

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Pedro Henrique Librelon de Faria

ESTUDOS DE CONFIABILIDADE DE MANUTENÇÃO
EM SISTEMAS DE EXPEDIÇÃO DE PRODUTOS DE
MINERAÇÃO

Porto Alegre

2014

Pedro Henrique Librelon de Faria

**ESTUDOS DE CONFIABILIDADE DE MANUTENÇÃO EM SISTEMAS DE
EXPEDIÇÃO DE PRODUTOS DE MINERAÇÃO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia, na área de concentração em Sistemas de Qualidade.

Orientador: Professor Orientador, Dr. José Luis Duarte Ribeiro

Porto Alegre

2014

Pedro Henrique Librelon de Faria

**ESTUDOS DE CONFIABILIDADE DE MANUTENÇÃO EM SISTEMAS DE
EXPEDIÇÃO DE PRODUTOS DE MINERAÇÃO**

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. José Luis Duarte Ribeiro, Dr.
Orientador PPGEP/UFRGS

Prof. José Luis Duarte Ribeiro, Dr.
Coordenador PPGEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Professor Michel José Anzanello, Dr. (PPGEP/UFRGS)

Herbert Ricardo Garcia Viana, Dr. (VALE S.A.)

Angélica Alebrant Mendes, Dra. (UFRGS)

Dedicatória
À Gislaine Yuka Yoshikawa de Faria
e Ligia Sayuri Yoshikawa de Faria
pelo amor, compreensão
e suporte em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. José Luis Duarte Ribeiro pela cuidadosa orientação, oportunidade, confiança, dedicação, amizade, paciência e apoio prestado durante todo o desenvolvimento e realização deste trabalho.

Ao Dr. Herbert Ricardo Garcia Viana pelo apoio, confiança, oportunidade, incentivo e amizade desde o início dos trabalhos na Usina de Beneficiamento em Carajás.

Aos amigos Andreeison Wdson de Medeiros Rocha, Djavan Mendes Moreira, Leonardo Marques Braga, James de Sousa Carvalho e Raimundo Bezerra Almeida pela participação nas discussões, incentivo, esclarecimentos e comprometimento com o desenvolvimento do trabalho.

Aos amigos da Usina de Beneficamento Ary dos Santos Masiero, Ediney Maia Drummond, Henrique Oscar de Miranda Junior, Marcelo Augusto Zucon de Oliveira, Marcos Rogério de Medeiros Almeida e Tiago Sarmento Leite pela cooperação e ótimo ambiente de trabalho.

A todo pessoal da GETAN/GAMSN, em especial aos amigos Antonio Carlos Diniz Ferreira, Carlos Henrique Silva Santos, Emerson Klippel, Lúcio Vagner Carvalho Neiva, Raimundo Reginaldo da Rocha Freires, Ricardo Alexandre Torres e Sérgio Correia da Silva pela paciência, apoio e suporte nas atividades do dia-a-dia.

À Elizangela de Fátima Bento Maciel, pela cuidadosa organização das informações no trabalho do grupo focado.

A todo pessoal da GETAN/GATEN, em especial ao Marcos Alves de Oliveira Neto pela aplicação do simulador, várias conversas e sugestões.

A todo pessoal da GETAN/GATON, em especial à Katia Fernandes Rocha pela ajuda na captura das informações das atividades de manutenção realizadas.

À VALE S.A. pelo apoio e fomento à este trabalho.

A todos aqueles que dedicaram atenção a este trabalho e que foram involuntariamente omitidos.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de confiabilidade e manutenção em sistemas de expedição de produtos de mineração. O estudo envolveu o desenvolvimento e aplicação de um simulador que permite prever (e utilizar) janelas de oportunidade para manutenção. O simulador foi desenvolvido considerando o caso da mina de Carajás no Pará, uma das maiores do país. Para tal, foi elaborado um modelo heurístico para prever as janelas de oportunidade, de forma a capturá-las para atividades de manutenção. Esse modelo foi baseado em conhecimentos prévios do pesquisador sobre o problema e estudo da lógica de operação do sistema, dando origem a um aplicativo que foi nomeado Mosaico de Simulação da Expedição. Apoiado no modelo desenvolvido e nos resultados de um grupo focado com lideranças e especialistas com experiência técnica no assunto, foram estabelecidas novas diretrizes e procedimentos de manutenção, buscando otimizar o aproveitamento das oportunidades e, conseqüentemente, melhorar o desempenho do sistema em estudo. O trabalho foi dividido em três etapas principais, sendo: (i) Proposição de um modelo para previsão de janelas de oportunidade para sistemas de expedição para produtos de mineração, adequado ao caso da mina de Carajás; (ii) Estabelecimento de uma proposta de estrutura e rotina da manutenção necessária para aproveitar a previsão mais precisa das janelas de oportunidade de intervenção. e (iii) Aplicação do modelo em estudo junto ao sistema real de expedição na mina de Carajás, visando avaliação e aprimoramento do mesmo. Os resultados iniciais obtidos com a aplicação da sistemática desenvolvida indicaram um aumento de 15,9% no MTBF em comparação com a média dos valores apurados do trimestre anterior à aplicação do estudo. Estima-se que este incremento proporcionou um aumento de 422 toneladas/dia no Volume de Minério Expedido na mina de Carajás no Pará, usando a mesma base de comparação. A partir desta estimativa, e considerando que todas as condições, recursos, estrutura operacional, preços e demanda por minério de ferro à qual o estudo foi aplicado sejam mantidas, pode-se aferir um ganho de faturamento mensal de US\$ 1,04 milhões, totalizando US\$ 10,7 milhões em um ano. Ganhos maiores podem ser esperados à medida em que a equipe de manutenção obtenha maior experiência no uso da sistemática proposta.

Palavras-chave: Mineração. Sistemas de Expedição. Simulação. Confiabilidade. Gestão da Manutenção.

ABSTRACT

This work presents a reliability study of maintenance in expedition systems for mining products. The study involved the development and implementation of a simulator that can predict (and use) windows of opportunity for maintenance activities. The simulator was developed considering the case of the Carajas mine in Pará, one of the largest in the country. For such system, a heuristic model for predicting the windows of opportunity in order to capture them for maintenance activities was design through the application of a simulator. This model was based on the researcher's prior knowledge about the problem and operation logic of the system, resulting in an applet called Expedition Mosaic Simulator. New guidelines and maintenance procedures have been established, supported in the simulator and a focus group development that included leaders and specialists with expertise in the subject. The main objetctive was optimize the opportunities and consequently improve the performance of the system under study. The work was divided into three main stages, namely: (i) Proposal of a model to predict the windows of opportunity for maintenance activities in the expedition systems for mining products, appropriate to the case of Carajás mine; (ii) Establishment of a proposal for maintenance structure and routine required to capture the most accurate forecast of windows of opportunity, and (iii) Application of the model at the actual expedition system in the Carajás mine, aiming to evaluate and improve it. Initial results obtained by applying the developed systematic indicated an increase of 15.9% in the MTBF value compared to the average values from the previous quarter to the implementation of the study. It is estimated that this results had also increased the Volume Loaded in Carajas mine in Pará in 422 tonnes / day of iron ore, using the same basis of comparison. Based on this estimative, and considering that all the conditions, resources, operational structure, prices and demand for iron ore at which the study has been applied are kept, a gain of US\$ 1.04 million in monthly sales might be infered, thus totaling US\$ 10.7 million in one year. Further gains can be expected as the maintenance team get experienced in the use of systematic proposed.

Key words: Mining. Expedition Systems. Simulation. Reliability. Maintenance Management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema Ferroviário de Carajás	14
Figura 2 – Processo de Modelagem	32
Figura 3 – Principais produtos de minério de ferro em Carajás - Pellet Feed, Sinter Feed e Lump Ore	38
Figura 4 – Diagrama esquemático e foto de Correia Transportadora.....	40
Figura 5 – Diagrama esquemático e foto de Recuperadora.....	40
Figura 6 – Diagrama esquemático e foto de Silo de Carregamento	41
Figura 7 – Diagrama esquemático do sistema de expedição em Carajás	41
Figura 8 – Diagrama Sequencial de Composição dos Indicadores (linha de carregamento)	45
Figura 9 – Diagrama Sequencial de Composição dos Indicadores (sistema de expedição).....	46
Figura 10 – Fluxograma da rotina de preenchimento de manutenção de linhas no mosaico	50
Figura 11 – Fluxograma da rotina de preenchimento de carregamento de trens no mosaico.....	52
Figura 12 – Interface do Mosaico de Simulação da Expedição	54
Figura 13 – Relatório Final de Oportunidades de Manutenção.....	55
Figura 14 - Valores observados do indicador Tempo Médio de Carregamento da Expedição	71
Figura 15 - Valores observados do indicador MTBF da Expedição	71
Figura 16 – Volumes de Minério Expedido em toneladas/dia	72
Figura 17 – Preço Médio Minério de Ferro Mercado Externo	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre custos de modais no Brasil (base em ton x km)	18
Tabela 2 – Capacidade dos equipamentos do sistema de expedição em Carajás	42
Tabela 3 – Indicadores de interesse do sistema de expedição em Carajás	45
Tabela 4 – Comparativo de janelas de oportunidades, Real x Simulado	56
Tabela 5 – Informações da aplicação do Mosaico de Expedição	69
Quadro 1 – Sumário dos dados Grupo Focado.....	65

SUMÁRIO

Capítulo 1 – Introdução	10
1.1 – Considerações Iniciais	10
1.2 – Tema e Objetivos	11
1.3 – Justificativa do Tema	12
1.4 – Estrutura do trabalho	14
Capítulo 2 – Referencial Teórico	16
2.1 – Gerenciamento Logístico	16
2.2 – Confiabilidade em Manutenção	20
2.3 – Estratégias de Manutenção	25
2.4 – Modelagem Computacional de Sistemas Para Manutenção	30
Capítulo 3 – Procedimentos Metodológicos e Caracterização do Sistema em Estudo	34
3.1 – Método do Trabalho	34
3.1.1 – Proposição de um modelo para estudo de janelas de oportunidade para sistemas de expedição para produtos de mineração	35
3.1.2 – Estabelecimento de uma proposta de estrutura da manutenção necessária para suportar as diretrizes de produtividade do sistema	36
3.1.3 – Aplicação do modelo em estudo junto ao sistema real de expedição na mina de Carajás	37
3.2 – Caracterização do Sistema de Expedição de Carajás	38
3.3 – Indicadores de Expedição	42
Capítulo 4 – Mosaico de Simulação da Expedição	47
4.1 – Heurística para Elaboração do Mosaico de Simulação da Expedição	47
4.2 – Lógica do Mosaico de Simulação da Expedição	49
4.3 – Testes e Validação do Mosaico de Simulação da Expedição	55
Capítulo 5 – Grupo Focado	58
5.1 – Planejamento do Grupo Focado	58
5.2 – Tópicos de Discussão do Grupo Focado	59
5.3 – Análise e Interpretação dos Resultados da Reunião	65

Capítulo 6 – Aplicação do Mosaico e Análise dos Resultados	68
6.1 – Aplicação do Mosaico da Expedição	68
6.2 – Análise dos Resultados da Expedição	70
Capítulo 7 – Conclusões	75
7.1 – Considerações Finais	75
7.2 – Proposta de Trabalhos Futuros	77
Bibliografia	79
Anexos	85
A.1 – Código Fonte Mosaico Expedição	85
A.2 – Apresentação da Reunião com Grupo Focado	91
A.3 – Atividades Executadas nas Janelas de Ociosidade	100

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Atualmente, o cenário globalizado vivido pelas empresas demanda um esforço contínuo para maximização de produtividade e redução de custos, buscando a sustentabilidade do negócio a médio e longo prazo. Neste contexto, as estratégias de manutenção dos ativos da empresa e o gerenciamento deste processo de forma integrada passou a ter um papel fundamental para o atendimento dos objetivos de desenvolvimento das organizações (ZHANG e NAKAMURA, 2005).

O gerenciamento adequado do processo de manutenção é importante para assegurar o bom desempenho das operações. Visando maior interação entre as áreas, as empresas têm posicionado seus processos de manutenção como uma função da organização, que deve gerar produtos, atender a clientes internos e atingir metas específicas de efetividade (NASCIF e DORIGO, 2010).

O estabelecimento de planejamento, rotina, controles e melhorias para a manutenção permitem alcançar eficiência em termos de disponibilidade dos ativos, com qualidade elevada e custos competitivos. Para tanto, é necessário definir uma estratégia de manutenção adequada para as necessidades específicas da empresa (MÁRQUEZ et al., 2009).

As estratégias de manutenção, antes vistas como simples intervenções baseadas no tempo de operação do equipamento, passaram a constituir um tema de estudos explorado na literatura internacional e com extenso campo de aplicações (PÉRÈS e NOYES, 2003)

Um dos principais tópicos associados à manutenção envolve o conceito de confiabilidade dos equipamentos. Este conceito, que trata da redução de falhas e maximização do tempo de operação normal dos equipamentos, passou a chamar a atenção de diversos setores da indústria devido ao seu caráter de aumento de eficiência e segurança das operações. Além das já difundidas aplicações em manutenção de aeronaves e plantas de energia nuclear, outros setores da indústria, como automotiva e projetos têm utilizado os conceitos de confiabilidade para otimização de custos de manutenção (SERGER, 1983; ZHU et al., 2010).

Em setores com equipamentos de grande porte sujeitos a desgaste intensivo, como mineração e siderurgia, os estudos de confiabilidade, mesmo que ainda não muito difundidos,

apresentaram resultados satisfatórios se aliados a uma política de gerenciamento da manutenção em oportunidades (ZHAO, 2003).

Neste trabalho, o termo manutenção em oportunidades significa a execução das tarefas de rotina de manutenção (planos de preventiva, inspeções, etc.) nos momentos em que o equipamento encontra-se parado por não haver demanda produtiva para o mesmo. Paralelamente, no momento em que houver necessidade de utilização do equipamento, as atividades de manutenção devem ser encerradas.

