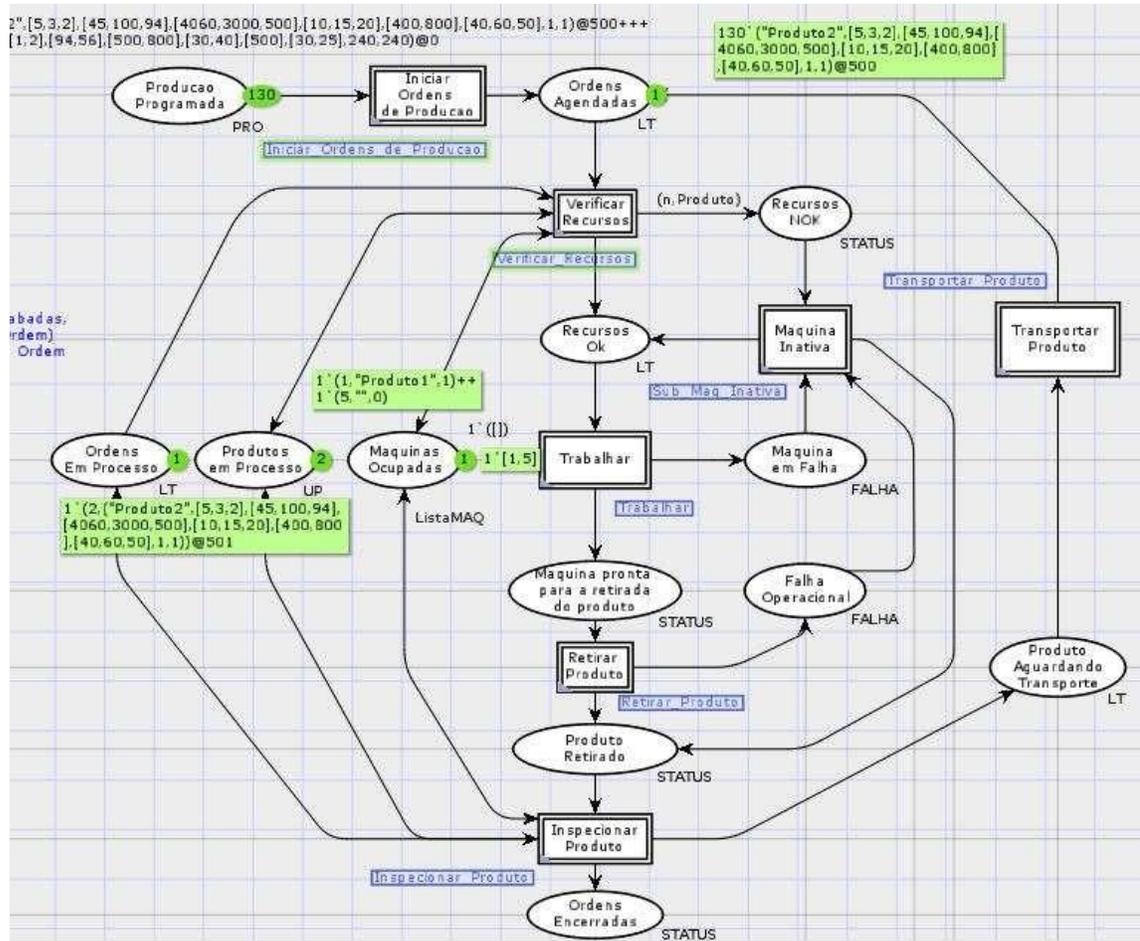


Figura 37 – Processo de manufatura modelado no CPN Tools.

Fonte: Pierezan, 2011.

No trabalho publicado por Pierezan (2011), limita-se ao cálculo do OEE (Overall Equipment Effectiveness), indicador relacionado com a avaliação da efetividade das programações de produção planejadas com o auxílio das métricas de disponibilidade, taxa de velocidade e taxa de qualidade. No presente projeto de pesquisa, este mesmo modelo é utilizado para extração de outros indicadores industriais que permita uma análise mais ampla e um entendimento melhor das ações realizadas no contexto da manutenção.

No modelo de Pierezan (2011), o processo “Produzir” é executado, logo o evento que dispara o início da produção é a chegada de uma ordem de produção para confecção de “n” peças, assim, as máquinas estão aptas para iniciar sua operação (simulação) para alcançar o número de itens solicitados na ordem de produção. O processo de armazenamento de informações no log de eventos registra os dados de cada máquina e/ou recurso (operador) utilizado para a produção de uma determinada

peça, as informações gravadas resumem-se em cases (ordens de produção), atividades, timestamp, máquina, operador e produto, conforme pode ser observado no Quadro 17.

Atividade	Descrição
Aguardando máquina	Aguarda a liberação da máquina para o início da produção
Trabalhar	Inicia o processo de produção / máquina em operação
Setup	Realiza a configuração da máquina para produção de uma peça
Retirar produto	Processo concluído, necessita retirar a peça finalizada (boa ou refugo)
Parada operacional	Paradas operacionais, sem afetar a qualidade do item produzido
Falha durante o trabalho	Falha/quebra durante a operação; necessita retrabalhar a peça que estava em produção

Quadro 17 - Atividades armazenadas no log de eventos.

Fonte: O autor 2018.

Como pode ser visto no Quadro 16, o modelo considera um número limitado de atividades, as quais permitirão calcular alguns dos indicadores da manutenção previstos na Norma Europeia (EN 15341:2007). Um dos desafios deste trabalho será justamente expandir o modelo em CPN de Pierezan (2011), a um patamar que permita fornecer informações suficientes para que seja possível calcular os indicadores a serem selecionados e que estão relacionados na EN-15341.

Após a reestruturação do modelo CPN conceitual de simulação pretende-se realizar as simulações onde o primeiro passo seria criar alguns cenários representando alterações ou parâmetro diferentes no ambiente de manutenção. Para cada cenário será realizada uma simulação sendo gerado data-logs com informações que posteriormente serão extraídas com o auxílio de ferramentas de mineração de processos e utilizadas para o cálculo dos indicadores da manutenção.

4.3.3 Cenários de simulação

O objetivo do modelo de simulação é fornecer dados suficientes para o cálculo dos indicadores selecionados, para este trabalho serão simulados alguns cenários e

cada um deles apresentando pelo menos um parâmetro com valor diferente. O modelo de simulação disponibilizará os parâmetros possíveis e a equipe de especialistas da manutenção estabelecerá 5 cenários mais aderentes a política de manutenção adotada pela empresa.

Os parâmetros do modelo estão relacionados com as informações apresentadas no Quadro 16, as quais são necessárias para calcular os indicadores selecionados na seção 4.1 deste trabalho. Cada parâmetro representa uma situação diferente, para o modelo a ser estruturado, 5 parâmetros serão necessários: quantidade de pessoal; tempo de operação; quantidade produzida; tempo para planejamento da manutenção e turnos de trabalho.

Cada cenário e seus parâmetros serão relacionados pela equipe de manutenção conforme estrutura apresentada na Tabela 3, sendo que um cenário pode apresentar todos os parâmetros diferentes ou apenas um. Neste trabalho pensou-se em utilizar a mesma equipe de manutenção que participou de etapas anteriores para apresentar uma melhor aplicabilidade dos resultados.

Tabela 3 – Definição dos cenários pela equipe de manutenção.

Parâmetro	C1	C2	C3	C4	C5
1 Pessoal da manutenção	-	-	-	-	-
2 Quantidade produzida	-	-	-	-	-
3 Tempo de operação	-	-	-	-	-
4 Tempo para planejamento da manutenção	-	-	-	-	-
5 Turnos de trabalho	-	-	-	-	-

Fonte: O autor 2019.

Conforme visto na Tabela 3, cinco cenários serão simulados, o cenário 1 (C1) é a situação real atual, com base nos valores dos indicadores deste cenário define-se os valores dos parâmetros para o cenário 2 (C2). Realiza-se a simulação, calcula-se os indicadores e com base nos valores destes indicadores e dos indicadores de C1, define-se os parâmetros para o cenário 3 (C3), repete-se o procedimento para definir os parâmetros para C4 e C5. Percebe-se que para definir os valores dos parâmetros para um dos cenários, leva-se em consideração os valores dos indicadores dos cenários anteriores.

Também seria perfeitamente possível realizar várias simulações com situações (parâmetros) diferentes, e conseqüentemente resultando em valores diferentes aos

indicadores. Certamente que quanto mais situações diferentes forem criadas mais tempo demandaria para se chegar a uma análise mais precisa, para isto seria necessário operacionalizar as atividades por meio da tecnologia da informação.

4.3.4 Geração de data logs

A simulação e geração de data-logs também serão realizadas pelo software CPN Tools, já comentado neste trabalho, o qual atende a estas necessidades tornando mais fácil a realização da simulação pois toda a modelagem já está em CPN. A ideia de utilizar um modelo controlado para simular um processo discreto e, na sequência, usar das técnicas de mineração de processos para extração de conhecimento é uma ação difundida e aceita na comunidade científica e profissional.

O software CPN Tools cria um arquivo com todos os data-logs, conforme Figura 38, sequenciada pelo nome do seu respectivo registro ID e no formato CPNXML, esta extensão não é aceita nos softwares de mineração ProM e Disco – sendo, necessário a conversão do mesmo para o formato “.mxml”. Em complemento, faz-se necessário reunir também todas as instâncias em um único arquivo, dessa forma, a mineração de processos consegue analisar a totalidade (processo completo) e descobrir comportamentos, caminhos e relações entre as ordens de produção (cases).

Name	Date modified	Type
logsCPN	1/1/2017 4:18 AM	File folder
cpnToolsSimulationLog.mxml	1/1/2017 4:51 PM	MXML File
logsCPN1.cpnxml	1/1/2017 9:40 AM	CPNXML File
logsCPN2.cpnxml	1/1/2017 9:40 AM	CPNXML File
logsCPN3.cpnxml	1/1/2017 9:41 AM	CPNXML File
logsCPN4.cpnxml	1/1/2017 9:40 AM	CPNXML File
logsCPN5.cpnxml	1/1/2017 9:41 AM	CPNXML File
logsCPN6.cpnxml	1/1/2017 9:41 AM	CPNXML File
logsCPN7.cpnxml	1/1/2017 9:41 AM	CPNXML File
logsCPN8.cpnxml	1/1/2017 9:41 AM	CPNXML File
logsCPN9.cpnxml	1/1/2017 9:41 AM	CPNXML File
logsCPN10.cpnxml	1/1/2017 9:41 AM	CPNXML File
logsCPN11.cpnxml	1/1/2017 9:40 AM	CPNXML File
logsCPN12.cpnxml	1/1/2017 9:40 AM	CPNXML File
logsCPN13.cpnxml	1/1/2017 9:41 AM	CPNXML File
logsCPN14.cpnxml	1/1/2017 9:41 AM	CPNXML File
logsCPN15.cpnxml	1/1/2017 9:41 AM	CPNXML File

Result-log

Files generated by the simulation

Figura 38 - Método de geração de data logs com o auxílio do CPN Tools.

Fonte: O autor 2018.

Essa conversão e unificação é realizada com o auxílio do programa ProM Import Framework, o qual tem a capacidade de ler diversos formatos de arquivos, incluindo os gerados durante as simulações, e transformar as “n” instâncias em um único arquivo no formato MXML. Esse processo é simples e rápido, pois basta selecionar o formato de entrada (CPN Tools), o formato de saída (MXML), o local onde os arquivos estão disponíveis (origem) e onde o novo arquivo será salvo (destino). Uma vez que o arquivo “.mxml” tenha sido criado, consegue-se utilizá-lo para extração de conhecimento do processo.

4.4 TOMADA DE DECISÃO

Nesta seção será mostrado o procedimento para cálculo dos indicadores a serem selecionados na seção 5.1 assim como para escolha do melhor cenário gerado pela simulação. Os indicadores calculados estão diretamente relacionados com o modelo de simulação e tem caráter quantitativo, para complementar a tomada de decisão será utilizado métodos MCDM para coletar as informações qualitativas e chegar a uma escolha de cenários.

4.4.1 Cálculo de indicadores

A intenção neste trabalho é utilizar a Norma Europeia (EN 15341: 2007) e seus indicadores da MI como referência para que seja possível verificar um melhor cenário previamente simulado conforme modelo CPN a ser estruturado. São três grupos de indicadores e cada grupo apresenta três níveis, no qual estas subclasses podem não ser utilizadas conforme critério dos gestores da manutenção.

A descrição dos níveis e sua abrangência podem ser visualizados no Quadro 18, no qual a primeira coluna representa os grupos de indicadores, a segunda coluna diz respeito a sua abrangência ou o que representa dentro do contexto industrial. Por fim, a terceira coluna traz de forma mais detalhada os três níveis orientando para questões de decisões específicas em uma determinada área, grupo de pessoas, máquina, matérias ou tipo de manutenção.

Grupo de indicadores	Abrangência	Especificação		
		Nível 1	Nível 2	Nível 3
Econômico	Custos	Custos (global)	Recursos (humanos e materiais)	Tipos de manutenção (política)
Técnico	Operacional (operação)	Quantidade de falhas	Duração de falhas	MTTR e MTBF
Organizacional	Mão de Obra	Recursos totais	Produtividade	Relacionado aos tipos de manutenção

Quadro 18 – Níveis dos indicadores da Norma Europeia EN 15341: 2007.

Fonte: Adaptado de EN 15341: 2007.

Cada nível descrito no Quadro 18 é composto por vários indicadores (conforme anexo 1) e as fórmulas de cálculo apresentadas foram inseridas em uma planilha do Excel. Após a simulação dos 5 cenários propostos será utilizado as ferramentas de mineração de processos para extrair as novas informações que foram geradas seguindo a sequência de informações do Quadro 15 e Apêndice 1.

A Tabela 4 mostra as informações já vistas nos Quadros 15 e 16, necessários para o cálculo dos indicadores a serem selecionados na seção 5.1 deste trabalho. Cada informação deverá apresentar seus respectivos valores para cada cenário, neste caso observa-se que constituem valores provenientes da mineração de processos (baixo nível) após as simulações e também informações disponíveis do sistema de informação da empresa os quais podem estar vinculados a outros departamentos como financeiro e recursos humanos por exemplo.

Tabela 4 – Extrato da descrição dos valores das informações para cada cenário.

Informação	C1	C2	C3	C4	C5
1 Custo total de manutenção	-	-	-	-	-
9 Custo interno total de pessoal gasto em manutenção	-	-	-	-	-
15 Custo de manutenção corretiva	-	-	-	-	-
16 Custo de manutenção preventiva	-	-	-	-	-
17 Custo de manutenção baseado em condições	-	-	-	-	-
20 Custo de paradas de manutenção	-	-	-	-	-
21 Custo de treinamento para manutenção	-	-	-	-	-
22 Número de pessoal de manutenção	-	-	-	-	-

Continua

Informação	Conclusão				
	C1	C2	C3	C4	C5
26 Tempo total de operação	-	-	-	-	-
27 Tempo de inatividade devido a manutenção	-	-	-	-	-
35 Tempo de inatividade relacionado a falhas	-	-	-	-	-
36 Tempo de inatividade total relacionado à manutenção	-	-	-	-	-
38 Tempo de manutenção preventiva causando tempo de inatividade	-	-	-	-	-
39 Tempo de manutenção preditiva que causa tempo de inatividade	-	-	-	-	-
42 Número total de falhas	-	-	-	-	-
50 Horas de trabalho usadas para planejamento de manutenção	-	-	-	-	-
51 Total de horas de pessoal de manutenção	-	-	-	-	-
53 Tempo total para restauração	-	-	-	-	-
63 Horas de trabalho usadas para melhoria contínua	-	-	-	-	-
66 Tempo de manutenção corretiva	-	-	-	-	-
71 Homem-horas de manutenção corretiva	-	-	-	-	-
72 Homem-horas de manutenção preventiva	-	-	-	-	-

Fonte: O autor 2019.

Observa-se que são 5 simulações (cenários) conforme estabelecido no item 4.4.3 e para cada uma usa-se ferramentas de mineração de processos para extrair informações úteis. Algumas informações provenientes do sistema interno mesmo com valores diferentes apresentados pela simulação, podem apresentar o mesmo valor, é o caso do item 21 da Tabela 4.

De posse dos valores gerados para os cenários C1 a C5 é possível calcular os indicadores conforme grupos mostrados no Quadro 18 e Anexo 1. Após os cálculos realizados, os indicadores serão expostos em uma tabela mostrando os valores de cada indicador para cada cenário e também uma demonstração de melhora ou piora. Um esboço do painel de indicadores pode ser visualizado na Tabela 5.

A partir dos indicadores gerados na Tabela 5 o gestor de manutenção poderá verificar se um indicador teve um desempenho positivo, negativo ou permaneceu constante devido a uma decisão ou um parâmetro alterado. Neste caso tem-se o cenário C1 representando a situação real e os demais cenários simulados, sendo que cada um destes últimos apresentando indicativo de desempenho em relação ao primeiro.

Tabela 5 – Esboço dos Indicadores a serem calculados.

Indicadores Econômicos									
Indicador	Cenários								
	C1		C2		C3		C4		C5
E8	60,00	⇒	60,00	⇒	60,00	⇒	60,00	⇒	60,00
E15	40,00	↑	46,67	↑	53,33	↑	60,00	↑	66,67
E16	60,00	↓	53,33	↓	46,67	↓	43,33	↓	40,00
E17	20,00	↑	26,67	↑	33,33	↑	40,00	↑	46,67
E20	33,33	↑	40,00	↑	46,67	↑	53,33	↑	60,00
E21	2000,00	↑	2500,00	↑	3000,00	↑	3500,00	↑	4000,00
Indicadores Técnicos									
T1	98,32	↓	96,59	↓	95,17	↓	98,31	↓	96,47
T6	99,44	↓	98,55	↓	95,44	↑	99,71	↓	96,19
T8	12,50	↓	11,76	↓	9,09	↑	28,57	↑	12,50
T9	12,50	↓	11,76	↓	6,06	↑	14,29	↓	8,33
T17	10,06	↓	8,10	↑	11,96	↑	18,37	↑	10,58
T19	1,14	↓	0,97	↓	0,57	↑	1,89	↓	0,85
T21	10,00	↑	10,71	↓	8,93	↑	11,74	↓	8,71
Indicadores Organizacionais									
O8	0,009	↑	0,019	↑	0,009	↑	0,011	↑	0,021
O11	62,50	↓	47,06	↓	21,21	↑	142,86	↓	37,50
O16	0,36	↑	0,65	↑	0,50	↑	0,95	↑	0,64
O17	1,78	↑	3,25	↑	1,99	↑	3,79	↑	2,56
O18	5,33	↑	9,74	↓	3,98	↑	10,89	↑	6,82

Fonte: O autor 2019.

Esta análise é possível, mas pode parecer um pouco confusa e demorada pois um cenário diferente poderá acarretar em alterações dos valores de diversos indicadores fazendo com que o responsável direto tenha dificuldades em identificar qual cenário é considerado mais adequado. Neste caso sugere-se a utilização de métodos MCDM que consiga utilizar os valores dos indicadores calculados em conjunto com o conhecimento tácito da equipe de manutenção.

4.4.2 Priorização de cenários

Após a seleção dos indicadores tem-se uma quantidade de indicadores considerados importantes, o próximo passo é utilizar novamente a opinião dos especialistas de manutenção para a priorização (escolha) de cenários. Duas atividades serão necessárias, a primeira será determinar os pesos de cada indicador utilizando o método AHP e a segunda, verificar qual cenário deve ser priorizado utilizando o método PROMETHEE.

Para determinar os pesos dos indicadores, considerou-se o método AHP mais adequado, pois consegue fazer uma avaliação par a par dos indicadores. A princípio todos os critérios e alternativas são comparados entre si de tal forma que o resultado final apresente os pesos (distribuição percentual) dos indicadores, sendo esta informação parte relevante e essencial nas próximas etapas.

Para a aplicação do método AHP e análises será utilizado o software Super Decisions o qual irá apresentar uma estrutura hierárquica implementada conforme pode visto na Figura 39, o qual performará as avaliações “par a par” entre os critérios e alternativas. Os critérios estão distribuídos nos três grupos de acordo com a EN 15341:2007 e as alternativas correspondem aos indicadores selecionados na etapa anterior, sendo que cada indicador está interligado com um dos critérios apresentados.

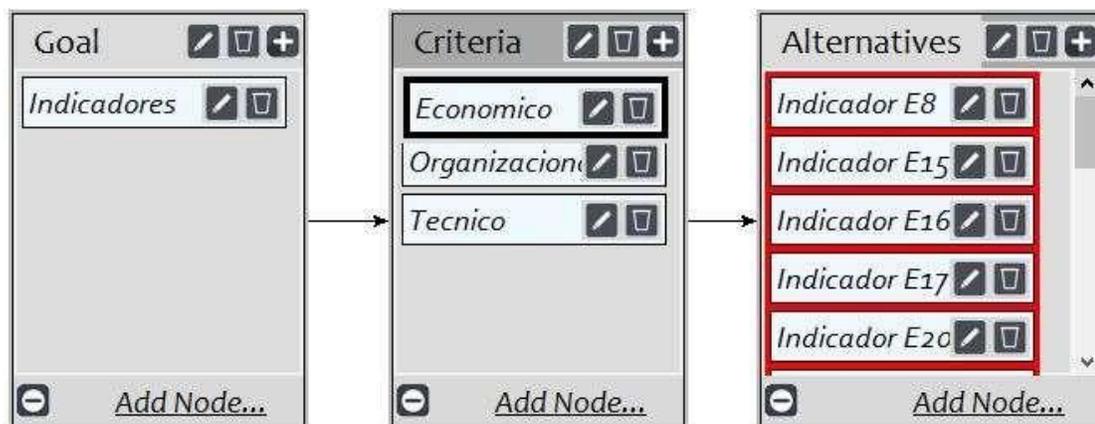


Figura 39 – Classificação de dos indicadores: método AHP (software Super Decisions).