O setor de mineração iniciou um ciclo de reorganização de seus processos e operações, respondendo à crescente demanda pelas *commodities* nos últimos 10 anos. A extração mineral, antes puxada pela demanda da siderurgia e bens de consumo, passou a operar de forma empurrada, onde todo o volume de produção não era suficiente para atender a velocidade de crescimento e necessidade de mercados emergentes como a China (MATTHIES, 2007).

No Brasil, as empresas do setor de mineração iniciaram uma corrida para antecipar ao máximo o aproveitamento de suas reservas. No entanto, os altos custos envolvidos na abertura de novas minas, o longo ciclo de implantação dos investimentos (média de 5 anos) além da dificuldade de liberações ambientais para o setor, criaram um cenário propício para a busca pelo aumento da eficiência das operações já instaladas (GOLDSTEIN, 1999).

Neste contexto, os estudos de confiabilidade das instalações de mineração associados ao aumento de produtividade passaram a ser de grande interesse, motivando a aplicação de novas estratégias de manutenção e explorando possibilidades de redução de custos visando maior sustentabilidade para as operações.

1.2 – TEMA E OBJETIVOS

O tema deste trabalho é uma contribuição às estratégias e sistemáticas de manutenção, estudadas no âmbito dos equipamentos de expedição de produtos de mineração.

O principal objetivo é desenvolver uma sistemática para o aproveitamento das oportunidades de manutenção, visando atuar em ociosidades do sistema de expedição para reduzir o impacto das paradas de manutenção e conseqüente aumento do volume de minério expedido.

Para tal, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Desenvolver um modelo para prever as janelas de oportunidade no sistema de expedição de minério de ferro, de forma a capturá-las para manutenção;
- Apoiado no modelo desenvolvido, estabelecer novas diretrizes, rotinas e procedimentos de manutenção, que otimizem o aproveitamento das oportunidades e, conseqüentemente, melhorem o desempenho do sistema em estudo;
- Avaliar a estrutura de manutenção necessária para suportar as diretrizes e procedimentos de manutenção estabelecidas.

1.3 – JUSTIFICATIVA DO TEMA

A principal motivação para realização deste trabalho é a elaboração de uma abordagem que possibilite incorporar os conceitos de confiabilidade e auxilie no gerenciamento do sistema de manutenção dos equipamentos de expedição de produtos de mineração, atendendo às necessidades do negócio da mina de Carajás (Pará, Brasil).

As constantes mudanças de cenário impostas pelo mercado global demandam grande flexibilidade dos gestores para ajustes no direcionamento das estratégias da organização, sendo que a agilidade na tomada de decisão é crucial para o bom desempenho do negócio. A necessidade crescente por produtividade e entrega de produção dentro do prazo muitas vezes exige que a decisão de intervenção de manutenção seja tomada de forma integrada com a operação.

O processo de expedição de produtos de mineração em estudo é integrado com o sistema produtivo e logístico da empresa. O minério, carregado em vagões na mina de Carajás, é transportado por 892 km até São Luis, onde ocorre a descarga no pátio de produtos, e posterior embarque em navios para exportação. O ciclo dos trens entre Carajás e São Luis é um sistema complexo. Eventos de expedição, viagem e descarga interagem mutuamente, gerando momentos de alta utilização e outros de ociosidade, onde nenhuma carga está sendo expedida ou descarregada. A Figura 1 mostra o sistema logístico de Carajás.

Os sistemas de expedição de outros processos produtivos de mineração para outros tipos de minério beneficiados pela empresa, como por exemplo carvão (corredor Nacala em Moçambique), cobre (mina do Sossego e Salobo, no Pará), além do próprio ferro de outras unidades produtivas no Brasil (Estrada de Ferro Vitória-Minas) também constituem sistemas complexos e apresentam situações similares às apresentadas para o sistema logístico de Carajás. Assim, a aplicação dos conceitos de manutenção de oportunidade em ociosidades associados

à este trabalho também é possível para tais processos produtivos, o que amplia a importância de estudo do tema para produtividade da empresa.

Os equipamentos destes subsistemas (expedição, ferrovia e descarga) necessitam de níveis adequados de confiabilidade para evitar quebras durante os períodos de operação e consequente redução da produtividade do sistema. Os equipamentos de ferrovia (vagões e locomotivas) podem ser parados de forma escalonada, sem grandes prejuízos para o processo produtivo. No entanto, paradas para manutenção nos subsistemas de expedição e descarga, particularmente em momentos de alta utilização, geram perdas de volume de minério transportado. Por outro lado, a não execução das pautas de manutenção preventiva reduz a confiabilidade do sistema. Claramente, há um *trade-off* que deve ser analisado pelos gestores do negócio:

Redução do tempo de parada para manutenção × Aumento da confiabilidade do sistema

Uma forma de equacionar este *trade-off* é utilizar as janelas de ociosidade como oportunidades para realização das pautas de manutenção preventiva. O que em um primeiro olhar parece uma escolha simples, se mostra complexa na prática, uma vez que as variáveis envolvidas na solução interagem mutuamente, e o prazo para a tomada de decisão é curto.

Assim elaborar uma abordagem que proporcione aos gestores a possibilidade de simular cenários e avaliar os impactos financeiros reduz o risco de que as decisões gerem resultados negativos e prejuízos para o negócio. A experiência dos gestores não pode ser menosprezada em detrimento a simulações computacionais, porém criar um direcionador baseado em histórico para complementar a análise realizada pelos gestores é, sem dúvida, de grande valor.

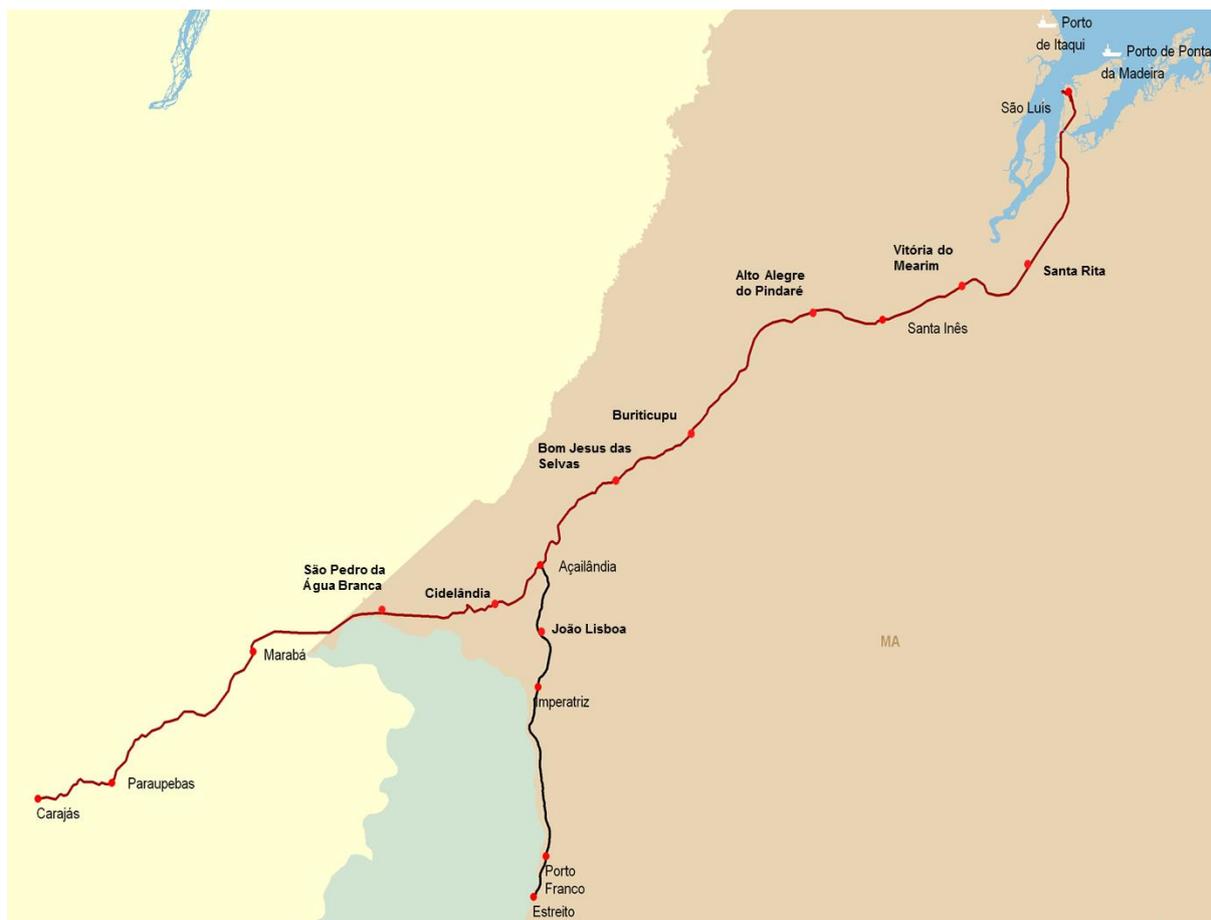


Figura 1 – Sistema Ferroviário de Carajás

1.4 – ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em sete capítulos. Na primeira parte, é apresentada uma introdução ao tema de confiabilidade em equipamentos industriais e aplicações dos modelos de simulação.

No segundo e terceiro capítulos, o referencial teórico traz as principais considerações sobre confiabilidade, manutenção de equipamentos de grande porte e métodos de modelagem. Nesta etapa, será realizada uma revisão bibliográfica do conceito de confiabilidade e modelos de gerenciamento de manutenção em plantas com equipamentos de grande porte. A partir de artigos e periódicos especializados na área de confiabilidade, serão estudadas aplicações deste conceito, principalmente em sistemas de expedição de produtos de mineração. Será apresentado um levantamento da literatura sobre estratégias de manutenção de equipamentos, indicadores de manutenção, além de breve estudo sobre sistemas de transporte ferroviário em mineradoras. Para o estudo das técnicas de modelagem, serão apresentados os principais métodos, focando as abordagens que poderão ser utilizadas a partir dos dados disponíveis.

A seguir, a abordagem proposta é desenvolvida e apresentada, explorando as técnicas utilizadas para obtenção dos dados, de forma qualitativa e quantitativa, além da descrição do modelo de simulação adotado. Realizado o levantamento dos dados e indicadores, será realizada a modelagem do sistema de expedição. O modelo proposto consiste de um mosaico de previsão do sistema de expedição, onde cada linha de carregamento será apresentada de forma gráfica. O mosaico de previsão é uma ferramenta para auxílio na tomada de decisão e o layout final de expedição será apresentado de forma detalhada no Capítulo 4.

A partir da ferramenta de análise de aproveitamento das janelas de oportunidade, será apresentado o resultado de captura das oportunidades e impacto das mesmas no sistema. A proposta de continuidade do trabalho é adquirir novos dados a partir de elaboração de grupo focado e deliberação sobre a estrutura necessária para suportar a identificação mais precisa das janelas de oportunidade. A principal temática será o levantamento das principais razões pelas quais nem todas as oportunidades de manutenção são capturadas. Para tal, a experiência das pessoas envolvidas no processo de expedição é fundamental. O roteiro de grupos focados, bem como seus principais resultados e decisões estão apresentados no Capítulo 5.

Na sequência, a abordagem proposta (constituída do mosaico de previsão e novas diretrizes e procedimentos para aproveitamento das oportunidades) é aplicada a um caso real para estudo. Os resultados do trabalho são apresentados, bem como a análise dos cenários e a ferramenta de auxílio para tomada de decisão. Durante um período de tempo estabelecido pelos grupos focados, o mosaico de previsão da expedição é utilizado como ferramenta de decisão para captura de janelas de oportunidade e manutenções são realizadas neste intervalo. Esta aplicação visa à observação da eficácia da abordagem proposta nos resultados de manutenção do sistema, com o objetivo de avaliar a proposta e incluir eventuais aprimoramentos. As análises e resultados desta aplicação são mostrados no Capítulo 6.

Finalmente, o Capítulo 7 traz as principais conclusões do trabalho, bem como recomendações para trabalhos futuros. O trabalho será analisado para a aplicação em um sistema particular de expedição de produtos de mineração. A partir dos resultados obtidos nesta aplicação, serão discutidas as restrições e particularidades de validade do modelo proposto. Discute-se também a possibilidade de replicação, levando em consideração características como demanda e porte dos sistemas envolvidos. Deverão ser avaliados ainda os limites em que os *trade-off* de custo se tornem interessantes e premissas para gestão de sistemas onde o modelo apresentará bons resultados.

CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO

Tendo em vista o tema e objetivos deste trabalho, esta seção apresenta uma revisão da literatura cobrindo os tópicos referentes a: (i) gerenciamento logístico, (ii) confiabilidade em manutenção, (iii) estratégias de manutenção e (iv) modelagem computacional de sistemas para manutenção.

2.1 – GERENCIAMENTO LOGÍSTICO

O gerenciamento da cadeia logística constitui um desafio de crescimento para as empresas desde o início dos anos 50. As pesquisas neste campo, desenvolvidas principalmente nas áreas de planejamento de produção, controle operacional e estudos empíricos, buscam soluções que possam otimizar os sistemas produtivos e posicionar os sistemas logísticos como parte integrante da estratégia de produção (GUDEHUS e KOTZAB, 2009).

Historicamente, este gerenciamento evoluiu de forma diferente entre os diversos setores industriais devido a características particulares de cada operação. O setor automobilístico, por exemplo, devido ao custo envolvido com manutenção de estoques e à longa distância da matéria-prima, se destacou como um dos principais difusores de diversas inovações gerenciais para o assunto (WANKE, 2003).

Com a consolidação da internet e outras tecnologias de informação, a partir do início do século XXI, surgiu a oportunidade de redesenho de diversos fluxos de produtos devido à maior confiabilidade das informações geradas. Algumas empresas mudaram completamente seu modo operacional em função desta disponibilidade de informação, e mesmo com poucos diferenciais de qualidade, conseguiram dominar alguns seguimentos de mercado, com custos mais competitivos e customização dos produtos para os clientes. Um exemplo desta modificação total de fluxos é uma empresa do setor de computação, que a partir de alianças estratégicas com seus fornecedores e utilizando o modelo de vendas pela internet conseguiu parcela significativa do mercado de computadores e redução de seu preço final apoiada em reduções de custo com sua cadeia logística (REBOUÇAS, 2000).

O mapeamento dos *trade-off* de custo é um dos principais subsídios para a tomada de decisão logística. Análises que permitam mensurar os custos relevantes para o fluxo de produtos são fundamentais para o estabelecimento de decisões coerentes ao longo do tempo.

Nos projetos de decisão logística, dois conceitos devem ser destacados para elaboração das decisões, o custo total e o custo de oportunidade (AMSTEL, 1985).

Ainda conforme Amstel (1985), o custo total avalia todo o custo do produto, e permite avaliação de incrementos nos custos logísticos, a fim de buscar custos associados a oportunidades não capturadas quando os recursos são empenhados em outras etapas do processo na organização. Esta avaliação permite uma visibilidade do custo logístico dentro de toda a cadeia produtiva, mantendo a perspectiva de visão global das operações. O custo de oportunidade é aquele associado ao não atendimento de determinada demanda de mercado principalmente por investimentos em instalações equipamentos, ou mesmo otimização operacional.

A logística constitui um serviço onde os recursos são orientados para consecução de determinada organização do fluxo de produtos entre dois pontos (cliente e fornecedor). Haywood-Farmer (1988) apresenta um modelo estruturado como um triângulo para facilitar a compreensão das principais questões relativas ao gerenciamento de serviços. Os vértices do triângulo caracterizam as três principais naturezas dos serviços: Recursos (ativos, procedimentos e rotinas), Características Pessoais (motivação e identidade pessoal) e Habilidades Técnicas (conhecimento, diagnóstico e assessoria). Os serviços logísticos apresentam as três naturezas. É intensivo em ativos e recursos, requer muitas habilidades técnicas para tomada de decisão e a empatia entre clientes e fornecedores é fundamental para que se possam estabelecer boas soluções de longo prazo e sustentação dos negócios.

Ao utilizar serviços logísticos como uma ferramenta competitiva, as empresas podem até mesmo criar barreiras para entrada de novos competidores. Possuir uma carteira de serviços ampliada e bem parametrizada cria custos que podem afastar novos entrantes no negócio, devido ao aumento da complexidade e despesas de entrada (FLEURY, 2002).

No setor de produtos de mineração, a logística também tem um papel fundamental, dado que usualmente cerca da metade dos custos do produto final entregue no cliente estão associados à parcela transporte. A característica de transporte de produtos de mineração envolve principalmente altos volumes, dado o baixo valor agregado como matéria prima. O transporte é o principal componente logístico para estes produtos, necessitando de gestão diferenciada sobre os demais componentes (FIGUEIREDO e PEREIRA, 2003).

Conforme Fleury (2002), gerir o transporte significa tomar decisões sobre um amplo conjunto de aspectos. Estas decisões podem ser classificadas como estratégicas ou operacionais. As decisões estratégicas se caracterizam pelos impactos de longo prazo e são referentes principalmente a aspectos estruturais. As decisões operacionais são geralmente de curto e médio prazo e se referem a tarefas de rotina.

Esse mesmo autor indica que as decisões estratégicas são basicamente quatro:

- Escolha de modais;
- Decisão sobre propriedade da frota;
- Negociação com transportador;
- Política de consolidação da carga;

Algumas das principais decisões operacionais são resumidas a seguir:

- Planejamento de embarque;
- Programação da frota;
- Identificação de gargalos;
- Gerenciamento de avarias;

As decisões estratégicas para o negócio geralmente são estabelecidas pelo planejamento estratégico da empresa, que não é o principal foco deste trabalho. Para o transporte de produtos de mineração, a ser estudado neste trabalho, o modal selecionado foi o ferroviário, dado seu melhor custo/preço e as longas distâncias em que o produto precisa ser movimentado. Segue na Tabela 1, a comparação dos custos relativos entre diferentes modais (Adaptado FLEURY, 2002).

Tabela 1 – Comparação entre custos de modais no Brasil (base em ton x km)

Modal	Custo relativo
Aéreo	50
Rodoviário	2,22
Ferrovário	1,78
Aquaviário	1

No Brasil, existem razões históricas, como a falta de padronização e integração da malha ferroviária, que tornam a tarefa de reduzir custos de transporte em mineração com a utilização

de logística reversa, ou mesmo de prestação de serviços de transporte ainda mais desafiadoras (FIGUEIREDO e PEREIRA, 2003).

As decisões operacionais são estabelecidas, rotineiramente, de acordo com os cenários e necessidades do negócio. O planejamento do embarque trata principalmente da alocação de recursos e planejamento de demandas produção e manutenção. Estas decisões devem ser visitadas periodicamente para verificação da consistência das entregas e/ou carregamentos (MARQUES, 2002).

A consistência, que representa a capacidade de cumprir os tempos previstos de carga, é uma das principais demandas do transportador, porém deve ser dimensionado com a quantidade de recursos disponibilizado pelo carregador, de acordo com a programação de carga, produção e manutenção (SALVELSBERGH e GOETSCHALCKX, 1995).

A programação da frota avalia a capacidade de execução das solicitações de produção e serviços para os equipamentos. Esta etapa é prioritária para o transportador, dado que, para maximização do volume transportado, deve permitir que o ciclo de carregamento seja compatível com a disponibilidade de sua frota. A diferença entre os regimes operacionais do transportador e carregador pode gerar perdas de transporte caso esta programação não esteja ajustada (MARQUES, 2002).

A identificação de gargalos e busca de aumento de produtividade, seja pelo ajuste de programação operacional, ou sincronismo de atividades, busca o limite de capacidade dos processos. Os gargalos potenciais são aqueles que possuem alta taxa de utilização em momentos de pico. Para sistemas bem ajustados, este valor pode chegar a 100%. Sempre que possível, os gargalos potenciais devem ser ajustados para não se tornarem limitadores de produtividade e os gargalos críticos devem ser eliminados (GUDEHUS e KOTZAB, 2009).

Finalmente, o planejamento da manutenção preventiva e corretiva (gerenciamento de avarias) é outro aspecto que deve fazer parte das decisões operacionais. Os parâmetros de manutenção e confiabilidade devem ser bem conhecidos no processo para fundamentar estas decisões (FOGLIATTO e RIBEIRO, 2009). Este assunto é discutido em maior profundidade na próxima seção.

2.2 – CONFIABILIDADE EM MANUTENÇÃO

Os princípios básicos de manutenção de ativos estabelecem as premissas de atuação para correção ou prevenção da ocorrência de falhas nos equipamentos ou sistemas operacionais das unidades produtivas. Apesar de existirem diversas estratégias de manutenção que podem ser aplicadas de acordo com a necessidade de cada sistema, o objetivo delas é o mesmo: manter o sistema produtivo em operação o maior tempo possível e restabelecer seu funcionamento no menor prazo (PÉRÈS e NOYES, 2003).

Geralmente, a manutenção pode ser classificada em duas grandes divisões (ZI e LI, 2008):

- **Manutenção Preventiva (MP)** – Trata-se da atuação na substituição de peças e execução de serviços nos equipamentos em intervalos de tempo pré-determinados. As tarefas a serem realizadas para manutenção são definidas anteriormente à intervenção no equipamento e por uma programação prévia. O objetivo é atuar nas causas da possível falha antes de sua ocorrência.
- **Manutenção Reativa (MR)** – Trata-se da atuação na correção de alguma falha ocorrida em um equipamento ou sistema. As tarefas de manutenção a ser realizadas são definidas após a falha do equipamento. O objetivo é restabelecer a condição operacional do equipamento ou do sistema o mais rápido possível, dada sua natureza não programada.

Os conceitos de manutenção preventiva (MP) são amplamente difundidos como estratégia de manutenção na indústria. Os métodos convencionais para determinar a frequência de intervenção e atividades programadas, geralmente são baseados na experiência dos mantenedores e em manuais dos fabricantes dos equipamentos. Esta metodologia pode subestimar ou superestimar a necessidade de intervenção e acarreta consigo custos, muitas vezes desnecessários para a empresa (ZHANG e NAKAMURA, 2005).

A busca por uma melhor economicidade dos sistemas através da aplicação de estratégias de manutenção permite a inclusão de duas outras divisões para a manutenção (PARIAZAR, 2008):

- **Manutenção condicional (MC)** – Trata-se da decisão de substituição de componentes ou correção de defeitos (reaperto, lubrificação e limpeza) em equipamentos monitorados com sensores que adquirem dados sobre sua condição de operação. Os dados monitorados proveem informação para tomada de decisão de técnicos e

engenheiros especializados sobre a tendência de evolução do defeito, para atuação antes da falha, porém no momento mais adequado. Também conhecida pelo termo manutenção Preditiva.

- Manutenção oportuna (MO) – Trata-se da substituição de peças ou componentes em equipamentos que ainda não falharam nos momentos em que a planta se encontra fora de operação, seja por quebra ou ociosidade. O objetivo é bloquear possíveis falhas em equipamentos que já apresentem algum tipo de defeito, aumentando a confiabilidade da planta. Como os serviços não são definidos previamente é necessário grande coordenação entre as áreas de produção, programação, estoques e execução de manutenção, para o sucesso deste tipo de intervenção.

O advento dos sistemas computacionais possibilitou o surgimento de diversos programas de simulação para otimização da frequência de intervenção baseado em modelos teóricos com dados reais visando à maximização da eficiência dos ativos com o menor custo possível. Esses modelos teóricos utilizam distribuições de probabilidade para simular o comportamento dos sistemas, equipamentos ou subconjuntos de equipamentos a fim de inferir sobre o possível comportamento do sistema frente a diversas situações a quais podem ser expostos (SARANGA, 2002).

Os dados reais do comportamento dos equipamentos ou sistemas geralmente utilizados para modelagem são tempo de parada, tempo médio de reparo (MTTR – *Mean Time To Repair*), tempo médio entre falhas (MTBF – *Mean Time Between fails*) entre outros. A partir deles, são realizadas regressões para ajustes dos parâmetros em distribuições de probabilidade conhecidas. As principais distribuições de probabilidade utilizadas para ajustes dos dados dos equipamentos e sistemas são a exponencial, Weibull e Weibull mista. Outras distribuições, como Gama, normal, lognormal, Rayleigh e Gaussiana inversa também são reportadas na literatura (SHANKAR e SAHANI, 2003). A decisão pela distribuição a ser utilizada depende de diversas considerações, como tamanho da amostra, período de aquisição dos dados e demanda computacional do método (ZI e LI, 2008).

Alguns métodos de estimativa dos parâmetros das distribuições a partir dos dados são a MLE (*Maximum Likelihood Estimation*) e a LSE (*Least Square Estimation*). A decisão pelo método a ser utilizado para regressão dos dados depende da precisão necessária e aplicação de interesse. Por exemplo, o MLE é um método utilizado para uma abordagem mais teórica, enquanto o LSE é um método computacionalmente mais simples (ZI e LI, 2008).

As situações de interesse das simulações geralmente são obtidas modificando determinadas condições para criar cenários e auxiliar no gerenciamento do processo de manutenção. Alguns indicadores como risco de falha, disponibilidade, confiabilidade, custos, entre outros, podem ser estimados através destas simulações, embasando assim a criação de uma frequência de manutenção mais adequada com a demanda ou necessidade do negócio e criando uma estrutura mais adequada ao processo (NIU et al., 2010).

Os principais indicadores observados para determinação da frequência ótima de manutenção são a confiabilidade e o custo de manutenção associado. O objetivo das simulações, de maneira geral, é maximizar a confiabilidade, minimizar custos de manutenção, ou estabelecer o ponto ótimo entre essas duas variáveis. Os modelos iniciais utilizados nas primeiras simulações de confiabilidade apresentavam campo de aplicação reduzido, principalmente devido a restrições computacionais de simulação. Esta metodologia geralmente só era utilizada para aplicações onde havia risco de segurança ou necessidade de operação constante relacionado a restrições econômicas ou ambientais, como, por exemplo, nos casos envolvendo a manutenção de aeronaves e plantas de energia nuclear. Os modelos geralmente eram simplificados, e as considerações envolviam várias simplificações, para possibilitar a simulação do sistema como um todo (LAPA et al., 2006).

A política de manutenção preventiva, por exemplo, considerava que após cada intervenção o sistema retornava a condições de projeto (*AGAN – As Good As New – Tão Bom Quanto Novo*) e alguns algoritmos mais complexos aceitavam o estado de manutenção não programada, após intervenção retornava ao estado anterior à falha (*ABAO – As Bad As Old – Tão Ruim Quanto Antes*) (WU e ZUO, 2010).

Atualmente, com menores restrições computacionais e algoritmos mais eficientes de busca numérica, diversos outros setores tem sido atraídos aos benefícios da aplicação de simulação de cenários para tomada de decisão e gerenciamento de seus processos de manutenção (CAVALCANTE e COSTA, 2006).