Fonte: O autor 2019.

Após estabelecer a estrutura hierárquica, face as comparações “par a par” entre os elementos, na primeira parte é feita a comparação entre o node “Indicadores” com todos os nodes do cluster “Criteria”, a questão a ser avaliada é o nível de preferência atribuído pelos especialistas. Conforme pode ser visto na Figura 40, na primeira linha compara-se os grupos de indicadores econômico e organizacional, neste caso a intenção é verificar o nível de preferência dos especialistas quanto a comparação par a par de cada uma das linhas.

The screenshot displays the AHP software interface. The top navigation bar includes 'Network', 'Judgments', and 'Ratings'. The main window is divided into three panels:

- 1. Choose:** Shows 'Node Cluster' with 'Economico' selected and 'Cluster: Goal'.
- 2. Node comparisons with respect to Indicadores:** Shows a comparison between 'Economico' and 'Organizacional' with a rating of 9. Below this is a 3x9 comparison matrix.

1. Economico	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Organizacion~
2. Economico	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Tecnico
3. Organizacional	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Tecnico
- 3. Results:** Shows a table of weights and an inconsistency value of 0.02365.

Economico	0.33307
Organizacional	0.09739
Tecnico	0.56954

Figura 40 – Análise par a par “Goal” e “Criteria”.

Fonte: O autor 2019.

Na segunda parte, conforme Figura 41, é apresentada as comparações “par a par” entre os nodes do cluster “Criteria” com os nodes do cluster “Alternatives”, a questão a ser avaliada é o nível de importância atribuído pelos especialistas. Pelo fato de os indicadores serem comparados dentro de cada grupo, foi considerado a questão “importância” mais adequada para o julgamento.

The screenshot displays the AHP software interface for pairwise comparisons within the 'Economico' cluster. The main window is divided into three panels:

- 1. Choose:** Shows 'Node Cluster' with 'Economico' selected and 'Cluster: Criteria'.
- 2. Node comparisons with respect to Economico:** Shows a comparison between 'Indicador E8' and 'Indicador E15' with a rating of 9. Below this is a 15x9 comparison matrix.

1. Indicador E8	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Indicador E1~
2. Indicador E8	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Indicador E1~
3. Indicador E8	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Indicador E1~
4. Indicador E8	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Indicador E2~
5. Indicador E8	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Indicador E2~
6. Indicador E1~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Indicador E1~
7. Indicador E1~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Indicador E1~
8. Indicador E1~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Indicador E2~
9. Indicador E1~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Indicador E2~
10. Indicador E1~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Indicador E1~
11. Indicador E1~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Indicador E2~
12. Indicador E1~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Indicador E2~
13. Indicador E1~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Indicador E2~
14. Indicador E1~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Indicador E2~
15. Indicador E2~	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	Indicador E2~
- 3. Results:** Shows a table of weights and an inconsistency value of 0.02554.

Indicador~	0.14047
Indicador~	0.05458
Indicador~	0.20365
Indicador~	0.08549
Indicador~	0.47775
Indicador~	0.03807

Figura 41 – Análise par a par dos indicadores do grupo “econômico”.

Fonte: O autor 2019.

Esses procedimentos devem ser realizados em todos os níveis e em todos os critérios, visto que o resultado final do método AHP pondera todas as avaliações,

sintetizando e apresentando as alternativas com seus respectivos valores (preferências). Considerando a estrutura hierárquica apresentada, ao total, 4 telas distintas será apresentada ao usuário, sendo que uma delas diz respeito a preferência entre os grupos de indicadores e as outras três estão relacionadas ao grau de importância de cada indicador.

Após as comparações, é possível verificar a sensibilidade entre os elementos, para esta tarefa serão utilizados alguns plug-ins disponíveis no software Super Decisions. Primeiro será utilizado o plugin “AHP sensitivity”, esta opção apresenta um gráfico de linhas no qual o eixo x refere-se aos valores das prioridades do critério “técnico”, o eixo y refere-se aos valores das prioridades das alternativas.

Outra forma de visualizar a sensibilidade é com o plugin “ANP sensitivity”, escolhendo a opção “Horz Barchart”. Esta opção mostra por meio de um gráfico de barras as alterações nos valores dos indicadores ao passo que se altera a prioridade do critério “técnico. Esta é uma opção mais interativa na qual todas as alternativas podem ser visualizadas de imediato assim como as alterações de seus valores.

O software Super Decisions, por meio do plugin “synthesized” também sintetiza as comparações em uma única tabela, exibindo as alternativas (indicadores) e suas respectivas preferências que são representadas pelos valores exibidos na coluna “Normals”. Tais valores são considerados os pesos dos indicadores para as demais avaliações MCDM.

Após definir os pesos de cada indicador, a próxima atividade é determinar a priorização dos cenários, optou-se pela escolha do método PROMETHEE pois permite que as avaliações sejam do tipo quali-quantitativo, fator este que torna a tomada de decisão mais robusta. O conhecimento tácito (qualitativo) dos especialistas de manutenção foi necessário para selecionar os indicadores por meio do método TOP SIS e também foi utilizado para a comparação par a par dos indicadores selecionados por meio do método AHP. A questão quantitativa é resultado do cálculo dos indicadores realizado por meio de informações originadas na simulação.

Para identificar o melhor cenário será utilizado o software Visual Promethee, o uso deste programa é simples, intuitivo e de fácil compreensão do resultado, pois os mesmos podem ser apresentados de diversas maneiras, de modo a adequar a saída conforme necessidade do grupo envolvido. O programa atribui cores aos valores inseridos, onde o verde representa o melhor valor, o vermelho o pior valor e preto os valores intermediários.

O resultado pode ser visualizado de forma gráfica por meio do plugin "GAIA Visual Analysis", esta opção permite ver os resultados de maneira não precisa na qual se houver duas alternativas com valores semelhantes, ficaria difícil de identificar a melhor. Para ajudar nesta questão será utilizado o plugin "Walking Weights" o qual apresenta de maneira mais precisa a priorização das alternativas, assim como mostra a questão de sensibilidade quanto as mudanças de valores dos critérios.

Outra forma de apresentar os resultados, é por meio do plugin "PROMETHEE Rankings", este plugin será utilizado para mostrar o ranqueamento final das alternativas da melhor para a pior escolha, neste trabalho o melhor cenário é aquele que apresenta o melhor desempenho. Por último será utilizado o plugin "PROMETHEE Flow Table" que mostrará em forma de tabela a ordenação dos cenários assim como seus respectivos valores.

4.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE O FRAMEWORK PROPOSTO

A abordagem proposta visa trabalhar com a mineração de processos e a simulação em conjunto para que seja possível ao final, calcular indicadores de desempenho na MI previstos na Norma Europeia (EN 15341:2007) e que juntamente com a opinião dos especialistas de manutenção se consiga identificar a alternativa mais adequada dentre várias analisadas. O modelo CPN de Pierezan (2011) será utilizado pois apesar de apresentar uma estrutura simples com poucas atividades, no qual o objetivo era apenas calcular o indicador de eficiência global OEE (Overall Equipment Effectiveness), pode servir como uma base de modelagem.

A Figura 42 mostra as diferenças básicas entre o modelo CPN de Pierezan (2011) e o modelo a ser estruturado neste trabalho o qual também será modelado em CPN com a utilização do software CPN Tools. Este software permite modelar, simular e gerar logs de eventos com os dados simulados, os dados gerados no arquivo podem ser utilizados por ferramentas de mineração de processos.

O modelo proposto irá ter uma estrutura mais complexa para permitir o cálculo de indicadores a serem selecionados por meio de um método MCDM e que estão previstos na Norma Europeia (EN 15341:2007), observa-se que a intenção é também possibilitar que cenários sejam simulados. Do ponto de vista de tomada de decisão a abordagem proposta visa expor duas maneiras para lidar com indicadores calculados. Uma delas visa permitir que o tomador de decisão consiga interagir com o ambiente

no qual está inserido, permitindo uma visualização mais simplista das ações feitas e resultados alcançados, basicamente é verificar subjetivamente a mudança realizada e a observação do comportamento dos indicadores, utilizando seu conhecimento prático como principal recurso.

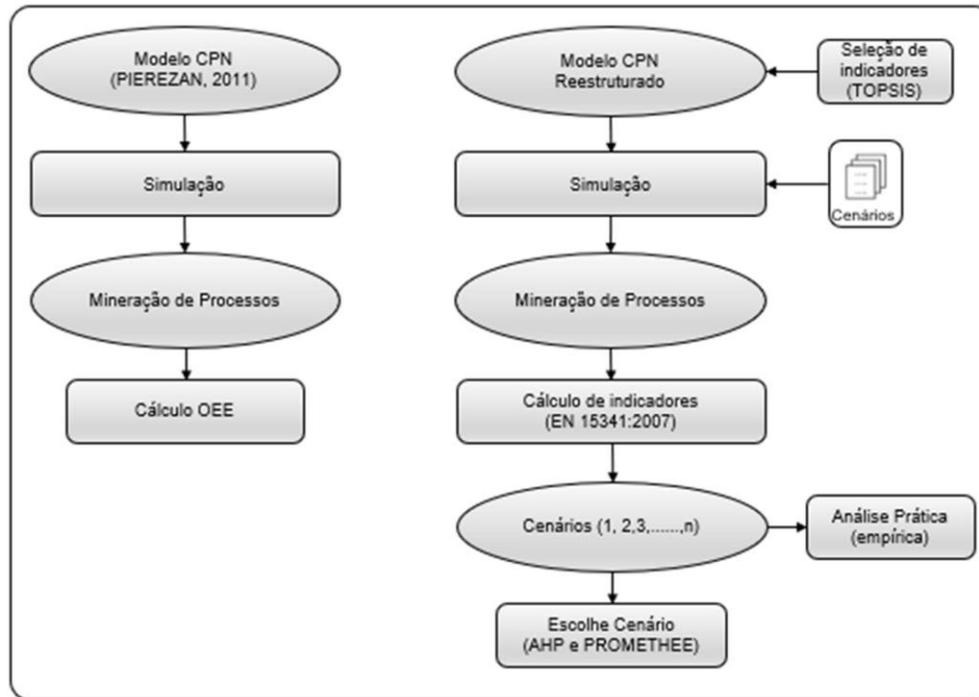


Figura 42 – Esboço da estrutura de Pierozan 2011 e proposta deste trabalho.

Fonte: O autor 2019.

Outra maneira é utilizar métodos MCDM (Multi-Criteria Decision Making) para selecionar o melhor cenário simulado, neste caso a intenção é utilizar o Método Analítico Hierárquico AHP e o método PROMETHEE. Espera-se com esta abordagem, auxiliar o gestor de manutenção no gerenciamento da MI, permitindo visualizar diversas opções ou cenários que lhe de uma melhor perspectiva futura.

5 RESULTADOS

Devido à grande quantidade de indicadores previstos na EN 15341:2007 que tornam o modelo de simulação e a análise extremamente complexos, optou-se neste estudo pela utilização do conhecimento de uma equipe de manutenção de uma empresa industrial para selecionar os indicadores mais importantes. Desta maneira com o modelo de simulação estruturado para atender aos indicadores selecionados que estão relacionados na Norma Europeia (EN 15341: 2007), é possível calcular os indicadores previstos e depois mostrar por meio de uma metodologia MCDM, qual melhor decisão a ser tomada pelos gestores da MI.

Além dos indicadores quantitativos calculados com base nos resultados da simulação, é interessante observar também que a experiência dos responsáveis pela manutenção em uma empresa também é importante para a tomada de decisão. Neste caso sugere-se inserir o aspecto qualitativo por meio da aplicação de métodos MCDM, esta questão envolve a aplicação da experiência prática em uma tomada de decisão.

Portanto para ser possível alcançar os resultados esperados, primeiro foi utilizado o método TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution) para selecionar os indicadores mais importantes do ponto de vista dos gestores de manutenção. Na sequência foi utilizado o método AHP por meio do software Super Decisions para estimar os pesos para cada indicador.

Com base nos indicadores selecionados estrutura-se o modelo de simulação no CPN Tools, na sequência utiliza-se as ferramentas de mineração de processos para extrair os dados da simulação. Os dados são estruturados e calculados por meio do software Excel com dados simulados e também com informações do sistema de informação interno da empresa envolvida neste estudo. Por último foi aplicado o método PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) por meio do software Visual Promethee para a selecionar o melhor cenário estabelecido pela equipe de manutenção.

5.1 MINERAÇÃO DE PROCESSOS

A mineração de processos foi utilizada em dois momentos neste trabalho conforme foi apresentado nas figuras 31 e 32, primeiro foi necessária para extrair o modelo real do processo e demais dados estatísticos. Depois foi utilizada novamente

para demonstrar os dados provenientes das simulações realizadas no software CPN Tools, os resultados apresentados nesta seção seguirão a sequência de passos vistos na seção 4.2 apresentado também as informações geradas com as simulações.

Dentre os algoritmos utilizados estão o *Genetic Algorithm Plugin*, do ProM o qual consegue descobrir as atividades e caminhos percorridos pelas instâncias no registro de eventos. Também em paralelo utilizou-se o *Fuzzy Miner*, do Disco® verificar e complementar as informações do *Genetic Algorithm Plugin*, os resultados da execução do *plug-in Genetic Algorithm* e *Fuzzy Miner* são apresentados nas Figuras 43 e 44 respectivamente.

Como pode ser observado, estes algoritmos recriam as atividades do processo, exibindo a frequência (em valores absolutos) que estas estiveram ativas e exibe o modelo de forma gráfica. O grau de confiabilidade das avaliações pode ser medido por meio do índice fitness do *plug-in Genetic Algorithm*, o qual representa o quão próximo o modelo descoberto está dos eventos armazenados (modelo simulado/real).

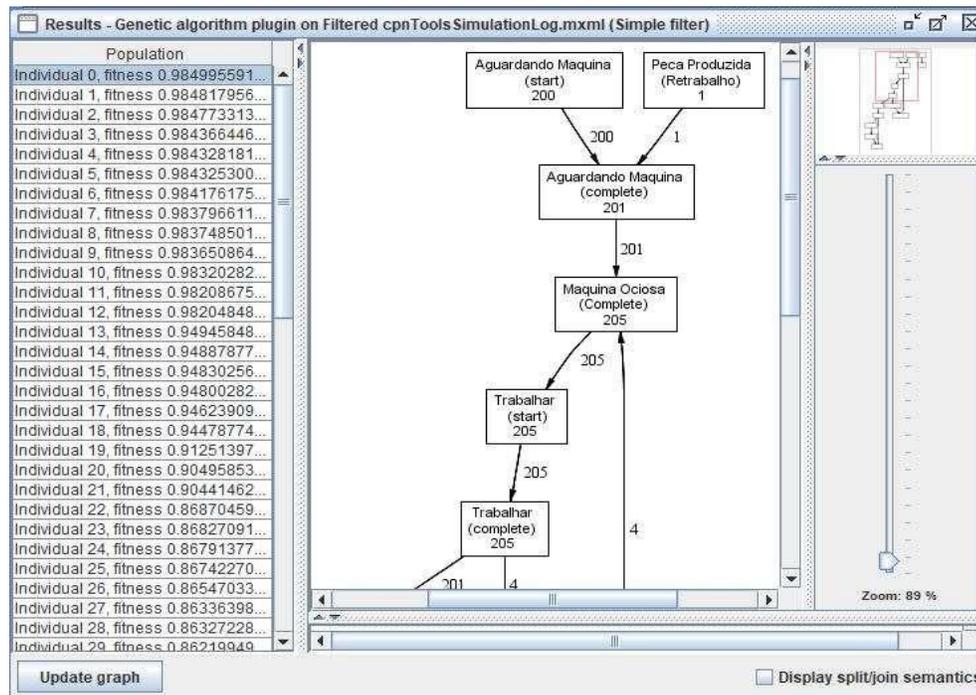


Figura 43 - Informações de cada máquina referente ao *plug-in Genetic Algorithm*.

Fonte: O autor 2020.

Ao se analisar um modelo é importante que ele consiga representar um cenário mais próximo possível da realidade, neste caso com a utilização do *plug-in Genetic Algorithm* foi possível identificar para cada máquina um modelo com um maior grau

de confiança, o qual pode ser representado com o maior *fitness*, que corresponde o maior valor apresentado na Figura 43 (sempre será o indivíduo de índice zero), isto quer dizer que o modelo selecionado apresenta um grau de confiabilidade (i.e., similaridade à realidade) de 98,847%.

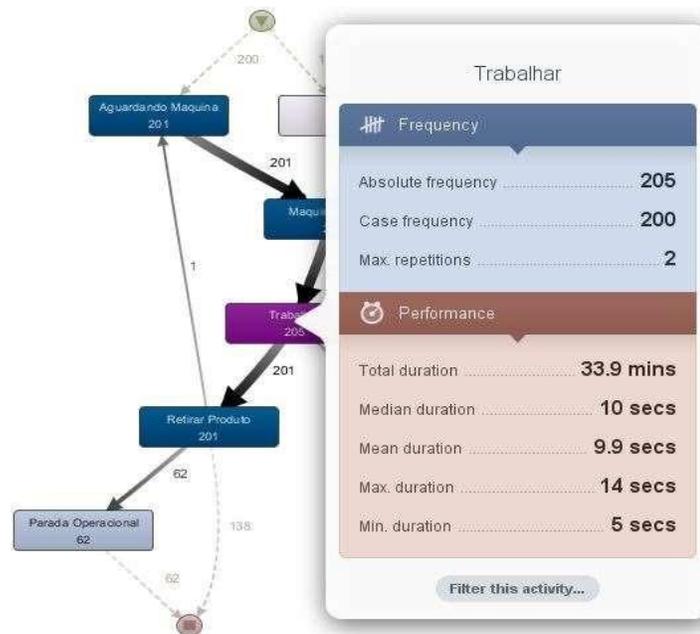


Figura 44 - Modelo *Fuzzy Miner* de cada máquina.

Fonte: O autor 2020.

Esse procedimento de execução do *plug-in Genetic Algorithm* e seleção do modelo de maior *fitness* resultou na visualização de outras informações necessárias para ajudar no cálculo dos indicadores, as quais podem ser vistas na Tabela 6. Para esta demonstração foi realizada 5 simulações (cenários), cada uma delas representa uma máquina que irá produzir 200 peças cada, a diferença entre as peças solicitadas e peças boas configura-se em peças descartadas ou refugos.

Tabela 6 – Informações do *plug-in Genetic Algorithm*.

Cenário	Fitness	Produzido	Paradas	Retrabalho	Peças boas	Falhas
1	0,9849955915267924	201	62	1	200	4
2	0,9864363830173061	203	75	3	199	3
3	0,9884747728701807	201	68	1	198	6
4	0,9876383443028522	200	67	0	200	8
5	0,9903545522099173	201	75	1	199	5

Fonte: o autor 2020.

Observa-se até o momento que as ferramentas de mineração de processo proporcionam informações importantes para o cálculo dos indicadores da MI já comentados neste trabalho, mas é preciso utilizar outros plug-ins que para complementar as informações necessárias. É comum muitos destes plug-ins trazerem informações repetidas, mas que são necessárias para atingir sua finalidade.

Outro plug-in a ser utilizado é o *Basic Log Statistics* do software ProM, este algoritmo apresenta ao usuário as atividades, suas durações (valor mínimo, máximo, médio e total) e a quantidade absoluta de medidas realizadas (i.e., disparo da respectiva tarefa). A Figura 45 apresenta as informações do plugin para o cenário 1, da mesma forma que o plug-in anterior, este procedimento foi executado para os cinco cenários.

Activity	Minimum (in Minutes)	Maximum (in Minutes)	Arithmetic Mean (in Minutes)	Standard Deviation	Geometric Mean	Sum (in Minutes)	No. of Measurements
Aguardando Maquina	10.45	193.25	102.88283582089552	3402.135680584252	4931.805515814579	20679.45	201.0
Falha durante o trabalho	1.6166666666666667	6.733333333333333	3.5375	134.7030685124384	184.46612417698347	14.15	4.0
Parada Operacional	0.2	2.75	0.7965053763440862	38.131410870517286	36.50901352400734	49.38333333333333	62.0
Retirar Produto	0.16666666666666666	1.0333333333333334	0.32985074626865696	9.001450960983181	18.17629471225012	66.3	201.0
Setup	10.433333333333334	10.433333333333334	10.433333333333334	0.0	625.9999999999999	10.433333333333334	1.0
Trabalhar	0.08333333333333333	0.23333333333333334	0.16536585365853648	1.5415029900058692	9.795981230661578	33.9	205.0

Figura 45 – Aplicação do plugin *Basic Log Statistics*.

Fonte: O autor 2020.

Os dados estatísticos são de grande importância pois são utilizados de maneira direta no cálculo dos indicadores de manutenção, assim como no *plugin Basic Log Statistics* do software ProM, o minerador estatístico do software Disco® também possui informações como: tipo de atividade, frequência, duração, média, início e fim e outras. A figura 46 apresenta o software Disco® o qual também possui filtros que podem detalhar as informações a respeito de atividades, turnos de trabalho, funcionários, equipes, etc., ou seja, permite uma visão abrangente de todos os eventos constantes no log.

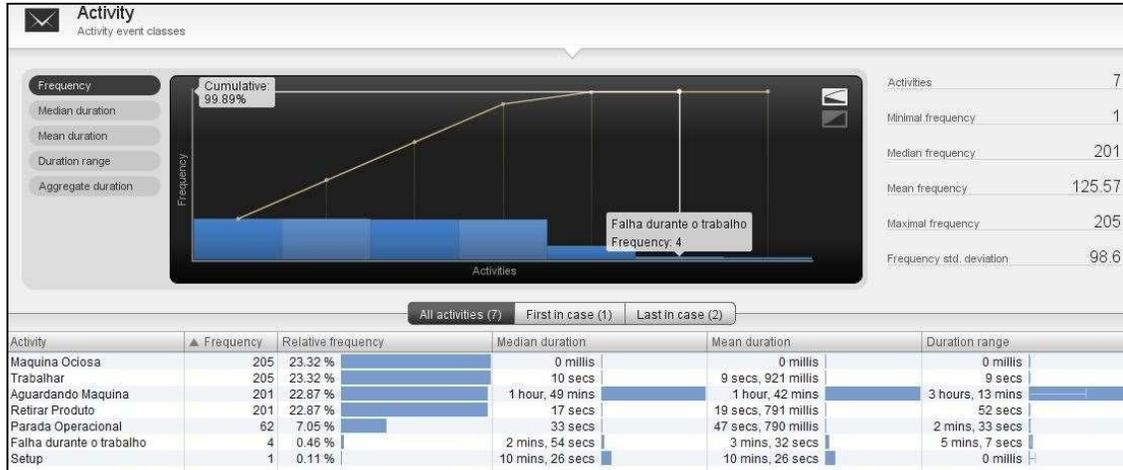


Figura 46 – Minerador estatístico do Disco®.

Fonte: O autor 2020.

Outro plugin utilizado para estruturar a base de informações é o *Fuzzy Miner*, Figura 47, do software ProM, o qual apresenta o comportamento do processo e utiliza a frequência, a qual varia de 0 a 1, como parâmetro de referência. Com esse plug-in o usuário pode alterar o limite de corte relacionado à frequência das atividades, ou seja, modificando o nível de significância, consegue-se exibir o modelo descoberto com mais ou menos detalhes (atividades).

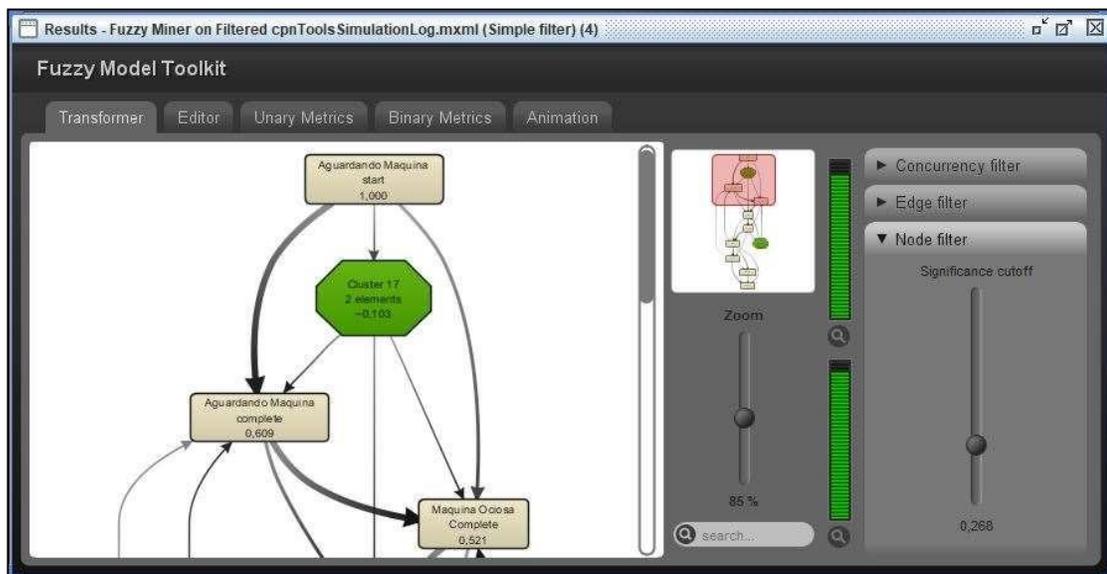


Figura 47 – Informações plugin *Fuzzy Miner*.

Fonte: O autor 2020.

Adicionalmente, ainda é possível observar o caminho percorrido pelas instâncias e o tempo de duração em cada atividade de forma animada, permitindo que a visualização seja mais intuitiva, didática e dinâmica. Para complementar a base de informações utilizou-se o *plugin Heuristics Miner*, visto da Figura 48, que apresenta informações já vistas em outros plug-ins, como o *Fuzzy Miner*, no qual considera a frequência das relações entre cada par de atividades, mostrando no gráfico as questões de dependência.

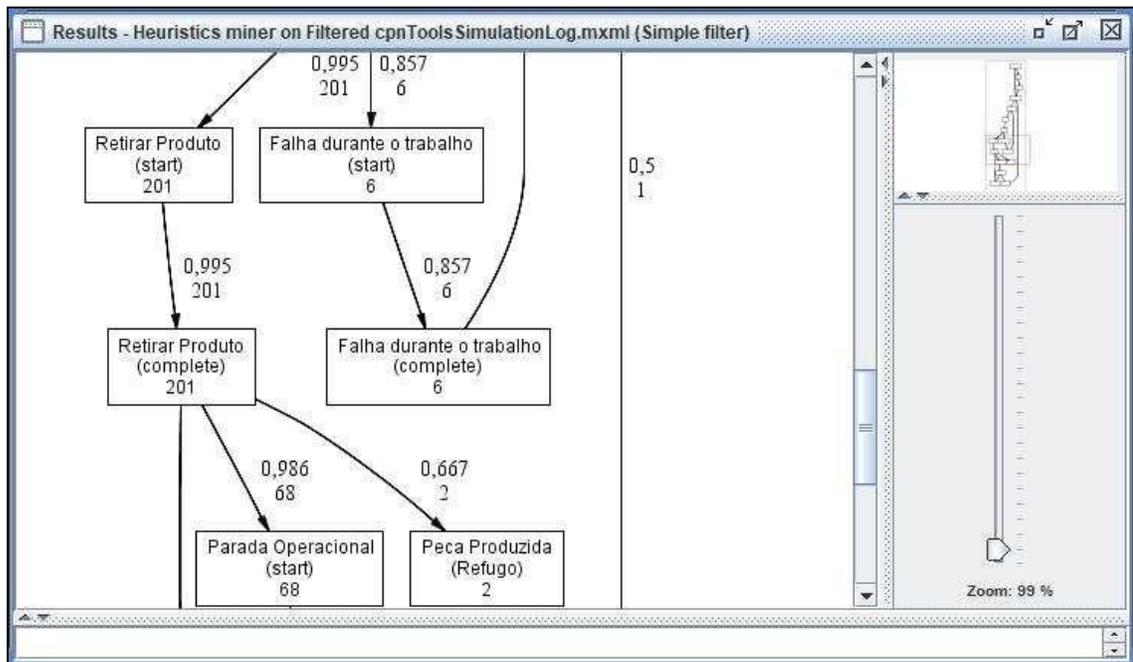


Figura 48 – Utilização do *plugin Heuristics Miner*.

Fonte: O autor 2020.

Como foi verificado, diversos são os resultados extraídos do log de eventos com o software ProM, cada um apresentando as saídas de forma a adaptarem-se ao contexto desse trabalho. No entanto, o fator de maior relevância ao utilizar os plug-ins é o nível de conhecimento obtido com as análises de mineração de processos, o qual permite que os usuários (operadores e/ou analistas) consigam ter visibilidade do processo sob análise, seja em relação ao comportamento e rota das instâncias, ou no que diz respeito ao tempo e duração das atividades.

5.2 MODELAGEM E SIMULAÇÃO

5.2.1 Seleção de indicadores

Como instrumento para a seleção dos indicadores da MI vistos no Anexo 1, foi utilizado o método TOPSIS, cada integrante da equipe de manutenção atribuiu para cada indicador um peso de 1 a 10 com relação a sua importância no contexto da manutenção. Foi utilizado uma equipe de manutenção que atua em uma indústria de grande porte, cinco especialistas foram selecionadas considerando-se tempo de experiência prática na área e na empresa e também nível capacitação.

Tabela 7 – Composição da equipe de manutenção.

Especialista	Experiência área (anos)	Experiência empresa (anos)	Nível capacitação
1	25	23	Especialização
2	26	15	Graduação
3	18	12	Especialização
4	19	10	Graduação
5	10	6	Mestrado

Fonte: O autor 2019.

A Tabela 7 mostra uma breve síntese da equipe utilizada neste estudo, optou-se por priorizar os que apresentavam maior tempo de experiência na empresa, mas também buscou-se incluir pelo menos 1 integrante com titulação mínima de mestrado, caso houver. A capacitação relacionada aos cursos ou treinamentos internos ou externos não foram relacionados, mas foram considerados para a escolha dos integrantes.

A Tabela 8 apresenta um extrato e o Apêndice 3 a descrição completa da matriz de decisão preenchida com as avaliações dos especialistas de manutenção. Na coluna “indicadores” estarão dispostos todos os indicadores previstos na Norma Europeia (EN 15341:2007) os quais representam as alternativas, nas colunas “especialistas” serão relacionados a quantidade de pessoas que fazem parte da equipe de manutenção da empresa a ser analisada.

Tabela 8 – Matriz de decisão.

Indicadores	Esp 1	Esp 2	Esp 3	Esp 4	Esp 5
E1	7	7	6	8	6
E2	3	4	4	5	2
E3	5	5	6	4	5
E4	7	6	6	5	8
E5	8	7	8	6	6
E6	8	7	7	8	8
E7	4	5	3	5	2
E8	9	8	9	9	9
E9	4	3	3	4	2
E10	3	4	5	5	3
E11	7	5	7	6	6
E12	2	3	2	1	2
E13	4	4	5	3	3
E14	1	2	2	1	3
E15	8	9	8	9	9
E16	9	10	9	9	8
E17	9	9	9	8	8
E18	7	7	6	9	6
E19	6	8	5	9	7
E20	10	9	9	10	10
E21	8	8	8	9	9
E22	5	6	6	4	7
E23	5	7	6	7	7
E24	4	3	2	2	2

Fonte: O autor 2019.

Para que a comparação entre as alternativas seja significativa, é realizada a normalização para transformar os dados em uma escala comum, conforme extrato apresentado na Tabela 9 e descrição completa no Apêndice 4. Considerando que todos os indicadores (no exemplo em questão, os especialistas), têm a necessidade de serem avaliados linearmente, foi considerado o mesmo peso para cada índice na realização do cálculo da ponderação, pois foi considerado que não existe diferença de peso entre os especialistas.

Tabela 9 – Matriz normalizada e ponderada.

Pesos	1	1	1	1	1
Indicadores	Esp 1	Esp 2	Esp 3	Esp 4	Esp 5
E1	0,13154	0,13233	0,11069	0,14107	0,10997
E2	0,05637	0,07562	0,0738	0,08817	0,03666
E3	0,09396	0,09452	0,11069	0,07053	0,09164
E4	0,13154	0,11343	0,11069	0,08817	0,14662
E5	0,15033	0,13233	0,14759	0,1058	0,10997
E6	0,15033	0,13233	0,12914	0,14107	0,14662
E7	0,07516	0,09452	0,05535	0,08817	0,03666
E8	0,16912	0,15124	0,16604	0,1587	0,16495
E9	0,07516	0,05671	0,05535	0,07053	0,03666
E10	0,05637	0,07562	0,09225	0,08817	0,05498
E11	0,13154	0,09452	0,12914	0,1058	0,10997
E12	0,03758	0,05671	0,0369	0,01763	0,03666
E13	0,07516	0,07562	0,09225	0,0529	0,05498
E14	0,01879	0,03781	0,0369	0,01763	0,05498
E15	0,15033	0,17014	0,14759	0,1587	0,16495
E16	0,16912	0,18905	0,16604	0,1587	0,14662
E17	0,16912	0,17014	0,16604	0,14107	0,14662
E18	0,13154	0,13233	0,11069	0,1587	0,10997
E19	0,11275	0,15124	0,09225	0,1587	0,12829
E20	0,18791	0,17014	0,16604	0,17634	0,18328
E21	0,15033	0,15124	0,14759	0,1587	0,16495
E22	0,09396	0,11343	0,11069	0,07053	0,12829
E23	0,09396	0,13233	0,11069	0,12344	0,12829
E24	0,07516	0,05671	0,0369	0,03527	0,03666

Fonte: O autor 2019.

A Tabela 10 apresenta um extrato e o Apêndice 5 a descrição completa do ranking dos indicadores de acordo com os pesos estabelecidos pelos especialistas de manutenção, neste caso gera-se um coeficiente que estabelecerá a ordem dos indicadores a serem selecionados. Verifica-se que os indicadores que apresentam coeficiente “C” maiores são considerados como mais importantes ou como aqueles que estão alinhados com a opinião dos especialistas. No que diz respeito a quantidade de indicadores a serem selecionados, isto depende dos interesses ou exigência dos especialistas podendo estabelecer uma quantidade máxima a serem trabalhados ou poderão estabelecer um valor de corte atrelado ao coeficiente.

Tabela 10 – Extrato do Ranking dos indicadores pelo método TOPSIS.

Indicadores	D+	D ⁻	C	Rank
E1	1,35863E-01	2,40253E-01	0,63877	
E2	2,67757E-01	1,14032E-01	0,29868	
E3	2,06882E-01	1,67482E-01	0,44738	
E4	1,53165E-01	2,27136E-01	0,59725	
E5	1,27829E-01	2,51034E-01	0,66260	
E6	1,01389E-01	2,72246E-01	0,72864	
E7	2,59993E-01	1,24775E-01	0,32429	
E8	5,26300E-02	3,21393E-01	0,85929	3
E9	2,82125E-01	9,54120E-02	0,25272	
E10	2,50821E-01	1,28038E-01	0,33796	
E11	1,59768E-01	2,16460E-01	0,57534	
E12	3,29514E-01	4,95881E-02	0,13080	
E13	2,56482E-01	1,20116E-01	0,31895	
E14	3,38976E-01	4,51819E-02	0,11761	
E15	6,14667E-02	3,13452E-01	0,83605	5
E16	4,84567E-02	3,31197E-01	0,87237	2
E17	6,03182E-02	3,14566E-01	0,83910	4
E18	1,32385E-01	2,49771E-01	0,65358	
E19	1,37560E-01	2,52546E-01	0,64738	
E20	2,64153E-02	3,54477E-01	0,93065	1
E21	6,96444E-02	3,04781E-01	0,81400	6
E22	1,84957E-01	1,94898E-01	0,51308	
E23	1,52682E-01	2,24303E-01	0,59499	
E24	3,05625E-01	7,47983E-02	0,19662	

Fonte: O autor 2019.

Para este estudo foi estipulado que os indicadores com coeficientes $\geq 0,80$ seriam selecionados pois mostram grande importância para a manutenção do ponto de vista dos especialistas. Conforme observado na Tabela 9 seis indicadores que compõem o grupo “econômico” foram selecionados, o indicador E20 se destaca por apresentar coeficiente acima de 0,90 considerado neste caso como o principal ponto de controle para os especialistas.

O apêndice 6 esboça também os grupos “técnico” e “organizacional”, neles também são observados os indicadores selecionados, no primeiro grupo foram selecionados 7 indicadores e no segundo 5 indicadores. Dentre os indicadores selecionados do grupo “técnico” estão dois dos indicadores mais conhecidos e utilizados na área de manutenção, trata-se do MTTR (Mean Time to Repair) e MTBF (mean time between failures).

Devido ao grande volume de dados disponibilizados em tabelas optou-se por utilizar dados de apenas um grupo (econômico) a fim de mostrar os procedimentos realizados, evitando assim uma exposição maciça no corpo do texto. As informações referentes a todos os grupos foram inseridas como apêndice, sendo listados todos os dados disponíveis.

5.2.2 Modelagem

Com as informações descritas no Quadro 15 e a estrutura base do modelo de Pierezan (2011) foi possível elaborar um modelo de simulação para gerar os dados quantitativos para o cálculo dos indicadores selecionados na seção 5.2.1 deste trabalho. A Figura 49 apresenta o modelo reestruturado, onde o processo é visto de forma macro, observando-se as transições de substituição desenhadas com linhas duplas e definidas como subpáginas as quais descrevem a suas funções dentro do macroprocesso.

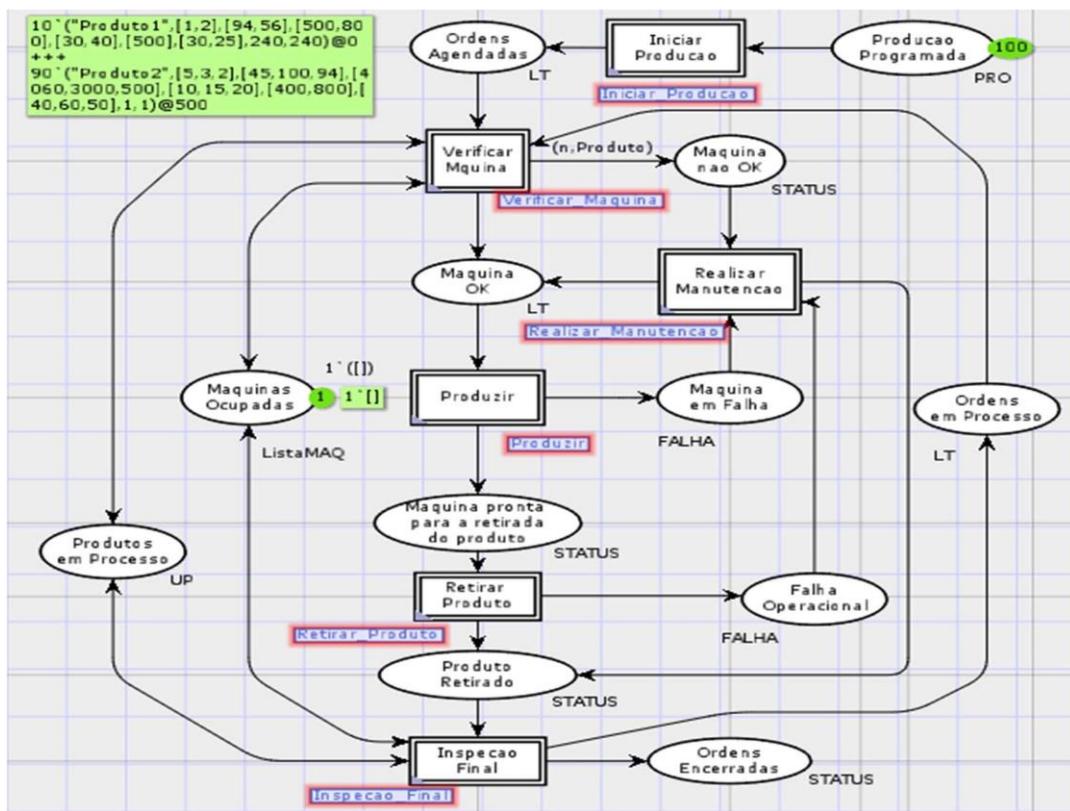


Figura 49 – Modelo de simulação adaptado de Pierezan (2011).

Fonte: O autor 2020.

De forma geral o objetivo foi modelar um processo direcionado apenas as etapas de transformação de um produto (linha de produção), desta forma tem-se os elementos diretamente relacionados a MI que possibilita estabelecer e calcular indicadores para verificação da eficiência da manutenção. A ideia de utilizar um modelo controlado para simular um processo discreto e, na sequência, usar das técnicas de mineração de processos para extração de conhecimento é uma ação difundida e aceita na comunidade científica e profissional, pois o uso da simulação permite que sejam captados inputs e possíveis desvios que não ficariam aparentes em um processo real.

5.2.3 Cenários de simulação

Os cenários de simulação representam os parâmetros que os especialistas de manutenção vão modificar com base em seus conhecimentos e valores obtidos nas simulações. Esta seção irá apresentar a estrutura sugerida na seção 4.3.3 deste trabalho, na qual os especialistas irão atribuir valores para cada parâmetro referente a um dos cinco cenários a serem estabelecidos.

A Tabela 11 apresenta os valores dos parâmetros para cada cenário, sendo que estes são submetidos a simulação para a geração de informações para o cálculo dos indicadores. Foi utilizado um período de 30 dias como base para definir os valores dos parâmetros, sendo estes originados no setor e envase de uma indústria de lácteos.

Tabela 11 – Definição dos cenários pela equipe de manutenção.