A possibilidade de simular cenários complexos refina a estratégia de manutenção a ser adotada para um determinado sistema ou equipamento. A seguir, é apresentado um resumo de alguns dos principais efeitos que podem ser avaliados, e uma breve explicação sobre seu conceito:

- Manutenção imperfeita – Os primeiros simuladores para estimativa de confiabilidade de sistema levavam em consideração que, após a intervenção de manutenção, o sistema retornava a sua condição de projeto (AGAN). No entanto, em diversas situações esta consideração está distante da realidade. Assim, uma das primeiras complexidades incluídas nas simulações foi a manutenção imperfeita. A manutenção imperfeita considera que após alguma intervenção, o sistema pode não ser restaurado a suas condições de projetos, mas trazido a uma situação intermediária de restauração, que pode ser classificada como Manutenção Mínima (*mm – minimal maintenance*) onde o sistema retorna a sua situação anterior à falha, ou Manutenção Máxima (*Mm – major maintenance*) onde o sistema é restaurado a sua situação de projeto. Esta complexidade permite a análise de situações mais próximas aos dados obtidos em campo, melhorando o modelo de simulação e conseqüentemente a tomada de decisão para as ações dos gestores de manutenção (ZI e LI, 2008).
- Degradação dos componentes – Outra complexidade que auxilia as análises dos dados de campo é a consideração de que os componentes se degradam ao longo do tempo. Este modelo considera que caso algum componente (ou mesmo todo o equipamento) não seja substituído após a intervenção de manutenção, o período em que ele atingirá um determinado patamar de confiabilidade será cada vez menor. Este modelo aceita que determinados sistemas ou equipamentos necessitam da redução dos períodos entre manutenção preventiva (MP) para sustentação de seus níveis de confiabilidade (ZHAO, 2003).
- Um modelo encontrado na literatura que considera o efeito de degradação dos componentes ao longo do tempo é o PAR (*proportional age reduction*). Neste modelo, a manutenção é considerada como uma forma de retornar o componente ou equipamento a uma condição de degradação inferior, correspondente a uma situação de menor taxa de falhas, próximo da condição inicial de projeto. Esta outra visão dos parâmetros de manutenção amplia o campo de aplicações dos modelos de simulação (MARTORELL et al., 2006).
- Custo do ciclo de vida dos equipamentos – Um conceito utilizado na indústria e explorado no campo de estudos de confiabilidade é o do custo do ciclo de vida dos equipamentos. A decisão pelo momento de substituição de determinados equipamentos ou sistemas é importante para as empresas dado os altos valores geralmente envolvidos nestas transações de investimento no negócio. Assim, é

importante a avaliação do cenário em que esta substituição ocorrerá para uma decisão mais rentável possível.

Os modelos de confiabilidade auxiliam nesta tomada de decisão. As simulações de custo de manutenção \times confiabilidade de determinado equipamento podem indicar quando é mais interessante economicamente substituí-lo ou prolongar sua vida útil. Estas simulações levam em consideração as complexidades descritas anteriormente (manutenção imperfeita e desgaste de componentes) de forma conjunta. Assim o impacto financeiro de investimento é minimizado, melhorando o desempenho do negócio de forma global (SERGER, 1983).

- **Manutenção seletiva** – Nos sistemas produtivos reais, nem todos os equipamentos, ou subconjuntos tem a mesma importância para o resultado final de produção, isto é, não há necessidade de adoção da mesma estratégia de manutenção para todos os equipamentos do sistema produtivo. A possibilidade de simular diferentes estratégias de manutenção para equipamentos em um mesmo sistema produtivo permite a otimização dos custos de manutenção e ainda assim obter o melhor resultado produtivo. Melhora ainda, o gerenciamento do risco de determinada estratégia e gestão das ações de manutenção de acordo com a taxa de falhas esperada (ZHU et al., 2010). A possibilidade de simular um sistema com tamanha complexidade traz uma vantagem de avaliação de diversos cenários com uma confiabilidade razoável, e perspectivas de desembolso conforme estratégia adotada. A complexidade de manutenção seletiva atrai o interesse de diversos setores, pois aliada à experiência de campo dos gestores de manutenção, permite o embasamento com dados reais, e de forma mais integrada, da necessidade do negócio (LIU e HUANG, 2010).

Outro conceito relacionado à confiabilidade é o MFOP (*Maintenance Free Operation Period*), que é definido pelo período máximo que o equipamento pode operar sem intervenções de manutenção. Este período é definido pelo intervalo em que o equipamento opera sem falhas críticas que impeçam seu funcionamento. Este conceito está associado à probabilidade de determinados intervalos sem a ocorrência de um conjunto de falhas definidas previamente como críticas para o funcionamento do equipamento. Sua aplicação é interessante em processos onde a parada dos equipamentos em momentos não planejados pode gerar prejuízos para o negócio sem maiores consequências para a sustentabilidade das operações (TODINOV, 2003).

O conceito de MFOP não é novo, na verdade é em sua essência o período de garantia de funcionalidade do equipamento. A extensão do conceito para toda vida útil do equipamento é que torna a aplicação interessante para confiabilidade. Para atingir determinado nível de confiabilidade é necessário o rastreamento da vida útil dos componentes principais do equipamento, bem como um aumento a substituição completa de módulos de componentes. Nesse sentido, Kumar et al. (1999) ressaltam alguns pontos importantes:

- Durante o período válido para o cálculo do MFOP o equipamento não deve ser restrito de forma alguma por falhas ou limitações nos componentes, com o mínimo de manutenção;
- A probabilidade de sobrevivência de determinado equipamento ou componente durante os períodos determinados de MFOP é definido como MFOPS (*Maintenance Free Operation Period Survivability*). Em outras palavras, esta é a probabilidade do equipamento operar por um período t_{mf} determinado sem necessidade de manutenções não programadas.

Ainda conforme Kumar et al. (1999), a aplicação do MFOP no aumento da confiabilidade de equipamentos é conhecida principalmente na indústria aeroespacial. A principal restrição para utilização do MFOP como medida de confiabilidade é para os casos em que a maioria das falhas não está associada a fatores de desgaste pelo tempo ou utilização. Nestes casos, não há vantagem em utilizar os conceitos em detrimento ao MTBF dos conjuntos do equipamento.

A aplicação de conceitos de confiabilidade a equipamentos de mineração ainda é pouco difundida. Apesar dos conceitos serem bastante amplos e permitirem sua utilização para praticamente todos os campos, pouco foi encontrado a respeito desta abordagem para equipamentos de mineração na literatura.

2.3 – ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO

Estratégia de manutenção consiste na metodologia adotada para sistematização das tarefas de manutenção buscando melhorar a confiabilidade e regularidade de operação dos sistemas produtivos (ADEYERI et al., 2011).

A estratégia de manutenção dos equipamentos é crucial para o bom desempenho dos sistemas industriais. O principal objetivo do estabelecimento de uma estratégia é otimizar os

trade-off entre os gastos com manutenção e os riscos de operação do sistema, visando maximizar os lucros que podem ser gerados pela operação do mesmo (WANG, 2002).

No entanto, existem limitações, como recursos, orçamentos, tempos de manutenção que devem ser levados em consideração para escolha de determinada estratégia, e apesar de existirem diversos modelos para avaliação do tipo de manutenção a ser aplicada (preventiva, corretiva, preditiva) de acordo com cada realidade de operação industrial, existe um número limitado de estratégias em que estes modelos podem estar embasados. Assim, é preciso determinar quais os parâmetros se desejam otimizar antes iniciar sua implantação (LIU e HUANG, 2010).

As estratégias de manutenção podem ser classificadas em cinco tipos básicos resumidos abaixo (PINTELON, 1992):

- **Manutenção baseada em falha:** Esta estratégia estabelece que a manutenção deve ser realizada apenas em caso de ocorrência de falhas. A política aplicada é a corretiva. Esta estratégia pode ser eficiente em caso de sistemas com quebras puramente aleatórias, com pouco impacto da parada do sistema no processo e baixo custo de reparo.
- **Manutenção baseada na utilização:** Esta estratégia estabelece que os eventos de manutenção são disparados por um período determinado de operação, ou número de unidades produzidas. A manutenção baseada na utilização presume que o comportamento de falha dos equipamentos do sistema são conhecidos, e que a taxa de falhas aumenta com o tempo. A estratégia de manutenção baseada na utilização utiliza a política preventiva e geralmente é economicamente mais atrativa que a política corretiva (MANN, 1995).
- **Manutenção baseada na condição:** Esta estratégia estabelece que a manutenção deve ser realizada quando os valores de determinados parâmetros (temperatura, vibração, pressão, espessura, etc.) do sistema alcançarem limites pré-estabelecidos. Esta estratégia de manutenção assume a presença de rotas de inspeção na planta e apresenta resultados economicamente mais interessantes que a manutenção baseada em falha e na utilização (KELLY, 1984).
- **Manutenção baseada em oportunidade:** Esta estratégia assume que a manutenção dos equipamentos do sistema pode ser realizada quando há paradas não programadas (por eventos de quebra ou ociosidade), visando a aplicar a política

de manutenção preventiva em todos os equipamentos afetados pela parada. A escolha dos componentes a serem mantidos depende da distribuição residual de suas vidas úteis, que por sua vez tem forte influência das condições operacionais (VANNESTE, 1991).

- Manutenção projetada: Esta estratégia estabelece que o projeto do sistema é concebido ou modificado para maximizar sua confiabilidade e simplicidade nas operações de manutenção. A aplicação desta estratégia envolve a dispêndio de uma grande quantidade de recursos e é mais cara que as demais. Os sistemas projetados para aplicação desta estratégia devem ser analisados com bastante rigor para que não ocorra uma situação de manutenção por “excesso de zelo”. (PINTELON, 1992).

Os principais indicadores de interesse para otimização na aplicação de uma estratégia de manutenção são as taxas de falha, a disponibilidade, a confiabilidade do equipamento, o custo de manutenção, o custo total, a taxa de degradação e a taxa de utilização do equipamento (WANG, 2002).

Para redução da taxa de falhas durante os períodos de utilização dos equipamentos, em cenários onde o tempo de manutenção é uma restrição, a literatura reporta a utilização da estratégia de manutenção seletiva com resultados satisfatórios (ZHU et al., 2010; LIU e HUANG, 2010).

A estratégia de manutenção seletiva é o processo de escolha das atividades e subconjuntos a serem mantidos de forma a maximizar a confiabilidade do sistema durante o período de utilização. Esta estratégia é uma abordagem mista da manutenção baseada em utilização e manutenção baseada em oportunidade. O principal objetivo desta estratégia é minimizar as perdas de produção causadas por falhas nos equipamentos e maximizar os tempos de operação. A manutenção seletiva é um campo de pesquisas coerente com a indústria moderna, que busca executar suas atividades de manutenção de forma mais inteligente e eficiente (CASSADY et al., 2001).

Rice et al. (1998) iniciaram os estudos analisando problemas de confiabilidade de equipamentos do ponto de vista da manutenção seletiva. Em seu trabalho, foi elaborado um modelo computacional de decisão para o caso especial de um sistema série paralelo, considerando M subsistemas em série com M_i componentes idênticos em paralelo. Foi

considerando uma taxa de falha constante para os componentes (distribuição exponencial) (RICE, 1998).

Alguns anos mais tarde, Cassady et al. (2001) incrementaram o modelo de Rice, considerando a distribuição Weibull para a taxa de falha dos componentes, e análise de outros modos de manutenção, como reparo e substituição dos componentes. O modelo determinístico tem por objetivo auxiliar o gerenciamento de manutenção, mas exige que exista à disposição os dados de custo e tempos de manutenção para estimativa dos parâmetros de forma satisfatória (CASSADY et al., 2001).

Ambos os modelos obtiveram resultados satisfatórios em aplicações industriais militares e espaciais, onde a máxima confiabilidade do sistema é o objetivo principal. No entanto, em sistemas produtivos civis, o fator econômico não pode ser deixado de lado. Cheng et al. (1999) incluíram em seu modelo a avaliação do custo de manutenção como parâmetro para decisão para a manutenção seletiva. De acordo com esses autores, no entanto, o modelo pode se tornar ineficiente quando o fator custo de manutenção se torna mais complexo que a confiabilidade exigida pelo equipamento.

Aplicações de modelos matemáticos que utilizam a manutenção seletiva em casos de sistemas industriais civis são mais comuns nas áreas de reposição de equipamentos, inspeção e manutenção de sistemas elétricos de potência. As estratégias para *overhaul* de equipamentos são bastante comuns, dado que nestes casos há uma decisão econômica crítica envolvendo a questão referente a substituição total do equipamento. Nos sistemas elétricos de potência, modelos que utilizam métodos de pesquisa operacional para decisão do tipo de manutenção a serem realizadas em planejamento e programação das subestações também são difundidos (DEKKER, 1996).

Outro campo que se apresenta promissor para a aplicação dos princípios de manutenção seletiva é o de reformas de ferrovias e rodovias. Neste caso, o problema é decidir sobre a alocação de recursos para diversos projetos dado que há uma restrição no valor de orçamento aprovado. Worm e Van Harten (1996) apresentaram um modelo para auxílio na decisão de manutenção de estradas para o governo holandês. Um dos motivos reportados para o sucesso do modelo neste campo de aplicações foi a quantidade de informações disponíveis de forma confiável e padronizada (WORM e VAN HARTEN, 1996).

Os principais problemas reportados para a aplicação dos modelos de manutenção seletiva nos estudos de caso são a aquisição e tratamento dos dados. Como os modelos computacionais são geralmente desenvolvidos por acadêmicos com interesse em aplicações práticas, os modelos pressupõem entrada de vários dados para poder proceder a otimização (DEKKER, 1996).

Outra estratégia que tem avanços recentes reportados em artigos é a manutenção baseada na postergação da intervenção. O conceito de postergação da manutenção divide o processo de falha dos equipamentos ou sistemas em dois estágios: de novo até o ponto de identificação do defeito, e deste ponto até a falha. O primeiro estágio é chamado de operacional e o segundo é estágio de postergação da falha (WANG, 2012).

Ainda segundo Wang (WANG, 2012), as distribuições de probabilidade dos dois estágios podem ser quantificadas, e a relação entre o número de falhas e os intervalos de manutenção pode ser estabelecida visando otimizar os intervalos de inspeção e a redução dos tempos de parada do sistema.

Diversos modelos foram desenvolvidos para a manutenção baseada em postergação, como Thomas et al. (1991), Christier et al. (1995), Wang (2002), Lu et al. (2005), que aplicados sob condições específicas em estudos de caso, auxiliaram a melhorar a economicidade de determinadas operações de manutenção em plantas industriais (JONES et al., 2009).

Christier e Whitelaw (1983) foram os primeiros a relatar o potencial dos modelos de postergação, principalmente avaliando situações de desgaste gradual presentes na indústria de manufatura. O processo de desgaste gradual típico pode ser dividido nos dois estágios de falha propostos para a estratégia.