	Parâmetro	C1	C2	C3	C4	C5
1	Pessoal da manutenção (un)	8	9	8	7	10
2	Quantidade produzida (kg)	9123	8706	9289	9125	8936
3	Tempo de operação (h)	2537	2718	2736	2418	2629
4	Tempo para melhorias na manutenção (h)	30	26	15	34	26
5	Turnos de trabalho	2	2	2	2	2

Fonte: O autor 2020.

É importante deixar claro que um cenário para este trabalho representa uma configuração de todos os parâmetros do ambiente de manutenção, neste caso tem-se para C1 os parâmetros da situação atual/real estudado. Para definir os parâmetros para C2, por exemplo, compara-se as informações da mineração de processos com

os valores dos indicadores calculados, e também a questão qualitativa envolvendo os conhecimento e experiências dos especialistas de manutenção.

5.3 TOMADA DE DECISÃO

Nesta seção será mostrado o cálculo dos indicadores e a escolha de cenários, conforme já comentado, foi realizado 5 simulações (cenários) e foram extraídas as informações úteis para os cálculos, por meio de ferramentas de mineração de processos. Portanto além das informações provenientes das simulações, também se utilizou das que estavam disponíveis no sistema de informação da empresa que foi aplicado o estudo.

5.3.1 Cálculo de indicadores

Para possibilitar o cálculo dos indicadores é necessário obter as informações que atendam ao exigido na Norma Europeia (EN 15341:2007), as quais são extraídas da mineração de processos e sistema interno da empresa. A Tabela 12 apresenta os valores das informações, observa-se que a mineração de processos tem grande importância pois ajuda a obter a maioria das informações necessárias, sendo preciso buscar no sistema interno, apenas valores financeiros.

Tabela 12 – Extrato da descrição dos valores das informações para cada cenário.

	Informação	C1	C2	C3	C4	C5
1	Custo total de manutenção	150000	150000	150000	150000	150000
9	Custo interno total de pessoal gasto em manutenção	90000	90000	90000	90000	90000
15	Custo de manutenção corretiva	60000	70000	80000	90000	100000
16	Custo de manutenção preventiva	90000	80000	70000	65000	60000
17	Custo de manutenção baseado em condições	30000	40000	50000	60000	70000
19	Custo de melhoria da manutenção	50000	60000	70000	80000	90000
20	Custo de paradas de manutenção	50000	60000	70000	80000	90000
21	Custo de treinamento para manutenção	20000	25000	30000	35000	40000
22	Número de pessoal de manutenção	10	10	10	10	10
26	Tempo total de operação	352	340	335	349	328
27	Tempo de inatividade devido a manutenção	6	12	17	6	12
35	Tempo de inatividade relacionado a falhas	2	5	16	1	13

Continua

		Conclusão				
Informação		C1	C2	C3	C4	C5
36	Tempo de inatividade total relacionado à	8	17	33	7	24
37	Tempo de inatividade relacionado à	3	8	12	3	7
38	Tempo de manutenção preventiva	1	2	3	2	3
39	Tempo de manutenção preditiva	1	2	2	1	2
42	Número total de falhas	35	42	28	19	31
50	Horas de trabalho usadas para planejamento	16	12	8	20	12
51	Total de horas de pessoal de manutenção	1408	1232	1408	1056	1408
53	Tempo total para restauração	350	450	250	223	270
63	Horas de trabalho usadas para melhoria	12	24	12	12	30
66	Tempo de manutenção corretiva	5	8	7	10	9
71	Homem-horas de manutenção corretiva	25	40	28	40	36
72	Homem-horas de manutenção preventiva	75	120	56	115	96

Fonte: O autor 2020.

De posse dos valores gerados para os cenários C1 a C5 apresentados na Tabela 12, foi possível verificar quais indicadores puderam ser calculados conforme grupos mostrados no Quadro 17 e Anexo 1, a Tabela 13 apresenta todos os indicadores selecionados na Seção 5.2.1 assim como seus respectivos valores.

Tabela 13 – Indicadores calculados.

Indicadores Econômicos									
Indicador	Cenários								
	C1		C2		C3		C4		C5
E8	60,00	↔	60,00	↔	60,00	↔	60,00	↔	60,00
E15	40,00	↑	46,67	↑	53,33	↑	60,00	↑	66,67
E16	60,00	↓	53,33	↓	46,67	↓	43,33	↓	40,00
E17	20,00	↑	26,67	↑	33,33	↑	40,00	↑	46,67
E20	33,33	↑	40,00	↑	46,67	↑	53,33	↑	60,00
E21	2000,00	↑	2500,00	↑	3000,00	↑	3500,00	↑	4000,00
Indicadores Técnicos									
T1	98,32	↓	96,59	↓	95,17	↓	98,31	↓	96,47
T6	99,44	↓	98,55	↓	95,44	↑	99,71	↓	96,19
T8	12,50	↓	11,76	↓	9,09	↑	28,57	↑	12,50
T9	12,50	↓	11,76	↓	6,06	↑	14,29	↓	8,33
T17	10,06	↓	8,10	↑	11,96	↑	18,37	↑	10,58
T19	1,14	↓	0,97	↓	0,57	↑	1,89	↓	0,85
T21	10,00	↑	10,71	↓	8,93	↑	11,74	↓	8,71
Indicadores Organizacionais									
O8	0,009	↑	0,019	↑	0,009	↑	0,011	↑	0,021
O11	62,50	↓	47,06	↓	21,21	↑	142,86	↓	37,50
O16	0,36	↑	0,65	↑	0,50	↑	0,95	↑	0,64
O17	1,78	↑	3,25	↑	1,99	↑	3,79	↑	2,56
O18	5,33	↑	9,74	↓	3,98	↑	10,89	↑	6,82

Fonte: O autor 2020.

Conforme visto na Tabela 13 o gestor de manutenção poderá verificar se um indicador teve um desempenho positivo, negativo ou permaneceu constante. As setas indicadoras orientam para um ganho ou perda, mas pode ser considerado extremamente difícil identificar qual cenário é melhor apenas visualizando tais informações.

A utilização de um painel de indicadores foi considerada pela equipe de manutenção como uma solução prática e intuitiva, a visualização rápida e direta facilita o entendimento sobre o comportamento de um indicador com base em alguma decisão tomada. Esta percepção foi considerada válida para controlar e uma pequena quantidade de indicadores, mas à medida que são incorporados mais indicadores a rapidez na tomada de decisão possivelmente será afetada.

Também neste trabalho os indicadores estão distribuídos em três áreas diferentes, esta questão torna a decisão mais complexa pois é preciso analisar além da relação entre os indicadores, também qual sua interferência para o desenvolvimento de uma determinada área. A análise do trabalho até o momento demonstram que os esforços realizados permitiram que os indicadores pudessem ser calculados, portanto tem-se informações suficientes para que o gestor da área de manutenção consiga realizar algum tipo de análise e tomada de decisão.

Outra questão neste caso é que está sendo levado em consideração apenas os valores dos indicadores, neste caso tem-se apenas a questão quantitativa sendo analisada. Para se chegar a uma escolha mais adequada considera-se importante verificar a importância de cada indicador sob a ótica de pessoas envolvidas diretamente na área de manutenção, portanto o aspecto qualitativo torna-se essencial para a tomada de decisão.

5.3.2 Priorização de cenários

Conforme já comentado na seção 4.2.7 deste trabalho, foi utilizado o software Super Decisions o qual performará as avaliações “par a par” entre os critérios e alternativas. Os critérios estão distribuídos nos três grupos de acordo com a EN 15341:2007 e as alternativas correspondem aos indicadores selecionados, sendo que cada indicador está interligado com um dos critérios apresentados.

A Figura 50 apresenta as comparações par a par realizadas pelo software Super Decisions, nela é possível visualizar o grupo (ou nó) em que as avaliações estão sendo executadas. Neste caso a comparação é feita entre o node “Indicadores” com todos os nodes do cluster “Criteria”, a questão a ser avaliada é o nível de preferência atribuído pelos especialistas.

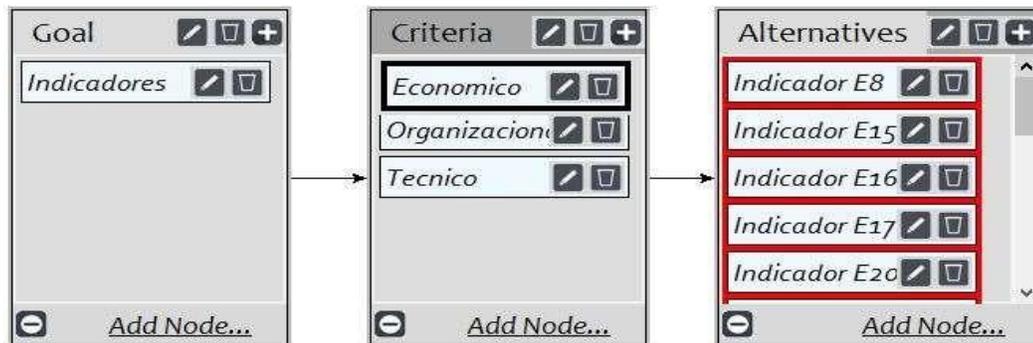


Figura 50 – Classificação de dois indicadores: método AHP (software Super Decisions).

Fonte: O autor 2019.

A estrutura apresentada na Figura 51 permite a equipe de manutenção comparar os elementos do grupo “Criteria” conforme Figura 50. Como exemplo na primeira linha compara-se os grupos de indicadores econômico e organizacional, observa-se que a resposta do especialista indica uma preferência moderada do grupo econômico perante ao grupo organizacional.

Network	Judgments	Ratings
1. Choose	2. Node comparisons with respect to Indicadores	3. Results
Node Cluster Choose Node Indicadores Cluster: Goal Choose Cluster Criteria	Graphical Verbal Matrix Questionnaire Direct Comparisons wrt "Indicadores" node in "Criteria" cluster Economico is moderately to strongly more preferable than Organizacional 1. Economico >=9.5 9 8 7 6 5 4 3 2 2 3 4 5 6 7 8 9 >=9.5 No comp. Organizacion~ 2. Economico >=9.5 9 8 7 6 5 4 3 2 2 3 4 5 6 7 8 9 >=9.5 No comp. Tecnico 3. Organizacion~ >=9.5 9 8 7 6 5 4 3 2 2 3 4 5 6 7 8 9 >=9.5 No comp. Tecnico	Normal Hybrid Inconsistency: 0.02365 Economico 0.33307 Organizac~ 0.09739 Tecnico 0.56954

Figura 51 – Análise par a par “Goal” e “Criteria”.

Fonte: O autor 2019.

Percebe-se na Figura 51 com base na avaliação da equipe de especialistas de manutenção, que o grupo de indicadores “técnico” tem maior preferência com relação aos demais. Esta preferência irá interferir na comparação par a par e

consequentemente na determinação dos pesos dos indicadores, esta questão poderá ser visualizada com melhor clareza e interatividade nas opções de análise de sensibilidade do software Super Decisions.

A Figura 52 apresenta as comparações “par a par” feita entre os nodes do cluster “Criteria” com os nodes do cluster “Alternatives”, a questão a ser avaliada é o nível de importância atribuído pelos especialistas. Observa-se na primeira linha que o indicador E8 é considerado de moderadamente a fortemente mais importante que o indicador E15, de acordo com a opinião dos especialistas de manutenção.

Esse procedimento deve ser realizado em todos os níveis e em todos os critérios, visto que o resultado final do método AHP pondera todas as avaliações, sintetizando e apresentando as alternativas com seus respectivos valores (preferências). Considerando a estrutura hierárquica apresentada, ao total, 4 telas distintas é apresentada ao usuário, sendo que uma delas diz respeito a preferência entre os grupos de indicadores e as outras três estão relacionadas ao grau de importância de cada indicador.

The screenshot displays the Super Decisions software interface for pairwise comparisons. The main window is titled "Judgments" and is divided into three sections:

- 1. Choose:** Shows the current node cluster as "Economico" and the cluster being compared as "Criteria". The "Choose Node" is set to "Alternatives".
- 2. Node comparisons with respect to Economico:** Displays a comparison matrix for 15 indicators. The title is "Comparisons wrt 'Economico' node in 'Alternatives' cluster". The first row shows a comparison between "Indicador E8" and "Indicador E15" with a value of 9. The matrix is symmetric, with diagonal cells containing 1. The text "Indicador E8 is moderately to strongly more important than Indicador E15" is displayed above the matrix.
- 3. Results:** Shows the inconsistency level as 0.02554. Below this, a table lists the weights for five indicators:

Indicador-	0.14047
Indicador-	0.05458
Indicador-	0.20365
Indicador-	0.08549
Indicador-	0.47775
Indicador-	0.03807

Figura 52 – Análise par a par dos indicadores do grupo “econômico”.

Fonte: O autor 2019.

Algumas análises podem ser feitas com o resultado das comparações, uma delas é a sensibilidade entre os elementos. A Figura 51 apresentou a preferência entre os grupos de indicadores, com base nisto a Figura 52 apresenta o grau de importância (por meio de pesos) dos indicadores utilizando como preferência o grupo de indicadores “técnico”.

No gráfico da Figura 53, o eixo x refere-se aos valores das prioridades do critério “técnico”, o eixo y refere-se aos valores das prioridades das alternativas. A linha vertical pontilhada é a prioridade do critério “técnico” em 0,5 ou 50% e abaixo do gráfico estão os valores das prioridades de cada alternativa para o critério “técnico”. Ao arrastar a linha vertical pontilhada para direita ou para esquerda, alteram-se as prioridades das alternativas.

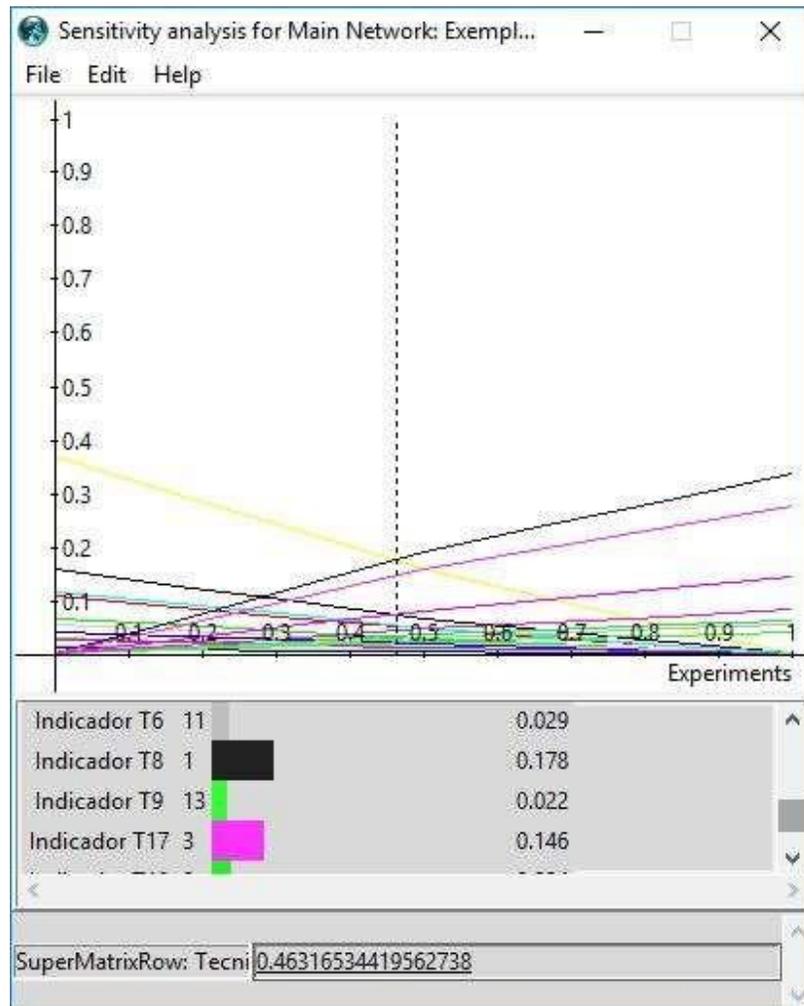


Figura 53 - Análise de sensibilidade (AHP sensitivity).

Fonte: O autor 2019.

Na Figura 53 percebe-se que os indicadores E20, T8 e T17 apresentam valores mais expressivos mostrando maior importância e conseqüentemente maior variação. Nota-se que a um cruzamento entre T8 (linha preta) e E20 (linha amarela), neste caso se a prioridade do critério “técnico” for menor que 0,46 ou 46%, o indicador E20 é considerado mais importante, se superior a este valor, passa a ser o T8 o mais importante.

Outra forma de visualizar a sensibilidade é com a opção Horz Barchart, Figura 54, que mostra por meio de um gráfico de barras as alterações nos valores dos indicadores ao passo que se altera a prioridade do critério “técnico. Esta é uma opção mais interativa na qual todas as alternativas podem ser visualizadas de imediato assim como as alterações de seus valores.

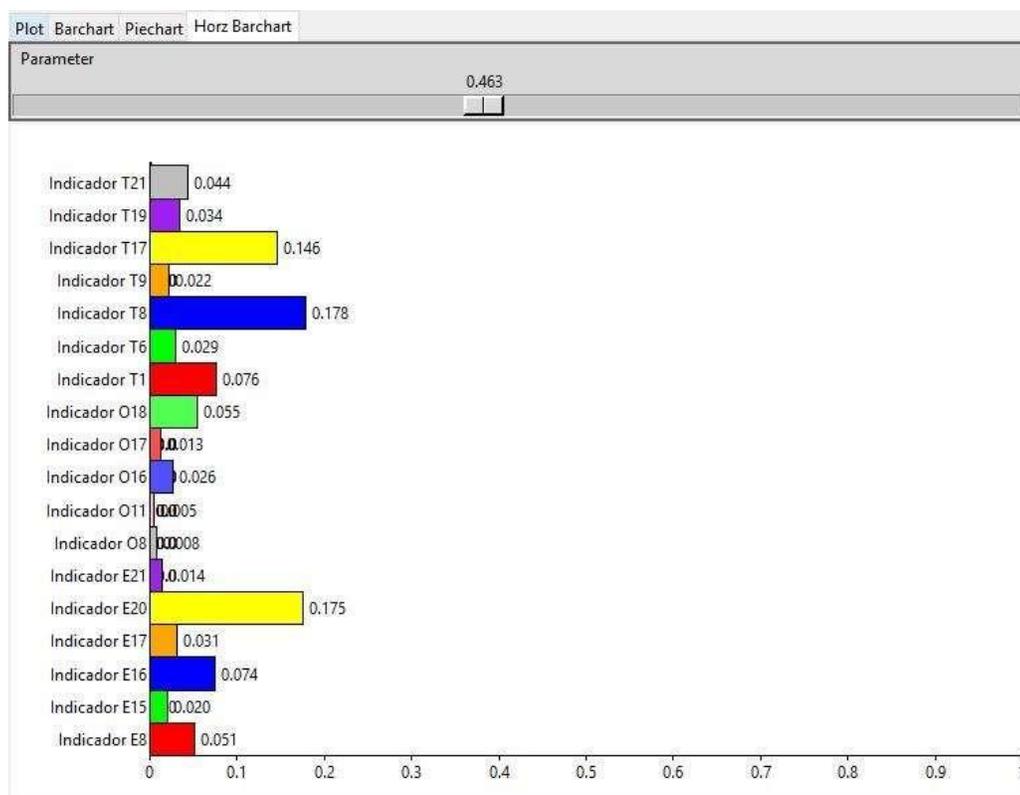


Figura 54 – Análise de sensibilidade (ANP sensitivity).

Fonte: O autor 2019.

Conforme visto nas Figuras 51 e 52 foi feita uma comparação par a par entre os elementos analisados, entre os grupos (criteria) determinou-se a preferência, e entre os indicadores (alternativas) estipulou-se a importância. A Figura 54 trata desta

dinâmica entre os elementos e mostra como cada um deles poderá interferir nos demais, é possível tanto para cada um dos grupos quanto para todos os indicadores relacionados.

Após todas as análises, o software Super Decisions sintetiza as comparações em uma única tabela, exibindo as alternativas (indicadores) e suas respectivas preferências que são representadas pelos valores exibidos na coluna “Normals” da Figura 55. Tais valores são considerados os pesos dos indicadores a serem utilizados no método PROMETHEE.

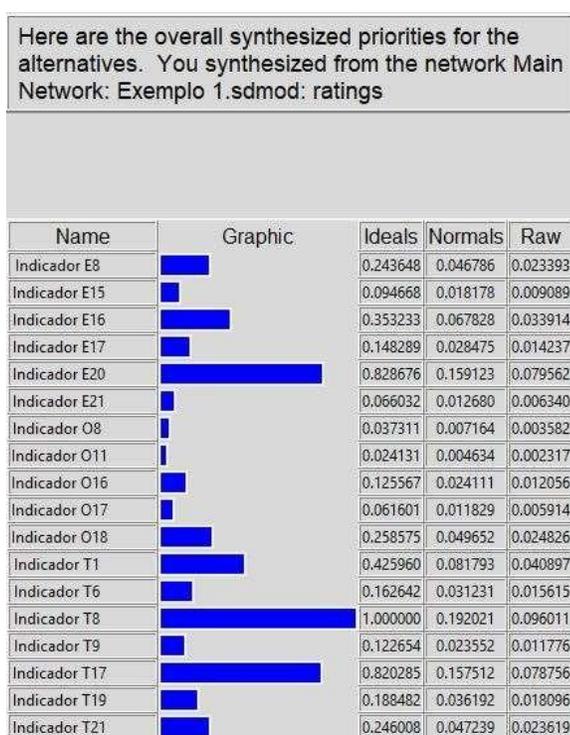


Figura 55 – Classificação de indicadores (método AHP).