Alguns anos mais tarde, Christier et al.(1995) conduziram um estudo de caso onde foi possível a aplicação da manutenção baseada em postergação para levantar dados de manutenção de um complexo industrial, estimando parâmetros para os modelos, assumindo efeitos de inspeção imperfeita, além de utilizar métodos quantitativos e qualitativos para modelagem. Houve uma redução nos tempos de parada do complexo, após a aplicação da metodologia, associada à inspeção sistemática baseada em rotas preventivas (CHRISTIER et al., 1998).

Lu et al. (2005) aplicaram o modelo proposto por Christier et al.(1995) para um estudo de caso da estratégia de manutenção baseada em postergação, com abordagem qualitativa e quantitativa para modelagem de parâmetros para uma planta de turbinas a vapor. Os resultados encontrados foram a redução dos tempos de parada, além do aumento da quantidade de defeitos mapeados pela rotina de inspeção preventivamente (LU e ZHENG, 2007).

Os estudos de caso reportados acima mostram que a modelagem dos parâmetros para a estratégia de manutenção baseada em postergação pode melhorar o desempenho em plantas de manufatura, porém é preciso migrar dos dados subjetivos para dados objetivos a fim de obter resultados consistentes. Como a estratégia de manutenção baseada em utilização ainda é dominante em plantas de manufatura, há uma expectativa de mais estudos de caso de aplicações da estratégia baseada na postergação neste tipo de planta industrial (WANG, 2012).

Conforme descrito, os estudos de confiabilidade para estratégias de manutenção têm um vasto campo de aplicações e boas perspectivas de retorno econômico. Assim, existe ampla oportunidade para abordagem destes conceitos em equipamentos de expedição de mineração.

2.4 – MODELAGEM COMPUTACIONAL DE SISTEMAS PARA MANUTENÇÃO

A complexidade dos processos, da produção, administração e manutenção, há muito ultrapassou os limites da experiência dos gestores e das ferramentas rotineiras de apoio à decisão. Para decidir minimizando os erros e extrair o máximo dos recursos no sistema produtivo, é imprescindível recorrer às ferramentas apropriadas (EINSINGER e RAKOWSKY, 2001).

A utilização de modelos é uma das ferramentas que permite compreender de forma mais ampla os problemas envolvidos nas situações complexas do cotidiano das empresas, permitindo formular estratégias, capturar oportunidades e sistematizar o processo de tomada de decisão (BERTRAND e FRANSOO, 2002).

A partir da modelagem computacional de sistemas produtivos é possível otimizar, gerar estratégias e simular cenários, o que permite uma avaliação mais abrangente das alternativas envolvidas nas decisões. Diversas maneiras de combinar as técnicas de simulação em diferentes situações de negócio permitem a obtenção de planejamentos mais eficientes e de

menor risco, considerando simultaneamente uma gama de decisões alternativas e informações comportamentais dos eventos que compõem as operações em questão (MIGUEL et al., 2010).

A modelagem computacional para sistemas de manutenção visa, além da busca de novos modos de pensar, técnicos e administrativos, incorporar às estratégias usuais de gerenciamento alguns conceitos originados na confiabilidade (SELLITTO, 2005).

Sellitto (2005) apresenta uma proposta de método objetivo para formular estratégias de manutenção em equipamentos industriais. A partir de modelagem computacional buscou focalizar apenas as ações que têm mais chance de trazer bom resultado com baixo esforço. Ações que exigem alto esforço, como corretiva em toda quebra, preditiva em toda máquina ou preventiva fora do desgaste puderam ser reconhecidas em suas simulações e abandonadas em uma gestão estratégica da manutenção (SELLITTO, 2005).

Os fundamentos da modelagem computacional de sistemas de manutenção têm seus conceitos baseados principalmente na Análise de Regressão Linear (ARL). Esta é uma das ferramentas estatísticas mais utilizadas na modelagem de dados. A ARL consiste, em sua essência, na determinação de uma equação ou modelo que descreva de maneira eficiente o efeito de um grupo de variáveis independentes sobre uma ou mais variáveis dependentes. A aplicação da técnica de modelagem por regressão linear a um grupo de dados resulta na determinação de coeficientes lineares que ponderam o efeito de variáveis independentes sobre variáveis dependentes. Modelos com uma única variável dependente são ditos univariados. Modelos com múltiplas variáveis dependentes são ditos multivariados (FOGLIATTO, 2000).

Existem disponíveis diversos *softwares* com módulos que fornecem suporte para realizar análises multivariada de dados e cálculos dos parâmetros de forma satisfatória e robusta, não existindo grandes restrições em termos de tempos computacionais. No entanto, é preciso cautela ao tomar as decisões a partir dos dados de saída dos modelos, pois cada situação de manutenção possui sua particularidade, e a interpretação dos resultados deve ser parte obrigatória para validação dos cálculos realizados (DEKKER, 1996).

O diagrama mostrado na Figura 2, extraído de Arenales et al. (2007), ilustra o processo simplificado de abordagem de solução de problemas utilizando modelagem matemática e computacional.

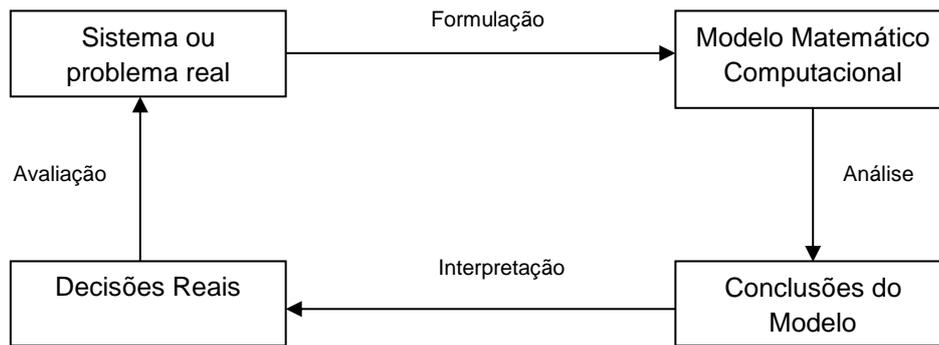


Figura 2 – Processo de Modelagem

Há quatro etapas cruciais para o processo de modelagem (ARENALES et al., 2007):

- **Formulação:** Nesta etapa são definidas as variáveis de interesse, e as relações para descrever o comportamento do sistema. As variáveis e relações causais entre elas devem ser definidas neste momento;
- **Análise:** Nesta etapa são aplicadas as técnicas matemáticas e computacionais para solução do problema;
- **Interpretação:** Nesta etapa, as soluções apresentadas pelo modelo tem significado suficiente para inferência de conclusões sobre o problema;
- **Avaliação:** Finalmente, nesta etapa, é realizada a avaliação e teste se as conclusões foram adequadas para o escopo do problema, ou em caso contrário, realização da revisão da modelagem e repetição do ciclo.

O tratamento e aquisição dos dados de entrada para formulação dos modelos é um ponto crítico. Este passo requer esforço e deve ser realizada de maneira focada no propósito do trabalho para evitar dispersões na etapa de avaliação (CAVALCANTE e COSTA, 2006).

Outro aspecto crítico para a formulação dos modelos de sistema para manutenção é a experiência dos profissionais envolvidos no assunto. Há um grande conhecimento tácito para a disciplina que dificilmente pode ser traduzido em distribuições de probabilidade, o que dificulta a elaboração de um modelo genérico e confiável. É possível modelar determinados aspectos e práticas de manutenção, no entanto, a complexidade de tais modelagens afasta o interesse para auxiliar a tomada de decisão (BEN-DAYA, 2000).

Os conceitos de otimização de manutenção utilizando pesquisa operacional têm se tornado mais comuns nas organizações, dado o cenário de eficiência exigida para a gestão (LAI e CHEN, 2005). Novamente, para modelagem de manutenção em equipamentos de

expedição de minério e mesmo equipamentos de mineração de grande porte, pouca literatura foi encontrada.

CAPÍTULO 3 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS E CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA EM ESTUDO

Neste capítulo, os procedimentos metodológicos utilizados para a realização do trabalho e as características do sistema de expedição da mina de Carajás são apresentados. O estudo configura-se como uma pesquisa-ação, pois o produto final depende da intervenção colaborativa do pesquisador com outros profissionais para atingir os objetivos propostos. O trabalho foi elaborado utilizando etapas quantitativas e qualitativas de avaliação, uma vez que está baseado tanto em dados numéricos como na opinião de especialistas. Quanto à abordagem, a pesquisa é essencialmente explicativa, pois está direcionada à construção de um modelo de previsão de janelas de oportunidade para atividades de manutenção. A intenção é utilizar as informações geradas no controle das operações para estabelecer uma estrutura apropriada de gestão da manutenção.

Na primeira parte deste capítulo, é detalhado o método deste trabalho. A seguir, o sistema de expedição em estudo é apresentado. Trata-se de uma mineradora situada no estado do Pará, na mina de Carajás, que movimenta anualmente mais de 100 milhões de toneladas de produtos de minério de ferro. Finalmente, é apresentado o levantamento e tratamento dos indicadores de desempenho deste sistema.

3.1 – MÉTODO DO TRABALHO

A organização do trabalho contemplou três etapas principais:

- i) Proposição de um modelo para previsão de janelas de oportunidade para sistemas de expedição para produtos de mineração, adequado ao caso da mina de Carajás;
- ii) Estabelecimento de uma proposta de estrutura e rotina da manutenção necessária para aproveitar a previsão mais precisa das janelas de oportunidade de intervenção;
- iii) Aplicação do modelo em estudo junto ao sistema real de expedição na mina de Carajás, visando avaliação e aprimoramento do mesmo;

3.1.1 – PROPOSIÇÃO DE UM MODELO PARA ESTUDO DE JANELAS DE OPORTUNIDADE PARA SISTEMAS DE EXPEDIÇÃO PARA PRODUTOS DE MINERAÇÃO

Esta etapa foi iniciada com o levantamento das características do sistema de expedição aplicado atualmente na empresa em estudo. Para tal, foram agendadas visitas em campo e analisadas as semelhanças e particularidades dos equipamentos usados no sistema de expedição, buscando identificar seus pontos fortes e fragilidades.

A seguir, foi contemplado o alinhamento entre as abordagens teóricas do tema e sua aplicação prática na expedição de produtos de mineração. A partir das abordagens observadas na etapa de revisão bibliográfica, foi elaborada uma lista dos principais indicadores de expedição aplicáveis a estes sistemas e realizada uma descrição de suas características no sistema de expedição de Carajás. Ainda nesta etapa, foram definidos quais indicadores serão utilizados no trabalho e a viabilidade de aquisição destas informações no sistema em estudo.

Os dados para os indicadores foram coletados através do sistema de registro de parada de equipamentos da expedição e sistema de controle de circulação ferroviária. O sistema de registros de paradas dos equipamentos registra de forma automática os momentos em que qualquer equipamento tenha parado sua operação, sendo obrigatório para o operador indicar o motivo de tal parada. Este sistema contém os dados brutos de tempo de operação. Já o sistema de controle de circulação ferroviária captura de forma automática os momentos em que os trens se posicionaram em cada localidade ao longo da ferrovia, sendo também obrigatória a indicação dos motivos de desvio (tempos acima dos previstos). Ambos os sistemas provêm dados confiáveis, dada sua natureza automática de captura.

Após a tabulação e organização dos indicadores, foi realizada a modelagem do sistema de expedição. Através da observação do processo produtivo, foi desenvolvido um modelo heurístico de tempo necessário para realizar a expedição de determinados volumes de minério e, conseqüentemente, das janelas de oportunidade de manutenção. O modelo proposto, denominado de Mosaico de Previsão da Expedição, apresenta cada linha de carregamento de forma gráfica, utilizando cores, que estabelecem uma figura similar a um mosaico. Para construção desse mosaico, as previsões de horário para chegada dos trens são obtidas a partir do sistema de controle de circulação ferroviária e tempos de manutenção específicos de cada equipamento são utilizados para bloquear as linhas, simulando a disponibilidade física do sistema. A partir do histórico de produtividade de cada equipamento, o mosaico permite alocar linhas de alimentação para linhas de carregamento, respeitando os limites de

capacidade conhecidos. A partir dessas informações, os períodos de oportunidade são apresentados de forma gráfica para auxílio na tomada de decisão. O modelo desenvolvido, antes de ser utilizado na prática, foi validado em conjunto com as áreas de interface e equipe de engenharia de manutenção da empresa.

Paralelamente, o modelo foi validado utilizando testes de sensibilidade. Durante seu desenvolvimento, o mesmo foi simplificado a partir da avaliação de parcelas com menor relevância durante os testes.

3.1.2 – ESTABELECIMENTO DE UMA PROPOSTA DE ESTRUTURA DA MANUTENÇÃO NECESSÁRIA PARA SUPORTAR AS DIRETRIZES DE PRODUTIVIDADE DO SISTEMA

Para deliberar sobre a estrutura de manutenção necessária para aproveitar as janelas de oportunidade e as decisões mais adequadas para cada situação, foi elaborado um grupo focado com a participação de especialistas do processo de expedição, manutenção, bem como as lideranças. O objetivo central era analisar a existência de janelas de oportunidade suficientes para realização de manutenções e debater as estratégias para sua utilização a partir do mosaico de previsão da expedição.

O grupo focado foi realizado em uma sessão que tinha por objetivos a análise do tamanho da janela de oportunidade necessária para realização de manutenções, os recursos necessários para atuação de forma adequada em cada janela, além da apresentação do modelo do mosaico de expedição e debate sobre sua utilização no cotidiano das operações de expedição. Nesta etapa foram convidados representantes das áreas de operação, programação, engenharia e execução de manutenção da expedição. Foi elaborado um roteiro para a condução dos grupos focados e preparado o local para realização da sessão.

Os pontos levantados pelo grupo focado como dificuldade ou facilidade para a captura das oportunidades de ociosidade foram classificados por assunto e, a partir daí, ordenados por consenso em três tipos (críticos, importantes e desejáveis). Destes pontos, os indicados como já existentes, foram assinalados para verificação de sua contribuição na solução do problema. Os pontos indicados como críticos ainda não contemplados no sistema da empresa foram assinalados para posterior análise de viabilidade de implantação.