Fonte: O autor 2019.

Observa-se pela Figura 55 que o indicador T8 apresentou um valor de destaque, um dos motivos pode ser visto na Figura 50 pois o grupo de indicadores “técnico” tem preferência sobre os grupos “econômico” e “organizacional”. Outro motivo foi visto na Figura 52, onde tal indicador é considerado bem mais importante que os demais do grupo “técnico”.

Após definir os pesos de cada indicador a próxima atividade é determinar a priorização dos cenários, conforme já comentado neste trabalho, optou-se pela

escolha do método PROMETHEE pois permite que as avaliações sejam do tipo quali-quantitativo, fator este que torna a tomada de decisão mais robusta. Para identificar o melhor cenário será utilizado o software Visual Promethee, o uso deste programa é simples, intuitivo e de fácil compreensão do resultado, pois os mesmos podem ser apresentados de diversas maneiras, de modo a adequar a saída conforme necessidade do grupo envolvido.

A Figura 56 exibe a matriz de avaliação considerada para a ordenação das alternativas, os valores dos indicadores e os pesos dos critérios inseridos nessa matriz foram extraídos da Tabela 12 e Figura 55, respectivamente. Importante observar que é preciso determinar se os dados quantitativos são considerados “quanto maior melhor” ou “quanto menor melhor” sendo representados no programa como “Min” e “Max”.

	<input checked="" type="checkbox"/>								
Cenários	Indicador E8	Indicador E15	Indicador E16	Indicador E17	Indicador E20	Indicador E21	Indicador O8	Indicador O11	
Unit									
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	
Preferences									
Min/Max	max	min	max	max	min	min	max	min	
Weight	0,05	0,02	0,07	0,03	0,16	0,01	0,01	0,00	
Preference Fn.	Usual								
Thresholds	absolute								
- Q: Indifference	n/a								
- P: Preference	n/a								
- S: Gaussian	n/a								
Statistics									
Minimum	60,00	40,00	40,00	20,00	33,33	2000,00	0,01	21,21	
Maximum	60,00	66,67	60,00	46,67	60,00	4000,00	0,02	62,50	
Average	60,00	53,33	48,67	33,33	46,67	3000,00	0,01	42,23	
Standard Dev.	0,00	9,43	7,18	9,43	9,43	707,11	0,01	13,41	
Evaluations									
<input checked="" type="checkbox"/>	Cenário 1	60,00	40,00	60,00	20,00	33,33	2000,00	0,01	62,50
<input checked="" type="checkbox"/>	Cenário 2	60,00	46,67	53,33	26,67	40,00	2500,00	0,02	47,06
<input checked="" type="checkbox"/>	Cenário 3	60,00	53,33	46,67	33,33	46,67	3000,00	0,01	21,21
<input checked="" type="checkbox"/>	Cenário 4	60,00	60,00	43,33	40,00	53,33	3500,00	0,01	42,86
<input checked="" type="checkbox"/>	Cenário 5	60,00	66,67	40,00	46,67	60,00	4000,00	0,02	37,50

Figura 56 – Matriz de avaliação com o método PROMETHEE.

Fonte: O autor 2020.

O resultado pode ser visualizado de forma gráfica, mas ao utilizar essa forma de apresentação do resultado, o usuário não tem a plena certeza da solução

(ranqueamento) para o sistema, pois os valores absolutos não são apresentados, porém, o mesmo consegue performar análises comportamentais alterando e movimentando os eixos e vetores exibidos. A Figura 57 mostra como as avaliações tornam-se dinâmicas e de fácil compreensão aos analistas, pois permite verificar a ordenação das alternativas ao se alterar, por exemplo, o peso de um critério, percebe-se neste caso a sensibilidade de cada indicador para a determinação dos cenários.



Figura 57 – Sensibilidade a alteração dos indicadores.

Fonte: O autor 2020.

Similar ao resultado anterior, porém exibida em forma de tabela, a Figura 58 apresenta os valores “Phi” encontrados para cada alternativa e, portanto, a ordenação final dos cenários. Como pode ser constatado, o Cenário 4 mostrou-se ser mais aderente aos indicadores analisados, apresentando desempenho próximo ao do cenário 1 e consideravelmente superior aos demais cenários. Percebe-se que os cenários 4 e 1 são os melhores respectivamente, mas neste caso é importante o gestor que irá tomar uma decisão analisar a sensibilidade de cada indicador sobre os cenários.

Rank	action	Phi	Phi+	Phi-
1	Cenário 4	0,3332	0,6432	0,3100
2	Cenário 1	0,3270	0,6152	0,2882
3	Cenário 2	-0,1544	0,3994	0,5538
4	Cenário 5	-0,2110	0,3471	0,5581
5	Cenário 3	-0,2948	0,3283	0,6231

Figura 58 – Rankings dos cenários (método PROMETHEE).

Fonte: O autor 2020.

Os valores de “Phi” exibidos fazem menção à:

- Phi+: refere-se ao fluxo de preferência positiva, isto é, quantifica como uma determinada ação (alternativa) é globalmente preferida em relação a todas as outras opções (vide lado esquerdo da Figura 26, seção 3.2.2);
- Phi-: faz referência ao fluxo de preferência negativo, ou seja, quantifica como uma alternativa está sendo globalmente superada por todas as outras ações (vide lado direito da Figura 26, seção 3.2.2);
- Phi: valor resultante da diferença entre “Phi+” e “Phi-”, sendo considerado o fluxo de preferência líquido, ou seja, o resultado absoluto e final das análises.

O método PROMETHEE foi utilizado para ordenar as alternativas (cenários) levando em consideração os valores dos indicadores calculados juntamente com a opinião dos especialistas de manutenção. Conforme resultados apresentados o método conseguiu atender ao objetivo final deste trabalho, pois permite ao gestor de manutenção tomar uma decisão mais adequada com base em um conjunto complexo de informações.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi propor um framework para auxílio a tomada de decisão na MI, utilizando a simulação computacional como ferramenta principal e a mineração de processos como suporte para a extração dos dados simulados. Ao final chegou-se à escolha de possíveis cenários da área de MI por meio de um procedimento específico de tomada de decisão, esta questão orienta o gestor de manutenção a implementar uma ação mais segura diante dos objetivos da empresa.

Esta pesquisa é inovadora pois integra a técnica de simulação com ferramentas de mineração de processos e propõe uma decisão por meio de métodos MCDM. Também procura suprir uma deficiência constatada nas seções 2.4 e 2.5 deste trabalho, a qual expõe uma necessidade de pesquisas voltadas a análise da eficiência na manutenção com uso de indicadores de desempenho.

O framework proposto pode também ser considerado complexo devido sua estrutura abranger e utilizar técnicas, ferramentas e métodos para se chegar a um resultado final. Verifica-se que para construir o modelo de simulação por meio do software CPN Tool será utilizado um grande volume de informações que possibilite o cálculo dos indicadores selecionados na seção 4.3.4 com o auxílio do método TOP SIS. Os dados simulados precisam ter uma extensão de arquivo adequada para ser utilizados nas ferramentas de mineração de processos, para isto é utilizado um software específico chamada Prom Import.

Na sequência os dados são importados por softwares de mineração de processos, Prom e Disco®, para que informações sejam disponibilizadas para o cálculo dos indicadores. Na próxima fase o software Excel é utilizado, ele irá organizar as informações oriundas da mineração de processos e também informações do sistema de informação da empresa, calcular e disponibilizar os valores dos indicadores vistos na Tabela 12 deste trabalho.

Para extrair as informações qualitativas dos especialistas de manutenção foi utilizado o método AHP cujo objetivo foi fazer uma comparação par a par dos indicadores selecionados e estabelecer um peso para cada um deles. Na última fase utiliza-se o método Promethee para a escolha de um dos cenários simulados, ambos os métodos já vistos na seção 4.3.4 deste trabalho.

Outra questão importante é a aplicabilidade, a ideia é que o framework proposto tenha um conceito mais “genérico” que possa ser facilmente customizado para vários

ambientes de MI. O modelo de simulação por utilizar como base o padrão europeu de indicadores de manutenção, reflete maior confiança quanto a sua aplicação nas empresas. A flexibilidade para estabelecer cenários diferentes e a determinação dos pesos atribuídos aos indicadores pela equipe de manutenção, são considerados fatores variáveis, e provavelmente serão diferentes de uma empresa para outra.

6.1 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

Conforme visto no Capítulo 2 deste trabalho, é visto na literatura que a simulação é uma técnica amplamente utilizada no contexto da MI, porém várias são as maneiras de se coletar as informações e também de modelagem de um elemento ou ambiente desejado. Neste caso encontra-se uma dificuldade que é obter dados confiáveis para modelar e simular um ambiente, portanto para tentar solucionar esta questão uma alternativa interessante é utilizar a mineração de processos pois esta técnica consegue extrair dados estatísticos e um modelo que mostra a sequência de atividades.

Conforme já visto na Figura 3 deste trabalho, a produção literária sobre a utilização da simulação e mineração de processos na MI é praticamente inexistente, apenas uma publicação (Dehghanimohammadabadi, Keyser e Cheraghi, 2017) foi encontrada, mas tendo como foco a otimização, não utilizando as CPN como base de modelagem e simulação. Portanto acredita-se que haverá uma certa contribuição para a literatura mostrando uma ampliação do conhecimento em simular ambientes de manutenção usando a mineração de processos como base de informações.

Outra questão considerada como uma contribuição deste trabalho está relacionada com uso de indicadores para verificar o desempenho. Como já comentado nesta pesquisa, Ruschel, Santos e Loures (2017), realizaram um estudo de revisão da literatura sobre decisões na manutenção e constataram que o uso de indicadores é considerado como pouco explorado para se analisar a eficiência da manutenção. Na Seção 2.4 deste trabalho a maioria das pesquisas publicadas apontam para a escolha de políticas de manutenção e confiabilidade de equipamentos, havendo um desinteresse para as questões que envolvem o comportamento das decisões tomadas, algo que indique um ganho ou perda.

Com relação a utilização de técnicas de simulação e mineração de processos para calcular indicadores de MI, a literatura não apresenta publicações relevantes. Os

registros encontrados remetem ao modelo de Pierezan 2011, visto neste trabalho e também de pesquisas em andamento sendo realizadas por alunos de mestrado e doutorado do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Pontifícia Universidade Católica do Paraná – Curitiba PR.

O modelo de simulação de Pierezan 2011, foi o único trabalho que possui semelhanças estruturais do Framework proposto nesta pesquisa. Acredita-se que a reestruturação e expansão do modelo, conforme visto na Figura 41, permitindo simular cenários e dar opções para tomada de decisão, seja uma contribuição importante para se chegar a uma base sólida de simulação.

No que diz respeito a estrutura dos logs, esta pesquisa também pode contribuir para uma melhor estruturação dos registros de eventos, pois apresentou-se uma série de informações que o modelo de simulação deveria conter, com base nestas informações podem ser desenvolvidos outros trabalhos usando técnicas de mineração de dados para estruturar logs mais consistentes que possam gerar um volume maior de informações.

REFERÊNCIAS

- AGUIRRE S.; PARRA C.; ALVARADO J. **Combination of Process Mining and Simulation Techniques for Business Process Redesign: A Methodological Approach.** International Symposium on Data-Driven Process Discovery and Analysis. vol 162. pp. 24-43 Springer, Berlin, 2013.
- AHMAD, R. KAMARUDDIN, S. **An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application.** Computers & Industrial Engineering 63, pp. 35-149, 2012.
- ALABDULKARIM A. A., BALL P.D., TIWARI A. **Influence of resources on maintenance operations with different asset monitoring levels: a simulation approach.** Bus Process Manag. 2014; 20 (2): 195-212.
- ALENCAR, M. H.; ALMEIRA, A. T. **A Multicriteria Decision Model for Assessment of Failure Consequences in the RCM Approach.** Mathematical Problems in Engineering, 2015.
- ALMEIDA, A. T.; et al. **Decisions on Priority Assignment for Maintenance Planning. In: Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis.** International Series in Operations Research & Management Science, Vol. 231, 2015.
- ALRABGHI A., TIWARI A. **State of the art in simulation-based optimization for maintenance systems.** Comput Ind Eng 2015; 82:167-82.
- ALRABGHI A., TIWARI A. **A novel approach for modelling complex maintenance systems using discrete event simulation.** Reliability Engineering and System Safety, 154 (2016) 160-170.
- ALRABGHI, A.; TIWARI, A.; SAVILL, M. **Simulation-based optimisation of maintenance systems: Industrial case studies.** Journal of Manufacturing Systems, v. 44, Part 1, pp. 191-206, 2017.
- AL-NAJJAR, B. **The lack of maintenance and not maintenance which costs: a model to describe and quantify the impact of vibration-based maintenance on company's business.** International Journal of Production Economics 107 (1), 260-273, 2007.
- ANGHEL V.; DRAGHICI G. **Simulation, Modelling and Optimization for Operative Maintenance.** Proceedings of the 5th WSEAS Int. Conf. on COMPUTATIONAL INTELLIGENCE, MAN-MACHINE SYSTEMS AND CYBERNETICS, Venice, Italy, November 20-22, 2006.
- ARESE et al. **Application of the TOPSIS method in the evaluation of the criteria used in the selection of teachers in a higher education institution.** Conhecimento & Diversidade, Niterói, v. 9, n. 19, p. 47-58, 2017.

ASSAF, S. A.; HADIDI, L. A.; HASSANAIN, M. A.; REZQ, M. F. **Performance evaluation and benchmarking for maintenance decision making units at petrochemical corporation using a DEA model.** J Adv Manuf Technol (2015) 76:1957-1967.

AUGUSTO, V.; XIE, X.; PRODEL, M.; JOUANETON, B.; LAMARSALLE, L. **Evaluation of discovered clinical pathways using process mining and joint agent-based discrete-event simulation.** Winter Simulation Conference, pp. 2135-2146, 2016.

BANSAL, D.; EVANS D. J.; JONES B. **Application of a real-time predictive maintenance system to a production machine system.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, 45 (2005) 1210-1221.

BAGLEE D., MARTTONEN S. **The need for Big Data collection and analyses to support the development of an advanced maintenance strategy.** In: Proceedings of the international conference on data mining (DMIN). The Steering Committee of the World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing (WorldComp), 2015.

BARROSO, G., SOARES, J. **“Introdução às Redes Petri Coloridas Usando a Ferramenta CPN Tools”.** Departamento de Física - Universidade Federal do Ceará, 2016.

BEHZADIAN, M.; KAZEMZADEH, R. B.; ALBADVI, A.; AGHDASI, M. **PROMETHEE: A Comprehensive Literature Review on Methodologies and Applications.** European Journal of Operational Research, Vol. 200 Issue: 1, 2010.

BEHZADIAN, M.; S.K. Otaghsara, M. Yazdani, J. Ignatius. **A state-of the-art survey of TOPSIS applications.** Expert Systems with Applications 39 (2012) 13051-13069.

BEVILACQUA, M.; BRAGLIA, M. **The Analytic Hierarchy Process Applied to Maintenance Strategy Selection.** Reliability Engineering & System Safety, Vol. 70 Issue 1, 2000.

BHUSHAN, N.; RAI, K. **Strategic Decision Making: Applying the Analytic Hierarchy Process.** London: Springer-Verlag, 2004.

BOGDANOVIC, D.; NIKOLIC, D.; ILIC, I. **Mining Method Selection by Integrated AHP and PROMETHEE Method.** Annals of the Brazilian Academy of Sciences, Vol. 84, 2011.

BORLIDO, D. J. A. **Indústria 4.0 - Aplicação a Sistemas de Manutenção.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade do Porto. Portugal, 2017.

BOSE, R., MANS, R.S., VAN DER AALST, W.M.P. **Wanna improve process mining results?** In: 2013 IEEE Symposium on Computational Intelligence and Data Mining (CIDM), pp. 127-134. IEEE (2013).

- BOSHNAKOV, K. P. et al. **Predictive Maintenance Model-Based Approach for Objects Exposed to Extremely High Temperatures.** 2013 Signal Processing Symposium (SPS). Serock, Poland.
- BRANS, JP.; MARESCHAL, B. PROMETHEE Methods. In: **Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys.** International Series in Operations Research & Management Science, Vol 78. Springer: New York, 2005.
- BRANS JP.; VINCKE, P. **A Preference Ranking Organisation Method (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making.** Management Science, Vol. 31 Issue: 6, 1985.
- BRIOZO, R. A.; MUSETTI, M. A. **Método Multicritério de Tomada de Decisão: Aplicação ao Caso da Localização Espacial de uma Unidade de Pronto Atendimento - UPA 24 h.** Gestão & Produção, Vol. 22 No.: 4, 2015.
- BURATTIN, A. **Obstacles to applying process mining in practice.** In: Process Mining Techniques in Business Environments, pp. 59-63. Springer (2015).
- Campbell, J. D. **Uptime: strategies for excellence in maintenance management.** Portland, OR: Productivity Press, 1995.
- CAMPOS, V. R. **Modelo de Apoio à Decisão Multicritério para Priorização de Projetos em Saneamento.** Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- CENTOBELLI P. et al. **From Process Mining to Process Design: a Simulation Model to Reduce Conformance Risk.** Engineering Letters, 2015.
- CHAREONSUK, C.; NAGARUR, N.; TABUCANON, M. T. **A Multicriteria Approach to the Selection of Preventive Maintenance Intervals.** International Journal of Production Economics, Vol. 49 Issue: 1, 1997.
- CHENG, G. Q.; ZHOU, B. H.; LI, L. **Integrated production, quality control and condition-based maintenance for imperfect production systems.** Reliability Engineering and System Safety. 175 (2018) 251-264.
- CHINESE, D., GHIRARDO, G., 2010. **Maintenance management in Italian manufacturing firms: matters of size and matters of strategy.** Journal of Quality in Maintenance Engineering 16 (2), 156-180 2010.
- CHIOLA, G. et al. **Stochastic well-formed colored nets and symmetric modeling applications.** IEEE Transactions on Computers, IEEE, v. 42, n. 11, p. 1343-1360, 1993.
- CLEMENTE, T.; ALMEIDA-FILHO, A.; ALENCAR, M.; CAVALCANTE, C. **A Decision Support System Based on RCM Approach to Define Maintenance Strategies.** 6th Conference on Research and Practical Issues in Enterprise Information Systems (CONFENIS), 2012.

CPN Tools website. CPN Tools. Disponível em: <<http://cpntools.org/start>>. Acessado em: 01 de março de 2017.

CURCURU G.; GALANTE G.; LOMBARDO A. **A predictive maintenance policy with imperfect monitoring**. Reliability Engineering and System Safety. 95 (2010) 989-997.

DEGHANIMOHAMMADABADI, M.; KEYSER, T. K.; CHERAGHI. H. **A novel Iterative Optimization-based Simulation (IOS) framework**: An effective tool to optimize system's performance. Computers & Industrial Engineering. 111 (2017) 1-17.

DESCHAMPS, F. **Proposal for the systematization of enterprise engineering contributions: guidelines for enterprise engineering initiatives**. Tese (doutorado) Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2013.

DWIGHT, R. **Frameworks for Measuring the Performance of the Maintenance System in a Capital Intensive Organization**. University of Wollongong, Australia, Doctoral Report, 1999.

EN 15341:2007. **Maintenance - Maintenance Key Performance Indicators**. British Standard, Committee European Normalisation, 2007.

ENSSLIN, S. R. et al. **Processo estruturado de revisão da literatura e análise bibliométrica sobre avaliação de desempenho de processos de implantação de eficiência energética**. Revista Brasileira de Energia, v. 20, Nº 1, pp. 21-50, 2014.

FACCIO, M. et al. **Industrial maintenance policy development**: A quantitative framework. International Journal of Production Economics, v. 147 Part A, p.85-93, 2014.

FLATH, C. M.; STEIN, N. **Towards a data science toolbox for industrial analytics applications**. Computers in Industry. 94 (2018) 16-25.

GALAR, D. et al. **Maintenance Decision Making based on different types of data fusion**. Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability, v.14 (2): 135-144, 2012.

GARG, A.; DESHMUKH, S. G. **Maintenance Management: Literature Review and Directions**. Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 12 Issue: 3, 2006.

GENG, J. et al. **"A semi-automatic approach to implement rapid nonimmersive virtual maintenance simulation"**. Assembly Automation, Vol. 38 Issue: 3, pp.291-302, 2018.

GHARBI, N.; DUTHEILLET, C.; IOUALALEN, M. **Colored stochastic petri nets for modelling and analysis of multiclass retrial systems.** *Mathematical and Computer Modelling*, Elsevier, v. 49, n. 7, p. 1436-1448, 2009.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social.** 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GILABERT, E. et al. **Simulation of predictive maintenance strategies for cost-effectiveness analysis.** *J Engineering Manufacture*, 231 issue: 13, page(s): 2242-2250, 2015.

GIUSEPPE, C.; VALERIO, M.; TERESA, M.; CARMELA, L. S. **A Simulation Approach in Process Mining Conformance Analysis.** *The Introduction of a Brand New BPMN Element.*, *IERI Procedia*, v. 6, pp. 45-51, 2014.

GOCKEN, M. et al. **Characterizing continuous policy with supplier selection using Simulation Optimization.** *SIMULATION*, 2017.

GOMES, L. F. A. M.; ARAYA, M. C. G.; CARIGNANO, C. **Tomada de Decisões em Cenários Complexos: Introdução aos Métodos Discretos do Apoio Multicritério à Decisão.** São Paulo: Cengage Learning, 2004.

GOMES, L.F.A.M.; RANGEL, L.A.D. **An application of the TODIM method to the multicriteria rental evaluation of residential properties.** *European Journal of Operational Research* 193 (2009) 204-211.

GUNER, H. U.; CHINNAM, R. B. MURAT, A. **Simulation platform for anticipative plant-level maintenance decision support system.** *International Journal of Production Research*, 54:6, pp. 1785-1803, 2016.

GUPTA, M. **Improving Software Maintenance Using Process Mining and Predictive Analytics.** *IEEE International Conference on Software Maintenance and Evolution (ICSME)*, Shanghai, 2018, pp. 681-686.

HARMON, P., DAVENPORT, T. **Business Process Change.** Morgan Kaufmann, Burlington (2007).

Hwang, C. L. & Yoon, K. P. **Multiple attributes decision making methods and applications.** Berlin: Springer-Verlag, 1981.

HUANG, I. B.; KEISLER, J.; LINKOV, I. **Multi-Criteria Decision Analysis in Environmental Sciences: Ten Years of Applications and Trends.** *Science of the Total Environment*, Vol. 409 Issue: 19, 2011.

JAIN, V.; SANGAIAH, A. K.; SAKHUJA, S.; THODUKA, N.; AHHARWAL. R. **Supplier selection using fuzzy AHP and TOPSIS: a case study in the Indian automotive industry.** *Neural Comput & Applic*, Springer, 2016.

JARDINE, A.K.S; LIN, D.; BANJEVIC, D. **A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance.** *Mechanical systems and signal processing*. v. 20. Nº 7., pp. 1483 – 1510, 2006.

- JENSEN, K. **An Introduction to the Practical Use of Coloured Petri Nets.** Department of Computer Science, University of Aarhus, Denmark, 1996.
- JIANG, A. et al. **Development and Optimization of a Condition-Based Maintenance Policy with Sustainability Requirements for Production System.** Mathematical Problems in Engineering, Volume 2018, Article ID 4187575, 19 pages.
- KARRAY, M.-H., CHEBEL-MORELLO, B., ZERHOUNI, N. **PETRA: Process Evolution using a TRAcE-based system on a maintenance platform.** Knowledge-Based Systems v. 68, pp. 21-39, 2014.
- KHODYREV, I.; POPOVA, S. **Discrete modeling and simulation of business processes using event logs.** 14th International Conference on Computational Science, Procedia Computer Science. Saint-Petersburg, Russia, v. 29, 2014, pp. 322-331.
- Kothari, C. R. **Research Methodology: Methods and Techniques.** New Age International Publishers, 2nd Edition, New Delhi, 2004.
- KOTZE, R.L.M.; VISSER, J.K. **An analysis of maintenance performance systems in the South African mining industry: general article.** S Afr J Ind Eng 2012; 23: 13-29.
- KUMAR, U.; GALAR, D.; PARIDA, A.; STENSTROM, C.; BERGES, L. **Maintenance performance metrics: a state-of-the-art review.** Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 19, N° 3, p.233-277, 2013.
- KUMAR U. Galar D. **Maintenance in the Era of Industry 4.0: Issues and Challenges.** Quality, IT and Business Operations, pp 231-250, 2017.
- KUMAR, A.; SAH, B.; SINGH, A. R.; DENG, Y.; HE, X.; KUMAR, P.; BANSAL, R. C. **A Review of Multi Criteria Decision Making (MCDM) Towards Sustainable Renewable Energy Development.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 69, pp 596-609, 2017.
- LEGÁT, V. et al. **Preventive maintenance models – higher operational reliability.** Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability, Vol.19, No. 1, 2017.
- LEI, X. et al. **PHM Based Predictive Maintenance Option Model for Offshore Wind Farm O&M Optimization.** ANNUAL CONFERENCE OF THE PROGNOSTICS AND HEALTH MANAGEMENT SOCIETY 2015.
- LIAO W.; PAN E.; XI L. **A condition-based maintenance policy for intelligent monitored system.** Int. J. Computer Applications in Technology, vol. 35, Nos. 2/3/4, 2009.
- LIN, J. T., CHEN, C. M. **Simulation optimization approach for hybrid flow shop scheduling problem in semiconductor back-end manufacturing.** Simulation Modelling Practice and Theory, v. 51, pp. 100-114, 2015.

LINNÉUSSON, G.; AMOS, H. C.; ASLAM, T. **Relating strategic time horizons and proactiveness in equipment maintenance: a simulation-based optimization study.** 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems. Procedia CIRP 72 (2018) 1293-1298.

LIU, Y. et al. **Workflow simulation for operational decision support using event graph through process mining.** Decision Support Systems, v. 52, pp. 685-697, 2012.

LOFSTEN, H. **Measuring maintenance performance in search for a maintenance productivity index.** International Journal of Production Economics 63 (1), 47-58, 2002.

LOPEZ-CAMPOS M. A.; MÁRQUEZ A. C.; FERNÁNDEZ J. F. G. **The Integration of Open Reliability, Maintenance, and Condition Monitoring Management Systems.** Advanced Maintenance Modelling for Asset Management. pp. 43-78, 2017.

LU, Y. et al. **Condition based maintenance optimization for offshore wind turbine considering opportunities based on neural network approach.** Applied Ocean Research. 74 (2018) 69-79.

LUNG, B. et al. **Using probabilistic relational models for knowledge representation of production systems: A new approach to assessing maintenance strategies.** CIRP Annals - Manufacturing Technology 61 (2012) 419-422.

LUNG NG, W. **An efficient and simple model for multiple criteria supplier selection problem.** European Journal of Operational Research. 186 (2008) 1059-1067.

MACHADO, Pedro Henrique Ferreira. **Metodologia de Modelagem CPN Aplicada a Análise de Desempenho de Sistemas de Comunicação baseados na Norma IEC 61850.** 2015. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.

MACHARIS, C.; SPRINGAEL, J.; BRUCKERC, K.; VERBEKE, A. **PROMETHEE and AHP: The Design of Operational Synergies in Multicriteria Analysis. Strengthening PROMETHEE with Ideas of AHP.** European Journal of Operational Research, Vol. 153 Issue: 2, 2004.

MARTIN, N.; DEPAIRE, B.; CARIS, A. **The use of process mining in a business process simulation context: Overview and challenges.** IEEE Symposium on Computational Intelligence and Data Mining (CIDM), Orlando, FL, pp. 381-388, 2014.

MARTIN, N.; DEPAIRE, B.; CARIS, A. **The Use of Process Mining in Business Process Simulation Model Construction.** Business & Information Systems Engineering. v. 58, Issue 1, pp 73-87, 2016.

- MARTIN, N.; DEPAIRE, B.; CARIS, A. **Using Event Logs to Model Interarrival Times in Business Process Simulation.** In: Reichert M., Reijers H. (eds) Business Process Management Workshops. BPM 2016. Lecture Notes in Business Information Processing, v. 256. Springer, Cham, 2016.
- MAJID, N. A. A.; MUTHALIF, A. G.A. **Mechatronics technology in predictive maintenance method.** 6th International Conference on Mechatronics - ICOM, 2017.
- MARUSTER, L.; VAN BEEST, L. **Redesigning business processes: a methodology based on simulation and process mining techniques.** Knowledge and Information Systems 21(3) 267-297, (2009).
- MATYAS, K.; NEMETH, T.; KOVACS, K.; GLAWAR, R. **A procedural approach for realizing prescriptive maintenance planning in manufacturing industries.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, v.66, 461-464, 2017.
- MEDINA-OLIVA, G., WEBER, P., LUNG, B. **PRM-based patterns for knowledge formalisation of industrial systems to support maintenance strategies assessment.** Reliab Eng Syst Saf (2013), 116: 38-56.
- MEDINA-OLIVA, G., WEBER, P., LUNG, B. **Industrial system knowledge formalization to aid decision making in Maintenance strategies assessment.** Eng Appl Artif Intell, (2015) 37: 343-60.
- MINAYO, M. C. S.; DESLANDES, S. F.; CRUZ, O.; GOMES, R. **Pesquisa social: teoria, método e criatividade.** Rio de Janeiro: Vozes, 1996.
- MO, H.; SANSAVINI, G.; XIE, M. **Performance-based maintenance of gas turbines for reliable control of degraded power systems.** Mechanical Systems and Signal Processing. 103 (2018) 398-412.
- MOURTZIS, D. et al. **Integrated Production and Maintenance Scheduling Through Machine Monitoring and Augmented Reality: An Industry 4.0 Approach.** Advances in Production Management Systems. 2017, pp 354-362.
- MUCHIRI, P.N. et al. **Empirical analysis of maintenance performance measurement in Belgian industries.** Int J Production Research 2010; Vol. 48, ed. 20, 5905-5924.
- MUCHIRI, P. et al. **Development of maintenance function performance measurement framework and indicators.** International Journal of Production Economics, v.131, Issue 1, pp. 295-302, 2011.
- MURATA, T. **Petri nets: Properties, analysis and applications.** Proceedings of the IEEE, IEEE, v. 77, n. 4, p. 541-580, 1989.
- NAKATUMBA, J., Westergaard M., Van der Aalst W.M.P. **Generating Event Logs with Workload-Dependent Speeds from Simulation Models.** In: Bajec M., Eder J. (eds) Advanced Information Systems Engineering Workshops. CAiSE 2012.

Lecture Notes in Business Information Processing, vol 112. Springer, Berlin, Heidelberg.

NICOLAI, R. P.; DEKKER, R. **Optimal maintenance of multi-component systems: A review.** In K. Kobayashi & D. N. Murthy (Eds.), *Complex system maintenance handbook* (pp. 263-286). London: Springer, 2008.

NIELSEN, J. S.; SORENSEN, J. D. **Computational framework for risk-based planning of inspections, maintenance and condition monitoring using discrete Bayesian networks.** *Structure and Infrastructure Engineering*. VOL. 14, nO. 8, 1082-1094, 2018.

NORAMBUENA, Brian Keith. **Integration of Process Mining and Simulation: A Survey of Applications and Current Research.** Springer International Publishing. WorldCIST'18, AISC 745, pp. 287-294, 2018.

NUDURUPATI, S.S. et al. **State of the art literature review on performance measurement.** *Comput Ind Eng* 2011; 60(2): 279-290.

NURCAHYO, R.; ARISAPUTRA, A. E. **Development of Maintenance Program with Markov-Simulation Method in Aviation Industry.** 2017 4th IEEE International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS), Salmabad, Bahrain.

PANG, C. K.; WANG, X.; ZHOU, J. **A Mixed Time-/Condition-based Precognitive Maintenance Framework using Support Vectors.** *Engineering and Applied Science*, (785), 2012.

PARIDA, A., KUMAR, U. (2006). **Maintenance performance measurement (MPM): issues and challenges.** *J Qual Mainten Eng*, 12, 239-251.

PATIDAR S. **Condition Monitoring and Maintenance Management for Precision Component Manufacturing Machines.** *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. v. 04 Issue: 12, 2017.

PERSONA, A., SGARBOSSA, F., PHAM, H. **Systemability function to optimisation reliability in random environment.** *International Journal of Mathematics in Operational Research*, 1 (3), 397-417, 2009.

PERSONA, A., PHAM, H., SGARBOSSA, F. **Age replacement policy in a random environment using systemability.** *International Journal of Systems Science* v. 41 (11), pp. 1383-1397, 2010.

PHAM, H. **Handbook of Reliability Engineering.** London: Springer, 2003.

PIECHNICKI, F.; LOURES, E. F. R.; SANTOS, E. A. P. **A conceptual framework of knowledge conciliation to decision making support in RCM deployment.** 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM2017, Modena, Italy.

PILEGGI, P.; RIVERO-RODRIGUES, A.; NYKANEN, O. **Towards Traditional Simulation Models of Context Using Process Mining**. 7th International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks, Riga, pp. 70-75, 2015.

PIEREZAN, R. **Modelagem e simulação de sistemas de manufatura em Rede de Petri Colorida**. Programa de pós-graduação em engenharia de produção e sistemas. Dissertação de mestrado, PUC PR, 2011.

POHEKAR, S. D.; RAMACHANDRAN, M. **Application of Multi-Criteria Decision Making to Sustainable Energy Planning – A Review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 8 Issue: 4, 2004.

PRACKWIESER, C. A. **Modeling Procedure for Information and Material Flow Analysis Comprising Graphical Models, Rules and Animated Simulation**. In: Buchmann R., Kifor C.V., Yu J. (eds) Knowledge Science, Engineering and Management. KSEM 2014. Lecture Notes in Computer Science, v. 8793. Springer, Cham, 2014.

PPOCESS MINING GROUP. Eindhoven University of Technology. (2018, Out.) **Process Mining Research Tools Application**. [Online]. <http://www.processmining.org/>

PUURUNEN, A.; MAJAVA, J.; KESS, P. **Exploring incomplete information in maintenance materials inventory optimization**. Industrial Management & Data Systems, V. 114 Issue: 1, pp.144-158, 2014.

RICHARDSON, R. J. **Pesquisa social: métodos e técnicas**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

RIZ, G. **Avaliação da interoperabilidade organizacional em sistemas de saúde baseado em mineração de processos e análise multicritério**. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2017.

RON, A.J. de; ROODA, J.E. **Equipment effectiveness: OEE revisited**. IEEE Transaction on Semiconductor Manufacturing. V. 18 pp. 190-196, 2005.

ROZINAT, A. et al. **Workflow Simulation for Operational Decision Support Using Design, Historic and State Information**. In: Dumas M., Reichert M., Shan MC. (eds) Business Process Management. BPM 2008. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 5240, Springer, Berlin, Heidelberg.

ROZINAT, A.; MANS, R.; SONG, M. (2009a) **Discovering simulation models**. Information Systems. V. 34(3) pp. 305-327.

ROZINAT, A.; WYNN, M.T.; VAN DER AALST, W.M.P; HOFSTEDE, A.H.M.; FIDGE, C.J. (2009b). **Workflow simulation for operational decision support**. Data & Knowledge Engineering, Volume 68, Issue 9, pp. 834-850.

RUSCHEL, E., SANTOS, E. A. P., LOURES, E. F. R. **Mining Shop-Floor Data for Preventive Maintenance Management: Integrating Probabilistic and Predictive Models.** 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, Modena, Italy, 2017a.

RUSCHEL, E., SANTOS, E. A. P., LOURES, E. F. R. **Industrial maintenance decision-making: A systematic literature review.** Journal of Manufacturing Systems, V. 45, PP.180-194, 2017b.

RUSCHEL, E., SANTOS, E. A. P., LOURES, E. F. R. **Establishment of maintenance inspection intervals: an application of process mining techniques in manufacturing.** Journal of Intelligent Manufacturing, pp. 1-20, Springer US, 2018.

SAADA, Y. et al. **"Mathematical Simulation Methods to Evaluate the Effects of Actions on Conditional Preventive Maintenance of Complex Systems"**., International Journal of Engineering Research in Africa, Vol. 35, pp. 38-59, 2018.

SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process.** New York: McGraw-Hill, 1980.

SABAEI, D.; ERKOYUNCU, J.; ROY, R. **A Review of Multi-Criteria Decision Making Methods for Enhanced Maintenance Delivery.** Procedia CIRP, Vol. 37, 2015.

SANTOS, C. F.; PIECHNICKI, F; LOURES, E. F. R.; SANTOS, E. A. P. **Mapping the Conceptual Relationship among Data Analysis, Knowledge Generation and Decision-Making in Industrial Processes.** 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM), 2017.

SANTOS, C.F. **Integração de conhecimento quali-quantitativo para apoio a tomada de decisão em MI com base em métodos multicritério e mineração de processos.** Qualificação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2018.

SANTOS, F. P.; TEIXEIRA, A. P.; GUEDES, C. **Maintenance Planning of an Offshore Wind Turbine Using Stochastic Petri Nets With Predicates.** Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Vol. 140 / 021904-1, 2018.

SAVICKAS, T.; VASILECAS, O. **An Approach to Business Process Simulation using Mined Probabilistic Models.** Computer Science and Information Systems, 15(1):31-50, 2018.

SEBASTIAN, W. **Simulation of manufacturing processes.** In W. Sauer (Ed.), Electronics process technology production modelling, simulation and optimisation (pp. 119-172). London: Springer, 2006.

SEECHARAN T., LABIB A., JARDINE A. **Maintenance strategies: Decision Making Grid vs Jack-Knife Diagram.** Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 24 Issue: 1, pp.61-78, 2018.

SENDEROVICH A. **Service Analysis and Simulation in Process Mining.** In: Fournier F., Mendling J. (eds) Business Process Management Workshops. BPM 2014. Lecture Notes in Business Information Processing, vol 202. Springer, Cham, 2015.

SÉNÉCHAL, O.; PIRES, S. P.; LOURES, E. F. R.; SANTOS, E. A. P.; CESTARI, J. M. P. A. **Knowledge management for sustainable performance in industrial maintenance.** Industrial and Systems Engineering Research Conference, 2015.

SHAFIEE, M. **Maintenance Strategy Selection Problem: An MCDM Overview.** Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 21 Issue: 4, 2015.

SILVA, M.R. et al. **Modeling of a Cyber-Attack in an IEC 61850 Scenario Using Stochastic Colored Petri Nets.** 4th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI 2017).

SIMOES, J.M.; GOMES, C.F.; YASIN, M.M. **A literature review of maintenance performance measurement: a conceptual framework and directions for future research.** J Qual Mainten Eng 2011; 17: 116-137.

SHARMA A.; YADAVA G.; DESHMUKH S. **A literature review and future perspectives on maintenance optimization.** J. Qual Maint Eng 2011;17(1):5-25.

SIMEU-ABAZI, Z.; BOUREDJI, Z. **Monitoring and predictive maintenance: Modeling and analyse of fault latency.** Computers in Industry, 57 (2006) 504-515.

STEFANOVIC, et al. **An assessment of maintenance performance indicators using the fuzzy sets approach and genetic algorithms.** J Engineering Manufacture, Vol. 231 (1), 15-27, 2017.

SZIMANSKI, F. et al. **Improving Business Process Models with Agent-Based Simulation and Process Mining.** In: Nurcan S. et al. (eds) Enterprise, Business-Process and Information Systems Modeling. BPMDS 2013, EMMSAD 2013. Lecture Notes in Business Information Processing, vol 147. Springer, Berlin, Heidelberg.

TAN, C. M.; RAGHAVAN N. **A framework to practical predictive maintenance modeling for multi-state systems.** Reliability Engineering and System Safety 93 (2008) 1138-1150.

TASCA, J. et al. **An approach for selecting a theoretical framework for the evaluation of training programs.** Journal of European Industrial Training, Vol. 34, N. 7, pp. 631-655, 2010.

THADURI, A. et al. **Process Mining for Maintenance Decision Support.** In: Kapur P., Klochkov Y., Verma A., Singh G. System Performance and Management Analytics. pp 279-293, 2018.

TINGA, T.; JANSSEN, R.H.P. **Simulation based comparison of predictive maintenance policies.** Safety, Reliability and Risk Analysis. 2013.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. **The modern approach to industrial maintenance management.** British Journal of Management, v. 14, p. 207-222, 2003.

TRIVIÑOS, A. N. S. **Introdução à pesquisa em ciências sociais: a pesquisa qualitativa em educação.** São Paulo: Atlas, 1987.

TSANG, A.H.C. **A strategic approach to managing maintenance performance.** Journal of Quality in Maintenance Engineering 4 (2), 87-94 (8), 1998.

WAEYENBERGH, G., Pintelon, L., 2002. **A framework for maintenance concept development.** International Journal of Production Economics 77, 299-313 2002.

WAEYENBERGH, G., Pintelon, L. **CIBOCOF: a framework for industrial maintenance concept development.** International Journal of Production Economics 121, 633-640, 2009.

WAKIRU, J. et al. **Maintenance optimization: Application of remanufacturing and repair strategies.** 25th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference. Procedia CIRP 69 (2018) 899-904.

WALEED, A.; RAMY, A.; ARISHA, A. **A hybrid process-mining approach for simulation modeling.** Winter Simulation Conference (WSC), Las Vegas, NV, pp. 1527-1538, 2017.

WANG N.; SUN S.; SI S. **Research of Predictive Maintenance for Deteriorating System Based on Semi-Markov Process.** 2009 16th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. Beijing, China.

WANG, Y.; ZACHAREWICZ, G.; TRAORÉ M. K.; CHEN D. **An integrative approach to simulation model discovery: Combining system theory, process mining and fuzzy logic.** Journal of Intelligent & Fuzzy Systems 34 (2018) 477-490.

WEBER, A., THOMAS, R. **Key Performance Indicators: Measuring & Managing the Maintenance Function.** Ivora Corporation, 2006.

VAN BEEST, N. R. T. P.; MARUSTER, L. **A Process Mining Approach to Redesign Business Processes - A Case Study in Gas Industry.** Ninth International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing, Timisoara, Romania, pp. 541-548, 2007.