Foi montado um quadro sumário com os pontos levantados como críticos para aplicação do modelo, sinalizando o grau de importância e os resultados obtidos e/ou esperados com a aplicação de cada ponto em sua especialidade.

Dentre os pontos considerados como viáveis, aqueles que apresentaram menores alocação de recursos necessários para a garantia da produtividade do sistema e entrega do resultado de produção foi o proposto como estratégia de manutenção para o sistema. A validação da estratégia de manutenção foi realizada em conjunto com as áreas de operação e manutenção da planta, respeitando a programação de produção e a integração com as áreas clientes do sistema.

A partir do grupo focado também foi estabelecida a lógica para as possíveis atividades de manutenção, considerando as necessidades do equipamento e a extensão da janela de ociosidade prevista. As alternativas mapeadas contemplam as atividades e métodos de manutenção possíveis de serem empregados. As alterações na rotina diária de manutenção, bem como os níveis de decisão estabelecidos e as melhores alternativas para a utilização da janela de ociosidade também são apresentados como resultados do grupo focado.

3.1.3 – APLICAÇÃO DO MODELO EM ESTUDO JUNTO AO SISTEMA REAL DE EXPEDIÇÃO NA MINA DE CARAJÁS

Nesta etapa do trabalho, foi realizada a avaliação do modelo proposto a partir de sua aplicação em um sistema real. Conforme mencionado anteriormente, o sistema estudado neste trabalho foi o sistema de expedição de trens com minério de ferro na mina de Carajás, no Pará.

Os indicadores priorizados foram medidos antecipadamente à aplicação do modelo para posterior avaliação do desempenho do sistema após a aplicação do modelo, bem como a discussão sobre o impacto de cada ação no sistema de expedição em questão.

Com o cenário delimitado, foi aplicado o modelo de previsão e captura de oportunidades de manutenção. O objetivo do modelo de previsão é estabelecer informações que indiquem detalhes sobre a ocorrência de ociosidades no sistema de carregamento, com previsão estimada de horário de início e duração de cada evento. O planejamento da manutenção, então, pode ser modificada de forma a assegurar recursos necessários para captura da janela de oportunidade indicada com disponibilização de mão-de-obra, materiais e recursos auxiliares, baseados na pauta de manutenção preventiva para cada equipamento. O modelo foi aplicado por um período definido, em sinergia com a quantidade de recursos disponibilizados para os testes. Durante e após o período de aplicação dos testes, os indicadores priorizados foram acompanhados e os impactos das ações avaliados e discutidos para cada janela de oportunidade capturada, buscando melhoria no desempenho do sistema.

Finalmente, foi realizado a valoração do *trade-off* efetivo do sistema, levando em consideração o montante de recursos utilizados versus o aumento na eficiência e rentabilidade do negócio. Espera-se neste trabalho a apresentação uma proposta de estratégia de manutenção que possa subsidiar a tomada de decisão dos gestores da manutenção de forma integrada, e reduzindo os riscos de perda produção e consequentemente aumentos de custos para o negócio.

3.2 – CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE EXPEDIÇÃO DE CARAJÁS

O sistema de expedição em minério de ferro é a parte do processo responsável pela movimentação do produto final para estoques intermediários ou cliente final. O produto final do minério de ferro é o material proveniente diretamente do solo da hematita (Fe_2O_3 – Óxido Ferroso) separado por partição granulométrica (característica física) e concentração do elemento Fe (característica química). O minério de ferro com valor comercial deve possuir concentrações de Fe acima de 62% em massa e partições de granulometria de 0,1 a 15 mm de diâmetro. Os principais produtos, separados por faixas granulométricas são o *Pellet Feed* (partículas de 0,1 a 1 mm), *Sinter Feed* (partículas de 1 a 6,3 mm) e *Lump Ore* (partículas de 6,3 a 15 mm). A Figura 3 mostra uma foto com os principais produtos.



Figura 3 – Principais produtos de minério de ferro em Carajás - Pellet Feed, Sinter Feed e Lump Ore

O estoque dos produtos a granel é formado em pilhas. Sua movimentação é realizada por equipamentos de grande porte, como pás mecânicas, escavadeiras ou equipamentos projetados exclusivamente para este fim, como correias transportadoras. Seu transporte até os pátios de expedição é realizado por caminhões basculantes ou trens de carga. No sistema em estudo para este trabalho, o minério de ferro é estocado em pátios dedicados. Sua movimentação é realizada por recuperadoras, correias transportadoras e silo de carregamento. O transporte é realizado em trens de carga com vagões abertos.

Recuperadoras são equipamentos de grande porte responsáveis por retomar pilhas de minério estocadas e transferir o produto para correias transportadoras. Correias transportadoras são equipamentos compostos por um tapete de borracha, rolos e acionamentos tendo por função transportar o produto de minério de ferro entre dois pontos fixos. Silo de carregamento é o equipamento de transferência do minério para os vagões, ele é composto por uma caixa metálica para depósito do minério e comportas de abertura para descarga deste minério nos vagões. Os vagões movimentam-se sob o silo puxados pelas locomotivas do trem. Nas Figuras 4 a 6, são apresentados os diagramas dos principais componentes destes equipamentos dedicados, bem como uma foto destes equipamentos no sistema de expedição de Carajás.

Em Carajás, o sistema de expedição é composto por quatro recuperadoras e três silos de carregamento interligados por um conjunto de doze correias transportadoras. O sistema é flexível, de forma que qualquer uma das quatro recuperadoras pode alimentar qualquer um dos silos, respeitando os limites de capacidade das correias transportadoras. Na Tabela 2, estão listados os equipamentos deste sistema e suas capacidades de projeto. A Figura 7 apresenta o diagrama do sistema de expedição de Carajás.

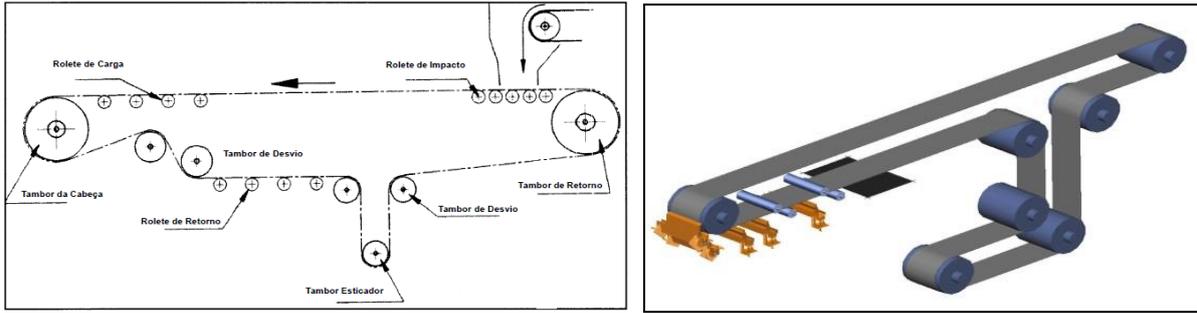


Figura 4 – Diagrama esquemático e foto de Correia Transportadora

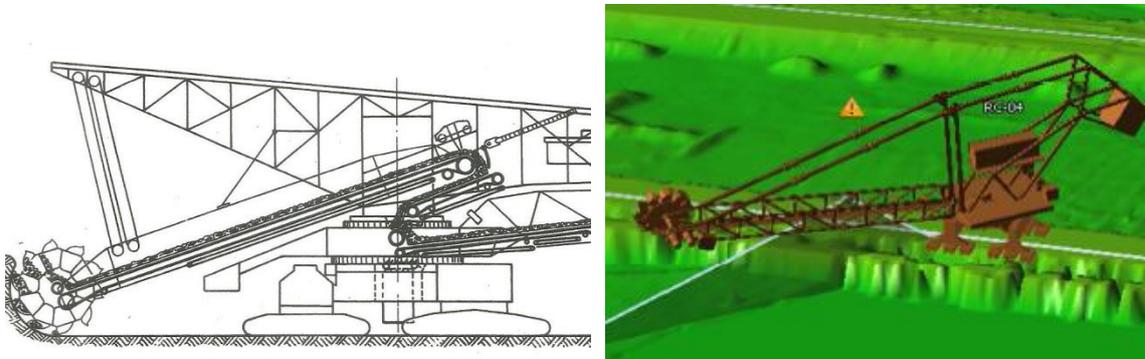


Figura 5 – Diagrama esquemático e foto de Recuperadora

Tabela 2 – Capacidade dos equipamentos do sistema de expedição em Carajás

Equipamento	TAG	Capacidade de Projeto (ton/h)
Recuperadora	RP 152-01	6.000
Recuperadora	RP 152-02	7.000
Recuperadora	RP 152-03	10.000
Recuperadora	ER 151-01	8.000
Silo de Carregamento	SI 152-01	16.000
Silo de Carregamento	SI 152-02	16.000
Silo de Carregamento	SI152-03	18.000
Correia Transportadora	TR 152-01	8.000
Correia Transportadora	TR 152-02	16.000
Correia Transportadora	TR 152-03	8.000
Correia Transportadora	TR 152-04	16.000
Correia Transportadora	TR 152-09	16.000
Correia Transportadora	TR 152-10	8.000
Correia Transportadora	TR 151-26	10.000
Correia Transportadora	TR 152-30	18.000
Correia Transportadora	TR 152-31	10.000
Correia Transportadora	TR 152-32	10.000
Correia Transportadora	TR 152-33	18.000
Correia Transportadora	TR 152-40	10.000

3.3 – INDICADORES DE EXPEDIÇÃO

Esta seção apresenta e discute os indicadores do sistema de expedição aplicados atualmente na empresa em estudo. Para tal, foram realizadas visitas em campo, analisadas as particularidades do sistema de expedição e verificados os controles de desempenho utilizados para este fim.

Os indicadores disponíveis no banco de dados da empresa têm por finalidade controlar principalmente o desempenho interno do carregamento de trens e a interface no ponto de carga. São utilizados os indicadores tradicionais de sistemas industriais (tempo disponível, tempo em operação, produtividade) e outros indicadores que tem por finalidade avaliar a interferência do processo de carregamento (responsabilidade mina) no processo de transporte (responsabilidade ferrovia) e vice-versa. A seguir são apresentados os indicadores mapeados, bem como sua descrição, fórmula de cálculo e objetivo:

- **Recepção** – Trata-se do indicador para medir o tempo entre a chegada do trem no terminal ferroviário até o posicionamento na entrada do silo. O objetivo é medir o tempo de manobras do trem dentro do terminal ferroviário. Caso não seja possível o posicionamento por alguma restrição de carregamento, a contagem deste tempo é

paralisada até que seja retirada a restrição e, após, a mesma é retomada até o posicionamento do trem. A unidade de medida é horas e a responsabilidade pelo indicador é da equipe de ferrovia.

- **Aguardando Carregamento** – Este indicador mede o tempo que o trem, após posicionado, aguarda para iniciar seu carregamento. A contagem é iniciada no posicionamento na entrada do silo e terminada quando o primeiro vagão é carregado. Seu objetivo é medir o tempo de espera dos trens vazios no terminal. Sua unidade de medida é horas e a responsabilidade é exclusiva da equipe da mina.
- **Tempo Em Carregamento** – Este indicador mede o tempo decorrido desde o início de carregamento do trem no silo até o carregamento do último vagão. Os tempos de parada do sistema de expedição, por ocorrências de manutenção ou processo são contabilizados na apuração deste indicador. O tempo necessário para *set-up* do sistema de carregamento (troca de produto no silo) também é englobado. O objetivo é avaliar o desempenho global do sistema, considerando as responsabilidades tanto dos processos sob responsabilidade da mina (carregamento) quanto ferrovia (manobra e partida de trens). Sua unidade de medida é horas.
- **Formação** – É o indicador que mede o tempo necessário para que sejam realizados os testes de composição (trem) carregada e partida do terminal ferroviário. Sua medida é iniciada após o carregamento do último vagão e finalizada assim que o trem parte do terminal. O objetivo do indicador é otimizar a partida de trens, evitando impactos no carregamento ocasionados por bloqueios de linha. A unidade de medida é horas e a responsabilidade é da equipe da ferrovia. Tempos de quebra no terminal ferroviário (defeito de locomotiva, trilhos, etc) são contabilizados neste indicador.
- **Ociosidade** – Este indicador mede a quantidade de horas que o sistema de expedição fica parado sem trens para serem carregados. A unidade de medida também é horas e sua contabilização só é efetuada caso os três silos estejam sem trem. Sua contabilização é iniciada ao término de carregamento do trem que esvazia o terminal e finalizada com a chegada de outro trem ao terminal. O objetivo é avaliar a ocupação do terminal ferroviário.
- **Sem Simultaneidade** – Trata-se do indicador utilizado para medir quanto tempo apenas um silo carregou trens no sistema de expedição por falta de outros trens no terminal ferroviário. É medido em horas e a para que seja contabilizado, basta que

qualquer um dos três silos esteja em carregamento e os demais aguardando trem. O objetivo é avaliar a ocupação do terminal ferroviário.