Van der Aalst, W.M.P; H.A. Reijers, A.J.M.M. Weijters, B.F. van Dongen, A.K. Alves de Medeiros, M. Song, H.M.W. Verbeek. **Business process mining: an industrial application.** Information Systems. V.32, p.713-732, 2007.

VAN DER AALST, W. M. P. **Business Process Simulation Revisited.** EOMAS 2010, LNBIP 63, pp. 1-14. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.

VAN DER AALST, W. M. P.; Nakatumba, J.; Rozinat, A.; & Russell, N. **Business Process Simulation: How to get it right?** Handbook on Business Process Management, International Handbooks on Information Systems (pp. 317-342). Berlin: Springer-Verlag, 2010.

VAN DER AALST, W. M. P. **Process mining: overview and opportunities.** ACM Transactions on Management Information Systems (TMIS)3, no. 2: 7.2. 2012.

VAN DER AALST, W. M. P. **Process Mining: discovery, conformance and enhancement of business processes.** Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.

VATHOOPAN, M.; BRANDENBOURGER, B.; ZOITL, A. **A Human in the Loop Corrective Maintenance Methodology Using Cross Domain Engineering Data of Mechatronic Systems.** 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Berlin, Germany.

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

XU, L.; WEI, W.; CHEN, Y. Aiping LI. **Preventive Maintenance Planning in a Unreliable Production Line with a Branch Buffer.** 2017 IEEE 8th International Conference on CIS & RAM, Ningbo, China.

XU, Y.; ZHANG, Y.; ZHANG, S. **Uncertain Generalized Remaining Useful Life Prediction-driven Predictive Maintenance Decision.** 2015 Prognostics and System Health Management Conference (PHM). Beijing, China.

YANG, H. ZHANG, Z.; YIN, X. **A Novel Method of Decision-Making for Power Transformer Maintenance Based on Failure-Probability-Analysis.** IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING IEEJ Trans 2018; 13: 689-695.

YIN, H. et al. **An integrated model of statistical process control and maintenance based on the delayed monitoring.** Reliability Engineering and System Safety. 133 (2015) 323-333324.

YOU, Ming-Yi; MENG, G. **A predictive maintenance scheduling framework utilizing residual life prediction information.** Journal Process Mechanical Engineering. 227 issue: 185-197, 2012.

YUREK, I.; DIRANT, D.; BIRANT, K. U. **Interactive process miner: a new approach for process mining.** Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, v. 26: 1314 – 1328, 2018.

ZAHEDI-HOSSEINI, F.; SCARF, P.A. **Joint maintenance-inventory optimisation of parallel production systems.** Journal of Manufacturing Systems, 48 (Part A), pp. 73-86, 2018a.

ZAHEDI-HOSSEINI, F.; ARIS, A. S.; SCARF, P. A. **Optimisation of inspection policy for multi-line production systems.** European J. Industrial Engineering, Vol. 12, No. 2, 2018b.

ZARTE, M.; WUNDER, U.; PECHMANN, A. **Concept and first case study for a generic predictive maintenance simulation in AnyLogic™.** IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Beijing, China.

ZHANG, H.; LIU, Y.; LI, C.; JIAO, R. (2010). A Novel Approach of Process Mining with Event Graph. In: Setchi R., Jordanov I., Howlett R.J., Jain L.C. (eds) **Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems.** KES2010. Lecture Notes in Computer Science, vol 6276. Springer, Berlin, Heidelberg.

ZHONG, J. et al. **A RankBoost-Based Data-Driven Method to Determine Maintenance Priority of Circuit Breakers.** IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 33, NO. 3, JUNE 2018.

ZHOU X.; LEE L. X. **A dynamic opportunistic maintenance policy for continuously monitored systems.** Journal of Quality in Maintenance Engineering. Vol. 12 Issue: 3, pp.294-305, 2006.

APÊNDICE 1 – INFORMAÇÕES PARA CÁLCULO DOS INDICADORES

Informações necessários para cálculo dos indicadores da manutenção							
Nº	Informação	Plugin's / softwares					Sistema interno
		Basic Log Statistics	Fuzzy Miner	Heuristics Miner	Genetic Algorithm Plug-in	Disco	
1	Custo total de manutenção						X
2	Valor de substituição de ativos						X
3	Valor de produção menos o valor das matérias-primas mais custo externo de manutenção						X
4	Quantidade de saída	X			X	X	
5	Custo total de transformação da produção						X
6	Custo total de manutenção + custos de indisponibilidade relacionados à manutenção	X				X	X
7	Disponibilidade relacionada à manutenção	X				X	
8	Valor médio de estoque de materiais de manutenção						X
9	Custo interno total de pessoal gasto em manutenção						X
10	Custo total de pessoal externo gasto em manutenção						X
11	Custo total de manutenção contratada (interno + externo)						X
12	Custo total de materiais de manutenção						X
13	Custo de pessoal com manutenção indireta						X
14	Energia total usada						X
15	Custo de manutenção corretiva	X	X	X	X	X	X
16	Custo de manutenção preventiva	X	X	X	X	X	X
17	Custo de manutenção baseado em condições	X	X	X	X	X	X
18	Custo de manutenção preditiva	X	X	X	X	X	X
19	Custo de melhoria da manutenção						X
20	Custo de paradas de manutenção	X		X	X	X	X
21	Custo de treinamento para manutenção						X
22	Número de pessoal de manutenção					X	X
23	Custos totais de contratação de manutenção mecânica					X	X
24	Custos totais de contratação de manutenção elétrica					X	X

25	Custos totais de contratação de manutenção de instrumentação					X	X
26	Tempo total de operação	X				X	
27	Tempo de inatividade devido a manutenção	X				X	
28	Tempo atingido durante o tempo necessário	X					
29	Tempo requerido	X					
30	Número de falhas devido a manutenção, criando danos ambientais					X	
31	Intervalo de tempo	X				X	
32	Volume anual de resíduos ou efeitos nocivos relacionados à manutenção						X
33	Número de pessoas feridas devido a manutenção					X	
34	Tempo de trabalho	X				X	
35	Tempo de inatividade relacionado a falhas	X				X	
36	Tempo de inatividade total relacionado à manutenção	X				X	
37	Tempo de inatividade relacionado à manutenção planejada e programada	X				X	
38	Tempo de manutenção preventiva causando tempo de inatividade					X	
39	Tempo de manutenção preditiva que causa tempo de inatividade					X	
40	Tempo de manutenção baseado em condições que causa o tempo de inatividade					X	
41	Número de falhas que causam ferimentos em pessoas					X	
42	Número total de falhas	X	X	X	X	X	
43	Número de falhas que causam danos potenciais a pessoas	X	X			X	
44	Número de falhas que causam danos ao meio ambiente	X				X	
45	Número de falhas que causam danos potenciais ao meio ambiente					X	
46	Número de ordens de serviço de manutenção que causam tempo de inatividade				X	X	
47	Número de ordens de serviço de manutenção				X	X	
48	Número de sistemas cobertos por uma análise crítica						X
49	Número total de sistemas						X
50	Horas de trabalho usadas para planejamento de manutenção	X				X	
51	Total de horas de pessoal de manutenção	X				X	

52	Tempo total de manutenção planejada e programada que requer tempo de inatividade					X	
53	Tempo total para restauração	X				X	
54	Número de pessoal de manutenção	X				X	X
55	Total de funcionários						X
56	Número de pessoal de manutenção indireta	X				X	
57	Número de pessoal de manutenção direta	X				X	
58	Horas de trabalho de manutenção do operador de produção	X				X	
59	Total de horas de pessoal de manutenção direta	X				X	
60	Horas de trabalho de manutenção planejada e programada	X				X	
61	Número de ferimentos no pessoal de manutenção					X	X
62	Horas de trabalho perdidas devido a ferimentos no pessoal de manutenção					X	
63	Horas de trabalho usadas para melhoria contínua						X
64	Total de horas de operadores da produção	X				X	
65	Número de pessoal de manutenção direta no turno	X				X	
66	Tempo de manutenção corretiva					X	
67	Horas mecânicas internas					X	
68	Horas elétricas internas					X	
69	Horas de instrumentação interna					X	
70	Número de pessoal interno de manutenção Multi-qualificados						X
71	Homem-horas de manutenção corretiva					X	
72	Homem-horas de manutenção preventiva					X	
73	Homem-horas de manutenção baseada em condições					X	
74	Homem-horas de manutenção preditiva					X	
75	Horas extras de manutenção					X	
76	Número de ordens de serviço executadas					X	
77	Número total de ordens de serviço agendadas					X	
78	Horas de pessoal de manutenção para treinamento						X
79	Número de pessoas de manutenção direta interna usando software						X

80	Total de horas-homem planejadas e programadas para direcionar pessoal	X				X	
81	Número de peças de reposição fornecidas pelo armazém, conforme solicitado						X
82	Número total de peças de reposição necessárias para manutenção						X

APÊNDICE 2 – DETALHAMENTO DAS INFORMAÇÕES PARA CÁLCULO DOS INDICADORES DE MANUTENÇÃO

Ordem	Informação para cálculo	Dados necessários	
		Mineração de processos	Sistema interno
1	Custo total de manutenção	-	Idem
2	Valor de substituição de ativos	-	Idem
3	Valor de produção menos o valor das matérias-primas mais custo externo de manutenção	-	Idem
4	Quantidade de saída	Idem	-
5	Custo total de transformação da produção	Quantidade produzida	Custo total de produção
6	Custo total de manutenção + custos de indisponibilidade relacionados à manutenção	\sum Tempos de paradas	Custo total de manutenção
7	Disponibilidade relacionada à manutenção	<input checked="" type="checkbox"/> Tempos totais de trabalho <input checked="" type="checkbox"/> \sum Tempos de paradas	-
8	Valor médio de estoque de materiais de manutenção	-	Idem
9	Custo interno total de pessoal gasto em manutenção	-	Idem
10	Custo total de pessoal externo gasto em manutenção	-	Idem
11	Custo total de manutenção contratada (interno + externo)	-	Idem
12	Custo total de materiais de manutenção	-	Idem
13	Custo de pessoal com manutenção indireta	-	Idem
14	Energia Total Usada	-	Idem
15	Custo de manutenção corretiva	\sum Horas manutenção corretiva	Custo total de manutenção
16	Custo de manutenção preventiva	\sum Horas manutenção preventiva	Custo total de manutenção
17	Custo de manutenção baseado em condições	\sum Horas manutenção CBM	Custo total de manutenção
18	Custo de manutenção preditiva	\sum Horas manutenção preditiva	Custo total de manutenção
19	Custo de melhoria da manutenção	-	Idem
20	Custo de paradas de manutenção	Total de paradas	Custo total de manutenção
21	Custo de treinamento para manutenção	-	Idem
22	Número de pessoal de manutenção	Idem	Idem

23	Custos totais de contratação de manutenção mecânica	Σ Horas manutenção mecânica	Custo total de manutenção
24	Custos totais de contratação de manutenção elétrica	Σ Horas manutenção elétrica	Custo total de manutenção
25	Custos totais de contratação de manutenção de instrumentação	Σ Horas manutenção de instrumentação	Custo total de manutenção
26	Tempo total de operação	Idem	-
27	Tempo de inatividade devido a manutenção	Tempos de cada parada para manutenção	-
28	Tempo atingido durante o tempo necessário	Tempo de execução da tarefa	-
29	Tempo requerido	Tempo planejado para a tarefa	-
30	Número de falhas devido a manutenção, criando danos ambientais	Falhas catastróficas	-
31	Intervalo de tempo	Período de tempo analisado	-
32	Volume anual de resíduos ou efeitos nocivos relacionados à manutenção	-	Idem
33	Número de pessoas feridas devido a manutenção	Idem	-
34	Tempo de trabalho	✓ Tempo total ✓ Σ Tempos de paradas	-
35	Tempo de inatividade relacionado a falhas	Σ Tempos de paradas devido à falhas	-
36	Tempo de inatividade total relacionado à manutenção	Σ Tempos de paradas para manutenção com parada na produção	-
37	Tempo de inatividade relacionado à manutenção planejada e programada	Σ Tempos de paradas planejadas e não planejadas com parada na produção	-
38	Tempo de manutenção preventiva causando tempo de inatividade	Σ Tempos de manutenção preventiva com parada na produção	-
39	Tempo de manutenção preditiva que causa tempo de inatividade	Σ Tempos de manutenção preditiva com parada na produção	-
40	Tempo de manutenção baseado em condições que causa o tempo de inatividade	Σ Tempos de manutenção CBM com parada na produção	-
41	Número de falhas que causam ferimentos em pessoas	Idem	-
42	Número total de falhas	Idem	-
43	Número de falhas que causam danos potenciais a pessoas	Idem	-
44	Número de falhas que causam danos ao meio ambiente	Idem	-
45	Número de falhas que causam danos potenciais ao meio ambiente	Idem	-

46	Número de ordens de serviço de manutenção que causam tempo de inatividade	Ordens de serviço com parada na produção	-
47	Número de ordens de serviço de manutenção	Idem	-
48	Número de sistemas cobertos por uma análise crítica	-	Idem
49	Número total de sistemas	-	Idem
50	Horas de trabalho usadas para planejamento de manutenção	Σ Tempos para planejamento da manutenção	-
51	Total de horas de pessoal de manutenção	Idem	-
52	Tempo total de manutenção planejada e programada que requer tempo de inatividade	Σ Tempos utilizados para planejamento e programação da manutenção com parada na produção	-
53	Tempo total para restauração	Σ Tempos de reparo	-
54	Número de pessoal de manutenção	Idem	Idem
55	Total de funcionários	-	Idem
56	Número de pessoal de manutenção indireta	Idem	-
57	Número de pessoal de manutenção direta	Idem	-
58	Horas de trabalho de manutenção do operador de produção	Σ Tempos do operador de produção para manutenção	-
59	Total de horas de pessoal de manutenção direta	Idem	-
60	Horas de trabalho de manutenção planejada e programada	Idem	-
61	Número de ferimentos no pessoal de manutenção	Idem	Idem
62	Horas de trabalho perdidas devido a ferimentos no pessoal de manutenção	Idem	-
63	Horas de trabalho usadas para melhoria contínua	-	Idem
64	Total de horas de operadores da produção	Idem	-
65	Número de pessoal de manutenção direta no turno	Idem	-
66	Tempo de manutenção corretiva	Σ Tempos de manutenção corretiva interna	-
67	Horas mecânicas internas	Σ Tempos de manutenção mecânica interna	-
68	Horas elétricas internas	Σ Tempos de manutenção elétrica interna	-
69	Horas de instrumentação interna	Σ Tempos de manutenção para instrumentação interna	-
70	Número de pessoal interno de manutenção Multi-qualificados	-	Idem

71	Homem-horas de manutenção corretiva	Σ Tempos de manutenção corretiva	-
72	Homem-horas de manutenção preventiva	Σ Tempos de manutenção preventiva	-
73	Homem-horas de manutenção baseada em condições	Σ Tempos de manutenção CBM	-
74	Homem-horas de manutenção preditiva	Σ Tempos de manutenção preditiva	-
75	Horas extras de manutenção	Idem	-
76	Número de ordens de serviço executadas	Idem	-
77	Número total de ordens de serviço agendadas	Idem	-
78	Horas de pessoal de manutenção para treinamento	-	Idem
79	Número de pessoas de manutenção interna usando software	-	Idem
80	Total de horas-homem planejadas e programadas para direcionar pessoal	Σ Tempos de orientação de pessoal da manutenção	-
81	Número de peças de reposição fornecidas pelo armazém, conforme solicitado	-	Idem
82	Número total de peças de reposição necessárias para manutenção	-	Idem

APÊNDICE 3 – MATRIZ DE DECISÃO

Indicadores	Esp 1	Esp 2	Esp 3	Esp 4	Esp 5
E1	7	7	6	8	6
E2	3	4	4	5	2
E3	5	5	6	4	5
E4	7	6	6	5	8
E5	8	7	8	6	6
E6	8	7	7	8	8
E7	4	5	3	5	2
E8	9	8	9	9	9
E9	4	3	3	4	2
E10	3	4	5	5	3
E11	7	5	7	6	6
E12	2	3	2	1	2
E13	4	4	5	3	3
E14	1	2	2	1	3
E15	8	9	8	9	9
E16	9	10	9	9	8
E17	9	9	9	8	8
E18	7	7	6	9	6
E19	6	8	5	9	7
E20	10	9	9	10	10
E21	8	8	8	9	9
E22	5	6	6	4	7
E23	5	7	6	7	7
E24	4	3	2	2	2
T1	9	8	9	9	8
T2	2	2	3	1	1
T3	5	5	6	7	5
T4	2	2	1	4	1
T5	5	4	3	7	2
T6	8	9	7	9	10
T7	6	5	6	6	7
T8	10	8	9	10	9
T9	8	8	9	9	8
T10	5	7	7	10	6
T11	7	8	6	8	9
T12	2	3	1	3	2
T13	2	2	3	4	4
T14	1	1	2	2	2
T15	5	6	7	6	6
T16	8	7	9	5	8
T17	9	10	8	9	9
T18	1	1	1	1	1

T19	9	8	8	8	9
T20	1	2	1	3	2
T21	8	9	8	9	9
<hr/>					
O1	4	5	3	7	5
O2	1	2	1	3	4
O3	8	6	9	7	8
O4	6	8	8	5	9
O5	3	1	1	2	3
O6	7	5	4	6	6
O7	4	5	3	1	4
O8	7	9	9	10	8
O9	2	4	4	2	5
O10	2	3	3	5	1
O11	9	7	8	9	9
O12	8	6	9	8	8
O13	9	6	9	8	8
O14	6	5	7	8	5
O15	6	5	7	7	6
O16	9	10	10	9	9
O17	9	9	9	8	9
O18	10	10	9	9	10
O19	5	7	6	6	7
O20	7	6	7	8	6
O21	3	4	4	6	3
O22	5	6	9	5	6
O23	8	7	9	7	8
O24	4	3	5	7	3
O25	2	5	4	6	4
O26	6	5	2	5	7

APÊNDICE 4 – MATRIZ NORMALIZADA E PADRONIZADA

Pesos	1	1	1	1	1
Indicadores	Esp 1	Esp 2	Esp 3	Esp 4	Esp 5
E1	0,13154	0,13233	0,11069	0,14107	0,10997
E2	0,05637	0,07562	0,0738	0,08817	0,03666
E3	0,09396	0,09452	0,11069	0,07053	0,09164
E4	0,13154	0,11343	0,11069	0,08817	0,14662
E5	0,15033	0,13233	0,14759	0,1058	0,10997
E6	0,15033	0,13233	0,12914	0,14107	0,14662
E7	0,07516	0,09452	0,05535	0,08817	0,03666
E8	0,16912	0,15124	0,16604	0,1587	0,16495
E9	0,07516	0,05671	0,05535	0,07053	0,03666
E10	0,05637	0,07562	0,09225	0,08817	0,05498
E11	0,13154	0,09452	0,12914	0,1058	0,10997
E12	0,03758	0,05671	0,0369	0,01763	0,03666
E13	0,07516	0,07562	0,09225	0,0529	0,05498
E14	0,01879	0,03781	0,0369	0,01763	0,05498
E15	0,15033	0,17014	0,14759	0,1587	0,16495
E16	0,16912	0,18905	0,16604	0,1587	0,14662
E17	0,16912	0,17014	0,16604	0,14107	0,14662
E18	0,13154	0,13233	0,11069	0,1587	0,10997
E19	0,11275	0,15124	0,09225	0,1587	0,12829
E20	0,18791	0,17014	0,16604	0,17634	0,18328
E21	0,15033	0,15124	0,14759	0,1587	0,16495
E22	0,09396	0,11343	0,11069	0,07053	0,12829
E23	0,09396	0,13233	0,11069	0,12344	0,12829
E24	0,07516	0,05671	0,0369	0,03527	0,03666
T1	0,16912	0,15124	0,16604	0,1587	0,14662
T2	0,03758	0,03781	0,05535	0,01763	0,01833
T3	0,09396	0,09452	0,11069	0,12344	0,09164
T4	0,03758	0,03781	0,01845	0,07053	0,01833
T5	0,09396	0,07562	0,05535	0,12344	0,03666
T6	0,15033	0,17014	0,12914	0,1587	0,18328
T7	0,11275	0,09452	0,11069	0,1058	0,12829
T8	0,18791	0,15124	0,16604	0,17634	0,16495
T9	0,15033	0,15124	0,16604	0,1587	0,14662
T10	0,09396	0,13233	0,12914	0,17634	0,10997
T11	0,13154	0,15124	0,11069	0,14107	0,16495
T12	0,03758	0,05671	0,01845	0,0529	0,03666
T13	0,03758	0,03781	0,05535	0,07053	0,07331
T14	0,01879	0,0189	0,0369	0,03527	0,03666
T15	0,09396	0,11343	0,12914	0,1058	0,10997
T16	0,15033	0,13233	0,16604	0,08817	0,14662
T17	0,16912	0,18905	0,14759	0,1587	0,16495

T18	0,01879	0,0189	0,01845	0,01763	0,01833
T19	0,16912	0,15124	0,14759	0,14107	0,16495
T20	0,01879	0,03781	0,01845	0,0529	0,03666
T21	0,15033	0,17014	0,14759	0,1587	0,16495
O1	0,07516	0,09452	0,05535	0,12344	0,09164
O2	0,01879	0,03781	0,01845	0,0529	0,07331
O3	0,15033	0,11343	0,16604	0,12344	0,14662
O4	0,11275	0,15124	0,14759	0,08817	0,16495
O5	0,05637	0,0189	0,01845	0,03527	0,05498
O6	0,13154	0,09452	0,0738	0,1058	0,10997
O7	0,07516	0,09452	0,05535	0,01763	0,07331
O8	0,13154	0,17014	0,16604	0,17634	0,14662
O9	0,03758	0,07562	0,0738	0,03527	0,09164
O10	0,03758	0,05671	0,05535	0,08817	0,01833
O11	0,16912	0,13233	0,14759	0,1587	0,16495
O12	0,15033	0,11343	0,16604	0,14107	0,14662
O13	0,16912	0,11343	0,16604	0,14107	0,14662
O14	0,11275	0,09452	0,12914	0,14107	0,09164
O15	0,11275	0,09452	0,12914	0,12344	0,10997
O16	0,16912	0,18905	0,18449	0,1587	0,16495
O17	0,16912	0,17014	0,16604	0,14107	0,16495
O18	0,18791	0,18905	0,16604	0,1587	0,18328
O19	0,09396	0,13233	0,11069	0,1058	0,12829
O20	0,13154	0,11343	0,12914	0,14107	0,10997
O21	0,05637	0,07562	0,0738	0,1058	0,05498
O22	0,09396	0,11343	0,16604	0,08817	0,10997
O23	0,15033	0,13233	0,16604	0,12344	0,14662
O24	0,07516	0,05671	0,09225	0,12344	0,05498
O25	0,03758	0,09452	0,0738	0,1058	0,07331
O26	0,11275	0,09452	0,0369	0,08817	0,12829

APÊNDICE 5 – RANKING DOS INDICADORES ($\geq 0,80$)

Indicadores	D+	D ⁻	C	Rank
E1	1,35863E-01	2,40253E-01	0,63877	
E2	2,67757E-01	1,14032E-01	0,29868	
E3	2,06882E-01	1,67482E-01	0,44738	
E4	1,53165E-01	2,27136E-01	0,59725	
E5	1,27829E-01	2,51034E-01	0,66260	
E6	1,01389E-01	2,72246E-01	0,72864	
E7	2,59993E-01	1,24775E-01	0,32429	
E8	5,26300E-02	3,21393E-01	0,85929	3
E9	2,82125E-01	9,54120E-02	0,25272	
E10	2,50821E-01	1,28038E-01	0,33796	
E11	1,59768E-01	2,16460E-01	0,57534	
E12	3,29514E-01	4,95881E-02	0,13080	
E13	2,56482E-01	1,20116E-01	0,31895	
E14	3,38976E-01	4,51819E-02	0,11761	
E15	6,14667E-02	3,13452E-01	0,83605	5
E16	4,84567E-02	3,31197E-01	0,87237	2
E17	6,03182E-02	3,14566E-01	0,83910	4
E18	1,32385E-01	2,49771E-01	0,65358	
E19	1,37560E-01	2,52546E-01	0,64738	
E20	2,64153E-02	3,54477E-01	0,93065	1
E21	6,96444E-02	3,04781E-01	0,81400	6
E22	1,84957E-01	1,94898E-01	0,51308	
E23	1,52682E-01	2,24303E-01	0,59499	
E24	3,05625E-01	7,47983E-02	0,19662	
T1	6,14626E-02	3,13456E-01	0,83606	3
T2	3,38446E-01	4,55190E-02	0,11855	
T3	1,85485E-01	1,90908E-01	0,50720	
T4	3,33833E-01	5,92369E-02	0,15070	
T5	2,50337E-01	1,47505E-01	0,37076	
T6	7,17223E-02	3,15497E-01	0,81478	6
T7	1,67418E-01	2,07175E-01	0,55307	
T8	4,58897E-02	3,38500E-01	0,88062	1
T9	6,95483E-02	3,04891E-01	0,81426	7
T10	1,43116E-01	2,53680E-01	0,63932	
T11	1,07857E-01	2,74714E-01	0,71807	
T12	3,23134E-01	5,79861E-02	0,15215	
T13	2,92296E-01	8,88463E-02	0,23311	
T14	3,47467E-01	3,14201E-02	0,08293	
T15	1,67210E-01	2,07387E-01	0,55363	
T16	1,18687E-01	2,70900E-01	0,69535	
T17	4,85946E-02	3,31096E-01	0,87202	2
T18	3,70831E-01	0,00000E+00	0,00000	

T19	6,87303E-02	3,05817E-01	0,81650	5
T20	3,40264E-01	4,40124E-02	0,11453	
T21	6,14667E-02	3,13452E-01	0,83605	4
O1	2,22533E-01	1,63788E-01	0,42397	
O2	3,26150E-01	6,80026E-02	0,17253	
O3	1,07765E-01	2,75090E-01	0,71852	
O4	1,28648E-01	2,63612E-01	0,67203	
O5	3,31936E-01	5,53806E-02	0,14299	
O6	1,86322E-01	1,94074E-01	0,51019	
O7	2,74962E-01	1,15243E-01	0,29534	
O8	7,22452E-02	3,14666E-01	0,81328	4
O9	2,75711E-01	1,10989E-01	0,28702	
O10	3,02938E-01	9,01071E-02	0,22925	
O11	7,46861E-02	3,05846E-01	0,80373	5
O12	1,00292E-01	2,82341E-01	0,73789	
O13	9,48644E-02	2,91570E-01	0,75451	
O14	1,65195E-01	2,17739E-01	0,56861	
O15	1,60689E-01	2,15386E-01	0,57272	
O16	3,16222E-02	3,47155E-01	0,91652	2
O17	5,12890E-02	3,22475E-01	0,86278	3
O18	2,55208E-02	3,55589E-01	0,93304	1
O19	1,59651E-01	2,16545E-01	0,57562	
O20	1,36301E-01	2,39863E-01	0,63766	
O21	2,52698E-01	1,29652E-01	0,33909	
O22	1,67435E-01	2,23027E-01	0,57119	
O23	9,54543E-02	2,82145E-01	0,74721	
O24	2,40814E-01	1,50303E-01	0,38429	
O25	2,46688E-01	1,41179E-01	0,36399	
O26	2,17175E-01	1,78758E-01	0,45148	

ANEXO 1 – INDICADORES DE DESEMPENHO (EN 15341-2007)

BRITISH STANDARD**BS EN
15341:2007**

Maintenance — Maintenance Key Performance Indicators

The European Standard EN 15341:2007 has the status of a
British Standard

ICS 03.100.99

BSi

British Standards

1 Scope

This European standard describes a system for managing Key Performance Indicators to measure maintenance performance in the framework of the influencing factors such as economical, technical and organisational aspects, to appraise and to improve efficiency and effectiveness to achieve excellence in maintaining Technical Assets.

2 Normative references

The following referenced documents are indispensable for the application of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

EN 13306:2001, *Maintenance Terminology*

IEC 60050-191:1990 *International electrotechnical vocabulary; chapter 191: dependability and quality of service*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document the terms and definitions given in EN 13306:2001, IEC 60050-191:1990 and Annex A of this document, together with the following apply.

3.1

indicator

measured characteristic (or a set of characteristics) of a phenomenon, according to a given formula, which assess the evolution

NOTE Indicators are related to objectives.

3.2

scorecard

set of associated, consistent and complementary indicators providing synthetic and global information

NOTE It is a tool for the development and implementation of a strategy and for monitoring progress towards the goals outlined in the strategy.

4 Maintenance Performance

Maintenance Performance is the result of actively using resources to retain an item, or restore it to a state in which it can perform its required function. It can be expressed as an achieved or expected result.

Maintenance Performance depends on both external and internal factors such as: location, culture, and transformation and service processes, size, utilization rate age and is achieved by implementing labour, corrective, preventive and improvement maintenance, using information, materials, organisational methodologies, tools and operating techniques.

Maintenance Performance is an outcome of complex activities which can be evaluated by appropriate indicators to measure both the actual and expected results.

5 System of indicators

5.1 General

To cover this aspect of maintenance, this system of key performance indicators is structured into three groups: economic, technical and organisational.

These proposed indicators can be evaluated as a ratio between factors (numerator and denominator) measuring activities, resources or events, according to a given formula.

These indicators are used to measure any quantitative aspect or characteristic of an indenture level and homogeneous comparison.

Whenever a factor is defined using the words "internal" or "external", the derived indicator, should also be used only for "internal" or "external" influences.

5.2 Objectives

When the actual or expected performance is not satisfactory, it encourages management to define objectives and strategies to improve from an economic, technical or organisational point of view using the following system of indicators, allowing the organisation to:

- a) measure the status;
- b) evaluate the performance;
- c) compare performance;
- d) identify strengths and weaknesses;
- e) control progress and changes over time.

Measurement and analysis of these indicators can help management to:

- f) set objectives;
- g) plan strategies and actions;
- h) share the results in order to inform and motivate people.

These indicators can be used:

- i) on a periodic basis, for instance by preparing and following-up a budget, and during performance assessment;
- j) on a spot basis, for instance within the framework of specific audits, studies and/or benchmarking.

The period of time to be considered for measurement depends on the company policy and management approach.

5.3 Architecture of key indicators

Figure 1 illustrates the external and internal factors that influence maintenance performance and consequently the three groups of key indicators.

External factors are variable conditions outside company management control.

Internal factors are referred to the group, company, factory, plant outside of the maintenance management control, but inside of the company management control.

When using the key maintenance performance indicators, it is important to consider these influencing factors as prerequisites to avoid misleading evaluations and comparisons due to not having homogeneous conditions.

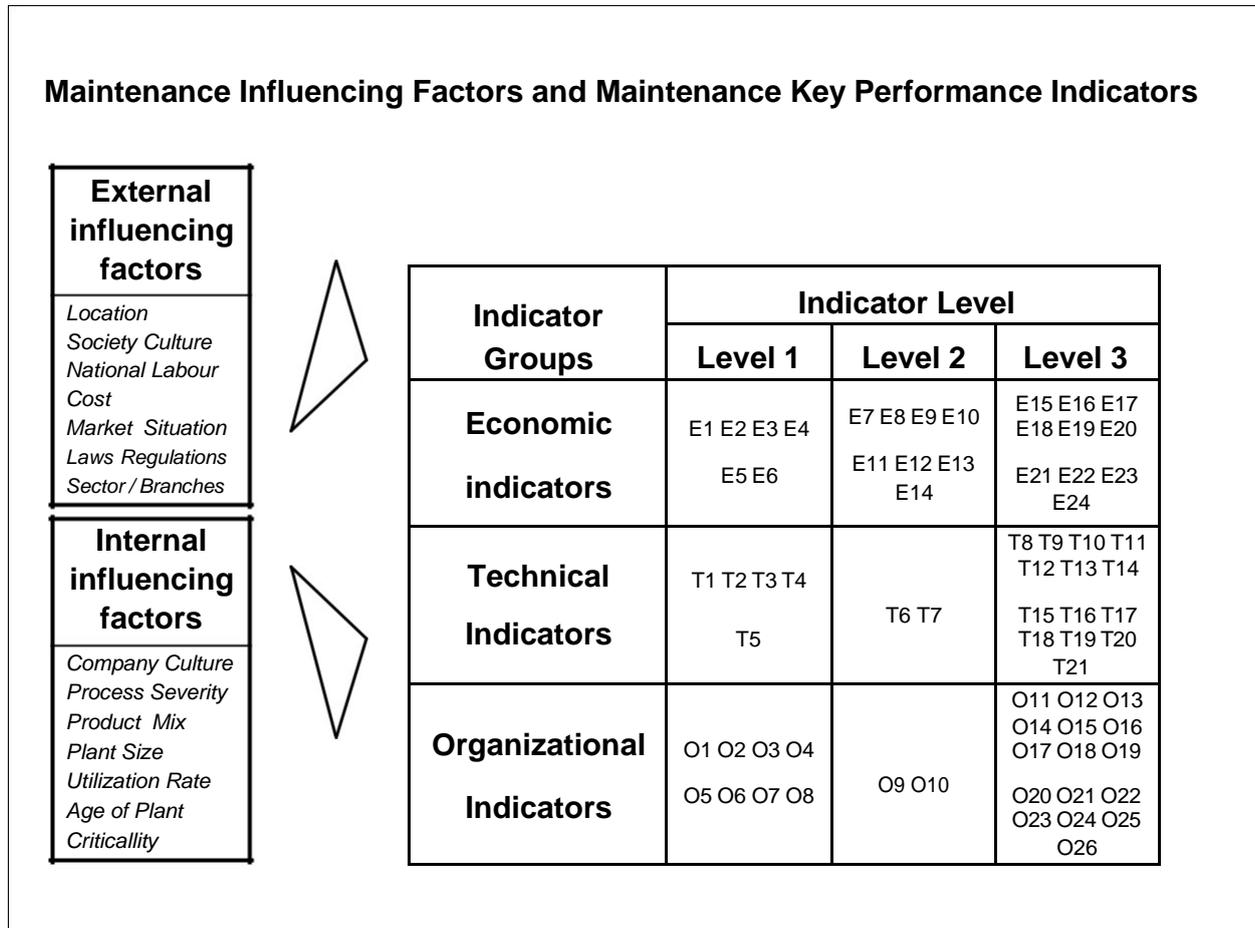


Figure 1 —Maintenance influencing factors and Maintenance Key Performance Indicators

6 Indicators

6.1 General

When calculating the indicators, denominator and numerator, factors shall be referred to the same activity/item and to the same period of time (year, quarter, month, etc.). These factors are defined and explained in Annex A of this document.

Most indicators can be used at different levels depending on whether they are used to measure the performance of plant production, one production line, or a given equipment or item, etc.

The indicators in this standard are structured in levels that represent their breakdown structure. Indicators below level one are a detailed description of indicators at a higher level. The magnitude and number of levels may be established by each company.

The indicators in this standard are numbered by level as a means of identification, not to indicate importance.

These indicators refer to internal maintenance, external maintenance or both.

The term “Time” is generally used to describe time units related to equipment and its performance.

The terms “Hours” or “Man-hours” describes the hours delivered to maintenance activities.

6.2 Economical Key Indicators

6.2.1 LEVEL 1

E1	$\frac{\text{Total Maintenance Cost}}{\text{Assets Replacement Value}}$	x 100
E2	$\frac{\text{Total Maintenance Cost}}{\text{Added value plus external costs for maintenance}}$	x 100
E3	$\frac{\text{Total Maintenance Cost}}{\text{Quantity of output}}$	
E4	$\frac{\text{Total Maintenance Cost}}{\text{Production transformation cost}}$	x 100
E5	$\frac{\text{Total Maintenance Cost + unavailability costs related to maintenance}}{\text{Quantity of output}}$	
E6	$\frac{\text{Availability related to maintenance}}{\text{Total Maintenance Cost}}$	

6.2.2 LEVEL 2

E7	$\frac{\text{Average inventory value of maintenance materials}}{\text{Asset Replacement Value}}$	x 100
E8	$\frac{\text{Total internal personnel cost spent in maintenance}}{\text{Total Maintenance Cost}}$	x 100

E9	<u>Total external personnel cost spent in maintenance</u> Total Maintenance Cost	x 100
E10	<u>Total contractor cost</u> Total maintenance cost	x 100
E11	<u>Total cost of maintenance materials</u> Total maintenance cost	x 100
E12	<u>Total cost of maintenance materials</u> Average inventory value of Maintenance materials	= Warehouse turnover
E13	<u>Cost for indirect maintenance personnel</u> Total Maintenance Cost	x 100
E14	<u>Total Maintenance Cost</u> Total Energy Used	
6.2.3 LEVEL 3		
E15	<u>Corrective maintenance cost</u> Total Maintenance Cost	x 100
E16	<u>Preventive maintenance cost</u> Total Maintenance Cost	x 100
E17	<u>Condition based maintenance cost</u> Total Maintenance Cost	x 100
E18	<u>Predetermined maintenance cost</u> Total Maintenance Cost	x 100
E19	<u>Improvement maintenance cost</u> Total Maintenance Cost	x 100
E20	<u>Maintenance shutdown cost</u> Total Maintenance Cost	x 100

E21	<u>Cost of training for maintenance</u> Number of maintenance personnel	unit of value / person
E22	<u>Total Mechanical maintenance contractor costs</u> Total maintenance contractor costs	x 100
E23	<u>Total Electrical maintenance contractor costs</u> Total maintenance contractor costs	x 100
E24	<u>Total Instrumentation maintenance contractor costs</u> Total maintenance contractor costs	x 100

6.3 Technical key indicators

6.3.1 LEVEL 1

T1	<u>Total Operating time</u> Total Operating time + Downtime due to maintenance	x 100 (availability related to maintenance)
T2	<u>Achieved up time during required time</u> Required time	x 100 (operational availability)
T3	<u>Number of failures due to maintenance creating environmental damage</u> Calendar time	
T4	<u>Annual volume of wastes or harmful effects related to maintenance</u> Calendar time	
T5	<u>Number of injuries for people due to maintenance</u> Working time	

6.3.2 LEVEL 2

T6	<u>Total operating time</u> (Total operating time + Downtime related to failures)	x 100
T7	<u>Total operating time</u> (Total operating time + Downtime related to planned and scheduled maintenance)	x 100

6.3.3 LEVEL 3

T8	<u>Preventive maintenance time causing downtime</u> Total downtime related to maintenance	x 100
T9	<u>Predetermined maintenance time causing downtime</u> Total downtime related to maintenance	x 100
T10	<u>Condition based maintenance time causing downtime</u> Total downtime related to maintenance	x 100
T11	<u>Number of failures causing injury to people</u> Total number of failures	x 100
T12	<u>Number of failures causing potential injury to people</u> Total number of failures	x 100
T13	<u>Number of failures causing damage to the environment</u> Total number of failures	x 100
T14	<u>Number of failures causing potential damage to the environment</u> Total number of failures	x 100
T15	<u>Total Operating time</u> Number of maintenance work-orders causing downtime	
T16	<u>Total Operating time</u> Number of maintenance work-orders	
T17	<u>Total operating time</u> Number of failures	= MTBF
T18	<u>Number of systems covered by a critical analysis</u> Total number of systems	x 100
T19	<u>Man-hours used for planning in a systematic maintenance planning process</u> Total internal maintenance personnel man-hours	x 100
T20	<u>Planned and scheduled maintenance time causing production downtime</u> Planned and scheduled total maintenance time requiring downtime	x 100
T21	<u>Total time to restoration</u> Number of failures	= MTTR

6.4 Organisational indicators

6.4.1 LEVEL 1

O1	<u>Number of internal maintenance personnel</u> Total internal employees	x 100
O2	<u>Number of indirect maintenance personnel</u> Number of internal maintenance personnel	x 100
O3	<u>Number of indirect maintenance personnel</u> Number of direct maintenance personnel	x 100
O4	<u>Production operator maintenance man-hours</u> Total direct maintenance personnel man-hours	x 100
O5	<u>Planned and scheduled maintenance man-hours</u> Total maintenance man-hours available	x 100
O6	<u>Number of injuries to maintenance personnel</u> Total maintenance personnel	x 10000 (frequency rate)
O7	<u>Man-hours lost due to injuries for maintenance personnel</u> Total man-hours worked by maintenance personnel	x 10000 (severity rate)
O8	<u>Man-hours used for continuous improvement</u> Total maintenance personnel man-hours	x 100

6.4.2 LEVEL 2

O9	<u>Production operator maintenance man-hours</u> Total production operators man-hours	x 100
O10	<u>Direct maintenance personnel on shift</u> Total direct maintenance personnel	x 100

6.4.3 LEVEL 3

O11	<u>Immediate corrective maintenance time</u> Total downtime related to maintenance	x 100
O12	<u>Internal mechanical man-hours</u> Total internal direct maintenance personnel man-hours	x 100

O13	<u>Internal electrical man-hours</u> Total internal direct maintenance personnel man-hours	x 100
O14	<u>Internal instrumentation man-hours</u> Total internal direct maintenance personnel man-hours	x 100
O15	<u>Number of internal Multi-skilled maintenance personnel</u> Number of internal maintenance personnel	x 100
O16	<u>Corrective maintenance man-hours</u> Total maintenance man-hours	x 100
O17	<u>Immediate Corrective maintenance man-hours</u> Total maintenance man-hours	x 100
O18	<u>Preventive maintenance man-hours</u> Total maintenance man-hours	x 100
O19	<u>Condition based maintenance man-hours</u> Total maintenance man-hours	x 100
O20	<u>Predetermined maintenance man-hours</u> Total maintenance man-hours	x 100
O21	<u>Overtime internal maintenance man-hours</u> Total internal maintenance man-hours	x 100
O22	<u>Number of work orders performed as scheduled</u> Total number of scheduled work orders	x 100
O23	<u>Number of maintenance internal personnel man-hours for training</u> Total internal maintenance man-hours	x 100
O24	<u>Number of internal direct maintenance people using software</u> Number of internal direct maintenance personnel	x 100
O25	<u>Total man-hours spent by direct personnel on planned and scheduled activities</u> Total man-hours planned and scheduled to direct personnel	x 100
O26	<u>Number of the spare parts supplied by the warehouse as requested</u> Total number of spare parts required by maintenance	x 100