- Simultaneidade 2 Silos – É o indicador que mede o tempo em que dois silos foram utilizados para carregamento no sistema de expedição por falta de outro trem no terminal. A partir da premissa de que um trem esteja em carregamento no sistema de expedição, sua contagem é iniciada quando o segundo trem tem seu primeiro vagão carregado em outro silo e finalizada quando o último vagão de um dos dois trens é carregado. Medido em horas, tem por objetivo avaliar a ocupação do terminal.
- Simultaneidade 3 Silos – Este é o indicador complementar de ocupação do terminal ferroviário. Sua contagem é iniciada quando os três silos estão em carregamento e finalizada quando um dos carregamentos é finalizado. Também medido em horas, visa além da avaliação da ocupação do terminal a otimização da utilização do sistema de expedição.
- Horas Disponíveis da Expedição – Este indicador mede o tempo em que o sistema de expedição está pronto para carregar os trens. Os tempos de intervenção por manutenção (preventiva ou corretiva) são debitados das horas programadas para trabalho (horas calendário, neste caso). Este indicador também é medido em horas, porém dado a flexibilidade do sistema de expedição em estudo, possui algumas particularidades. Como existem quatro linhas de alimentação e somente três linhas de carregamento (saída dos silos), conforme mostrado na Figura 7, há a possibilidade de que uma linha de alimentação (recuperadoras) esteja indisponível sem que a medida de disponibilidade seja afetada. Para evitar que este problema aconteça, a disponibilidade é medida nas quatro linhas de alimentação, com a ressalva de que caso alguma das três linhas de saída (carregamento) esteja indisponível, impedindo que alguma linha de alimentação esteja em operação, este tempo será debitado como hora indisponível mesmo que a linha de alimentação não esteja com nenhum defeito ou intervenção de manutenção programada. A quantidade de horas utilizada para medida tem por base 24 horas, sendo assim este indicador trata-se de uma média de horas disponíveis das quatro linhas de alimentação. Esta é uma medida de disponibilidade física e seu objetivo é avaliação da manutenção do sistema de expedição.
- Horas Trabalhadas da Expedição – É o indicador que mede o tempo em que o sistema de expedição operou. Sua forma de medida tem as mesmas particularidades das horas disponíveis da expedição, porém, neste caso as horas programadas para trabalho

correspondem às horas disponíveis (não horas calendário, como no indicador de disponibilidade). Também medido em horas visa avaliar a utilização do sistema de expedição.

- Produtividade da Expedição – Finalmente, o indicador de produtividade é calculado a partir do volume expedido dividido pelas horas trabalhadas da expedição. Medido em quilo-toneladas por hora, seu objetivo é avaliar o desempenho do sistema de expedição sob a ótica do carregamento. Este é um indicador de responsabilidade da equipe da mina.

A Tabela 3 mostra sumário dos indicadores levantados.

Tabela 3 – Indicadores de interesse do sistema de expedição em Carajás

Indicador	Unidade Medida	Responsabilidade	Sistema
Recepção	Horas	Ferrovia	UNILOG
Aguardando Carregamento	Horas	Mina	UNILOG
Tempo Em Carregamento	Horas	Ferrovia/Mina	UNILOG
Formação	Horas	Ferrovia	UNILOG
Ociosidade	Horas	Ferrovia/Mina	UNILOG
Sem Simultaneidade	Horas	Ferrovia/Mina	UNILOG
Simultaneidade 2 Silos	Horas	Ferrovia/Mina	UNILOG
Simultaneidade 3 Silos	Horas </td <td>Ferrovia/Mina</td> <td>UNILOG</td>	Ferrovia/Mina	UNILOG
Horas Disponíveis da Expedição	Horas	Mina	GPV-M
Horas Trabalhadas da Expedição	Horas	Ferrovia/Mina	GPV-M
Produtividade da Expedição	kton/hora	Mina	GPV-M

As Figuras 8 e 9 mostram a composição dos indicadores ao longo do tempo de forma gráfica.

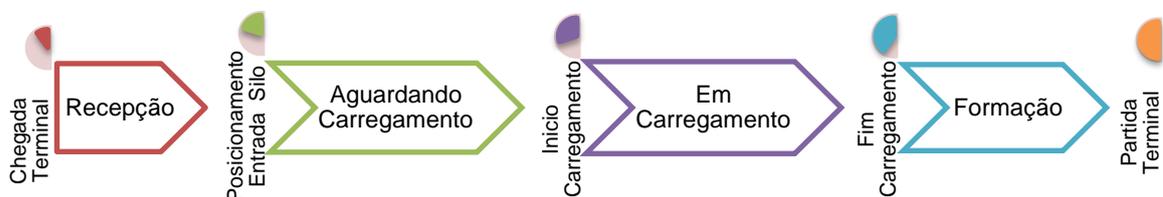


Figura 8 – Diagrama Sequencial de Composição dos Indicadores (linha de carregamento)

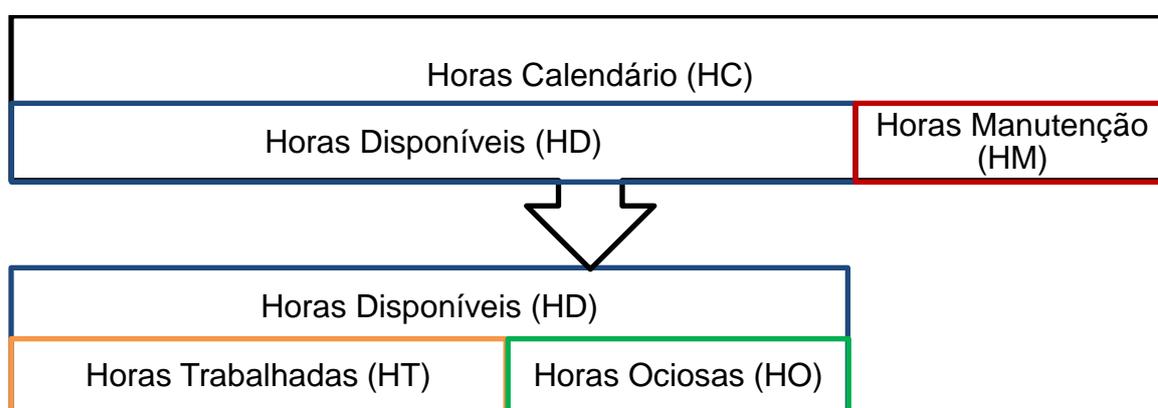
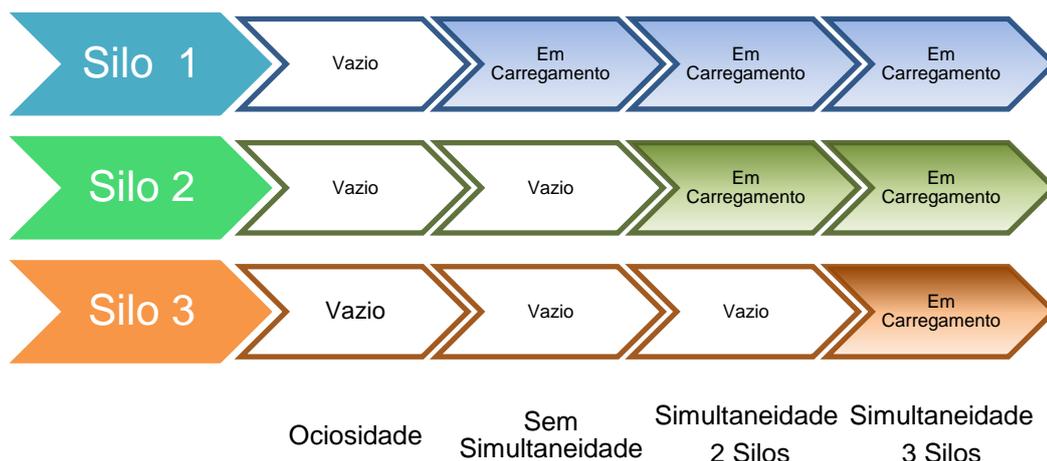


Figura 9 – Diagrama Sequencial de Composição dos Indicadores (sistema de expedição)

Definidos os indicadores de interesse para o estudo, passou-se para a coleta dos dados. Os dados foram coletados através do sistema de registro de parada de equipamentos da expedição (GPV-M) e sistema de controle de circulação ferroviária (UNILOG). O sistema de registros de paradas dos equipamentos registra de forma automática os momentos em que qualquer equipamento tenha parado sua operação, sendo obrigatório para o operador indicar o motivo de tal parada. Este sistema contém os dados brutos de tempo de operação. Já o sistema de controle de circulação ferroviária, captura de forma automática os momentos em que os trens se posicionaram em cada localidade ao longo da ferrovia, sendo também obrigatória a indicação dos motivos de desvio (tempos acima dos previstos). Ambos os sistemas provêm dados com confiabilidade adequada, dado sua natureza automática de captura.

CAPÍTULO 4 – MOSAICO DE SIMULAÇÃO DA EXPEDIÇÃO

Este capítulo descreve o modelo de previsão de janelas para o processo de expedição. Inicialmente, são apresentados os conceitos utilizados para a elaboração da heurística do mosaico de simulação da expedição. A seguir, o simulador é descrito e seu código fonte comentado. Finalmente, visando aprimorar o método proposto, a acurácia do mosaico é avaliada, utilizando dados históricos e comentários sobre os ajustes realizados.

4.1 – HEURÍSTICA PARA ELABORAÇÃO DO MOSAICO DE SIMULAÇÃO DA EXPEDIÇÃO

Os modelos de simulação são formas de descrever processos reais buscando representar através de cálculos e lógicas condicionais as observações coletadas para inferir sobre o comportamento futuro desses processos. Os modelos podem ser matemáticos, baseados na extrapolação do passado por repetição de condições já medidas, ou, heurísticos, baseados em conhecimentos dos observadores para modelar a realidade conforme percepções e conhecimentos prévios do problema (TAHA, 2008).

Para o caso descrito neste trabalho, um modelo heurístico foi utilizado dada a grande quantidade de variáveis envolvidas para elaboração de um modelo matemático exato, além da grande variabilidade de condições possíveis para solução do problema, o que dificulta a deliberação sobre o futuro, baseado em uma extrapolação do passado.

O diagrama apresentado na Figura 7 e a Tabela 2, incluídos no Capítulo 3, auxiliam na compreensão dos elementos considerados na construção do modelo.

O diagrama mostra quatro linhas de alimentação para três linhas de saída. Porém, as três linhas de saída, se somadas, têm capacidade superior à soma das quatro linhas de alimentação. Conforme Tabela 2, a capacidade das linhas de alimentação é de 31.000 ton/h, enquanto a capacidade das linhas de saída é de 50.000 ton/h. Este fato indica que, para alcançar a máxima capacidade do sistema, não é necessária a utilização plena das três linhas de saída. Porém, para que este excesso de capacidade nas linhas de saída gere de fato oportunidades de manutenção, as decisões sobre a lógica de utilização do sistema e construção de um Mosaico

de Simulação da Expedição devem ser tomadas conforme algumas premissas descritas a seguir.

A primeira premissa é a análise das capacidades individuais das linhas de carregamento. A linha de saída do Silo 3 tem capacidade superior às demais linhas de carregamento, logo, esta linha deve ser sempre priorizada caso esteja disponível. A menor utilização desta linha implica redução na capacidade do sistema de forma global e, por consequência, menor probabilidade de captura de ociosidades na expedição.

Outra premissa importante é a confiabilidade das linhas. A partir das medidas dos indicadores de MTBF (Tempo Médio Entre Falhas) e MTTR (Tempo Médio Para Reparo), pode-se inferir sobre a probabilidade de ocorrências de falhas no sistema de expedição e bloqueio de linhas de saída. Esta premissa aproxima o modelo da realidade e deve ser levada em consideração para melhor acurácia da decisão do simulador.

No entanto, para utilização dos indicadores de MTBF e MTTR, é necessário atentar ao fato de que os indicadores apresentam a performance do sistema de forma global, e não individualizado por linha. Isto implica dizer que não há uma linha mais confiável que outra, e que as probabilidades de falha distribuem-se aleatoriamente nas três linhas a cada período mostrado pelo MTBF, e que, cada falha bloqueia a linha por um tempo indicado pelo MTTR para ser corrigida. A observação do sistema mostra que esta premissa é razoável e pode ser aplicada sem prejuízo da capacidade global do sistema.

A última premissa adotada são os bloqueios das linhas de carregamento para manutenção preventiva programada. Para obtenção da máxima capacidade do sistema de expedição, o modelo de simulação deve aceitar a ocorrência desses bloqueios e ainda assim prever a melhor solução para otimização dos carregamentos.

Definidas as premissas utilizadas para elaboração do modelo, as entradas de dados permitidas para o simulador devem ser indicadas. O principal dado de entrada para o mosaico de simulação são os horários de chegadas dos trens. Estes horários são disponibilizados de forma satisfatória pelo sistema ferroviário UNILOG, com uma confiabilidade na previsão de chegada do trem que aumenta à medida que o mesmo se aproxima do terminal. A observação indica que há uma alta probabilidade de confirmação dos horários de chegada previstos pelo sistema UNILOG para janelas inferiores a quatro horas do terminal.

A principal saída do mosaico de simulação é a distribuição dos carregamentos nas linhas de saída, buscando otimizar a ocupação do terminal e indicando as janelas de oportunidade para manutenção. Para o mosaico, a produtividade das linhas de alimentação foi considerada fixa, de acordo com a produtividade medida para cada equipamento, e apesar de existirem oscilações nesta produtividade por fatores operacionais, para a visibilidade global do sistema de expedição esta premissa é razoável.

Finalmente, os últimos dados de entrada para o mosaico de expedição são o tempo de carregamento e o tempo de manobra. Devido à flexibilidade e dinâmica do sistema de expedição, estes dados de entrada foram deixados livres para simular diferentes cenários que podem ocorrer na prática. Além de simplificar o simulador, isso permite que, caso ocorram mudanças significativas nas condições operacionais, como por exemplo, quebras de equipamentos ou alterações nos horários de chegada dos trens, um novo cenário pode ser simulado pelo mosaico sem perda de precisão do modelo. Esta característica também elimina a necessidade de simulação da utilização das recuperadoras.

Os tempos de manobra também foram deixados livres para simulação de cenários, pois a única premissa que interfere nesta variável é a própria ocupação do terminal, que é uma saída do simulador. A observação indica que não há variação notável no tempo de manobra, suficiente para reduzir ou aumentar as janelas de oportunidade de manutenção.

4.2 – LÓGICA DO MOSAICO DE SIMULAÇÃO DA EXPEDIÇÃO

Nesta seção o objetivo é apresentar o mosaico construído a partir das premissas indicadas na seção anterior, bem como o fluxograma e código fonte desenvolvido para compreensão do modelo utilizado.

O simulador foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação Visual Basic, e é executado no software Microsoft Excel 97 a partir do utilitário de macros. A decisão pela utilização do software e linguagem de programação foi possibilitar a utilização do mosaico de expedição nos equipamentos de informática disponibilizados pela empresa para os profissionais que operam as instalações e serão os usuários finais do mosaico.

A Figura 10 mostra o fluxograma da rotina preenchimento de manutenção de linhas no mosaico. A Figura 11 apresenta o fluxograma da rotina de preenchimento carregamento de trens no mosaico. O Anexo 1 apresenta o código fonte desenvolvido para o mosaico.

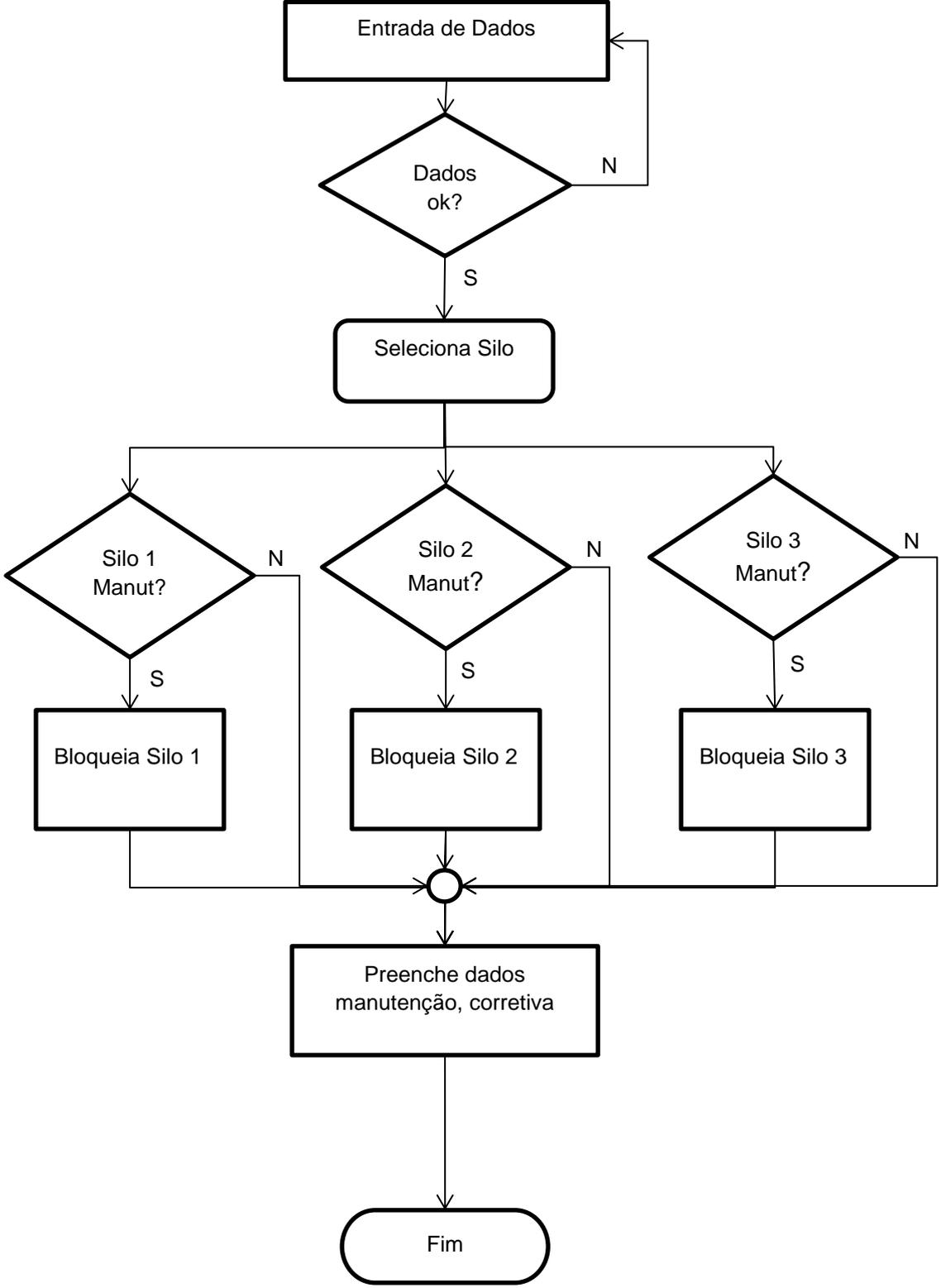


Figura 10 – Fluxograma da rotina de preenchimento de manutenção de linhas no mosaico

A entrada de dados fornecida pelo “usuário” para o mosaico inclui dia e horários de chegada dos trens ao terminal de carregamento, o tempo de carregamento, tempo de manobra além das paradas preventivas programadas previstas para o período. O MTBF e MTTR são entradas fornecidas apenas pelo “administrador” do mosaico, pois são médias móveis que devem ser atualizadas mensalmente após o fechamento dos indicadores citados.

Após a entrada de dados, o mosaico inicia sua rotina realizando a alocação das manutenções. Inicialmente a rotina verifica se há alguma manutenção preventiva programada. Caso positivo, a rotina bloqueia a linha de carregamento no horário especificado. Este bloqueio impede que as rotinas de simulação subsequentes aloquem trens nas linhas de carregamentos em manutenção preventiva. Após o lançamento das manutenções preventivas no mosaico, as ocorrências de manutenções corretivas estimadas são lançadas no mosaico a partir das informações do MTBF e MTTR informadas previamente.

Para obtenção dos valores de MTBF e MTTR, o sistema de registro de paradas da empresa (chamado GPV – M) é utilizado; esse sistema cobre todas as paradas do sistema de expedição. Para simular as falhas eventuais nos equipamentos, a rotina elaborada para o mosaico lança em intervalos de tempo iguais ao MTBF informado um bloqueio em quantidade de horas igual ao MTTR informado. A rotina inicia o lançamento das horas pela linha de carregamento do Silo 1, seguida pela linha de carregamento do Silo 2 e finalmente a linha do Silo 3. Caso alguma destas linhas já se encontre bloqueada pela rotina de manutenção preventiva programada informada previamente, o valor em horas do MTBF é adicionado ao final da manutenção preventiva programada e as horas de MTTR são lançadas na sequência. Esta rotina é utilizada a fim de simular a situação de que após a conclusão de uma manutenção preventiva programada, a probabilidade de quebra subsequente desta mesma linha é reduzida. É importante destacar que este preenchimento de dados para simulação de manutenções corretivas não prioriza nenhuma das linhas de carregamento como menos confiável, isto é, o lançamento da primeira falha é aleatória entre as três linhas com a mesma probabilidade para qualquer uma delas.

Finalizado a rotina de lançamento dos dados de manutenção preventiva programada e corretivas estimadas, o mosaico é preenchido, permitindo ao usuário visualizar de forma gráfica a distribuição de disponibilidades do sistema de expedição ao longo do período especificado.

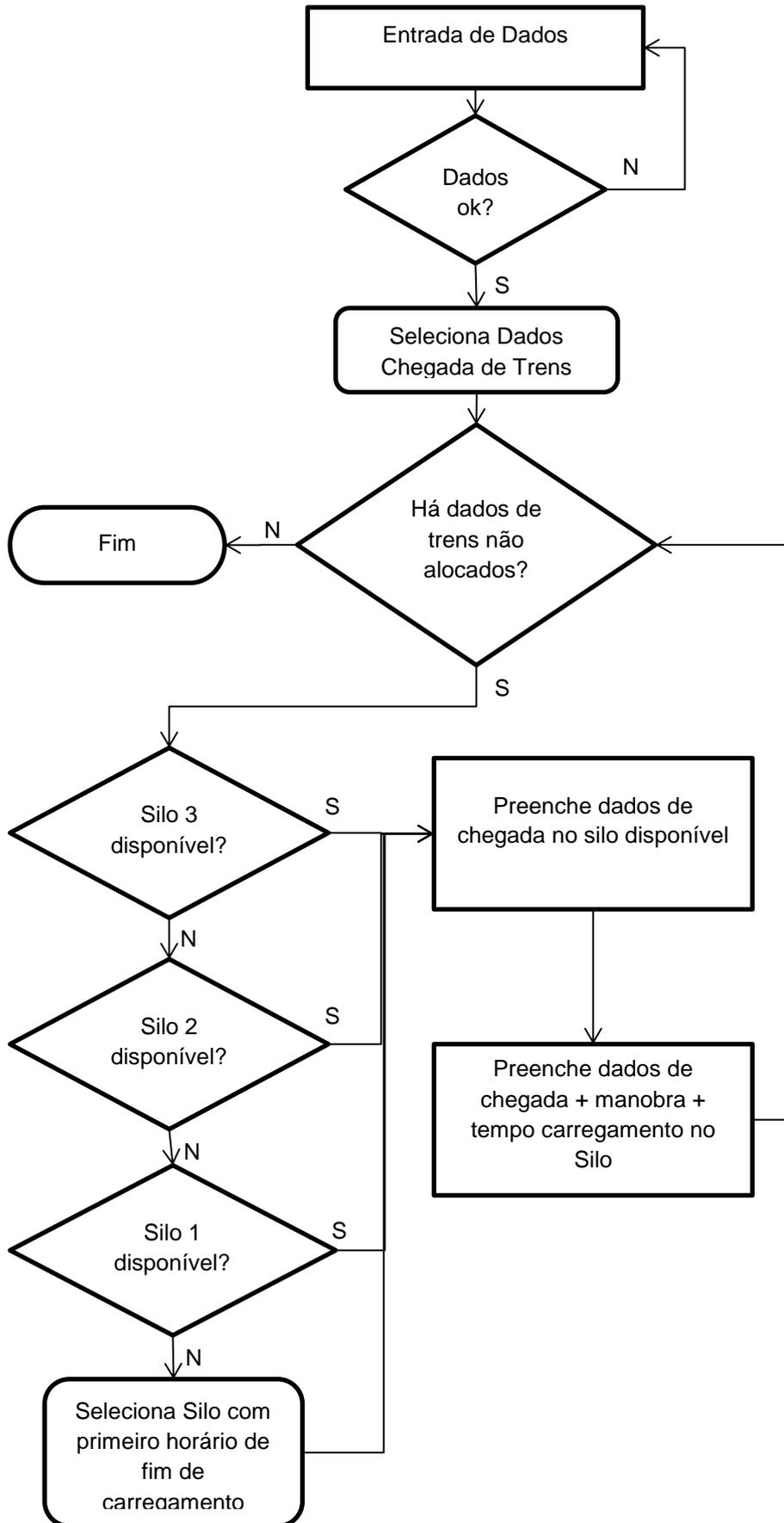


Figura 11 – Fluxograma da rotina de preenchimento de carregamento de trens no mosaico

Após a rotina de lançamentos dos dados de manutenção, é iniciada a rotina de preenchimento dos dados de carregamento conforme a chegada de trens ao terminal. Esta rotina coleta as informações de previsão de chegadas de trens informadas pelo “usuário” e inicia a alocação das informações. Para este caso, é dada a preferência para a linha de carregamento do Silo 3, seguido pela linha do Silo 2 e finalmente Silo 1.

Esta sequência foi escolhida principalmente por dois fatores: maior capacidade da linha de carregamento do Silo 3 e maior facilidade para remoção de sobrecargas nos vagões nas linhas de carregamento dos Silos 3 e 2. Esta priorização torna o tempo médio de carregamento utilizado na rotina do mosaico como situação de pior caso, e assim, aumenta a probabilidade de uma janela de oportunidade que venha a ser informada pelo mosaico realmente ocorrer.

A partir da informação de horário de chegada do trem, a linha de carregamento é selecionada conforme priorização estabelecida e disponibilidade das mesmas. Caso as três linhas de carregamento estejam disponíveis, a opção selecionada é a linha do Silo 3. Caso esta linha esteja indisponível, seja por manutenção preventiva, ou já ocupada por outro carregamento, a opção selecionada é a linha do Silo 2. A linha do Silo 1 é selecionada apenas caso as duas outras linhas estejam ocupadas ou indisponíveis. Finalmente, caso as três linhas estejam indisponíveis no momento de chegada do trem, a rotina verifica a primeira linha a ser liberada e aloca o trem para esta linha, reduzindo assim o tempo de espera no terminal.

Passada a etapa de seleção da linha de carregamento a receber determinado trem, a rotina de carregamento adiciona ao horário de chegada do trem ao terminal o tempo de manobra e tempo de carregamento e obtém assim o horário previsto para fim de carregamento. Este horário indica o momento a partir do qual o trem carregado estará pronto para partir e o silo indicado ficará disponível novamente. A rotina repete este processo de alocação de trens nas linhas de carregamento até que todos os trens informados pelo “usuário” tenham as informações de início e fim de carregamento devidamente preenchidas.

Finalizado a rotina de definição dos horários de início e fim de carregamento, o mosaico é preenchido, permitindo ao usuário visualizar de forma gráfica a distribuição de carregamentos do sistema de expedição ao longo do período especificado, assim como a distribuição das atividades de manutenção preventiva programadas e as corretivas estimadas.

Outro ponto importante a ser destacado na rotina é que, caso alguma linha de carregamento alocada com carregamento tenha alguma indisponibilidade corretiva estimada

pela rotina de alocação de manutenções, este tempo é adicionado ao tempo total de carregamento para obtenção do horário de fim de carregamento. Ainda, para evitar alocação de trens em linhas com manutenção preventiva programada, a rotina de carregamento verifica se o horário de fim de carregamento é coincidente com o período em que determinada linha de carregamento esteja indisponível por manutenção preventiva. Caso isto ocorra, o trem é alocado para o próximo silo conforme priorização descrita anteriormente.

A Figura 12 mostra o gráfico final gerado pelo Mosaico de Simulação da Expedição. Nas linhas do mosaico são indicadas as Horas Disponíveis (HD) e Horas Trabalhadas (HT) em cada silo. A linha “Janela” aponta a existência de uma oportunidade em um ou mais silos de carregamento, indicando em verde a oportunidade de atuação que é detalhada na aba “Relatório” do mosaico.

Mosaico Expedição

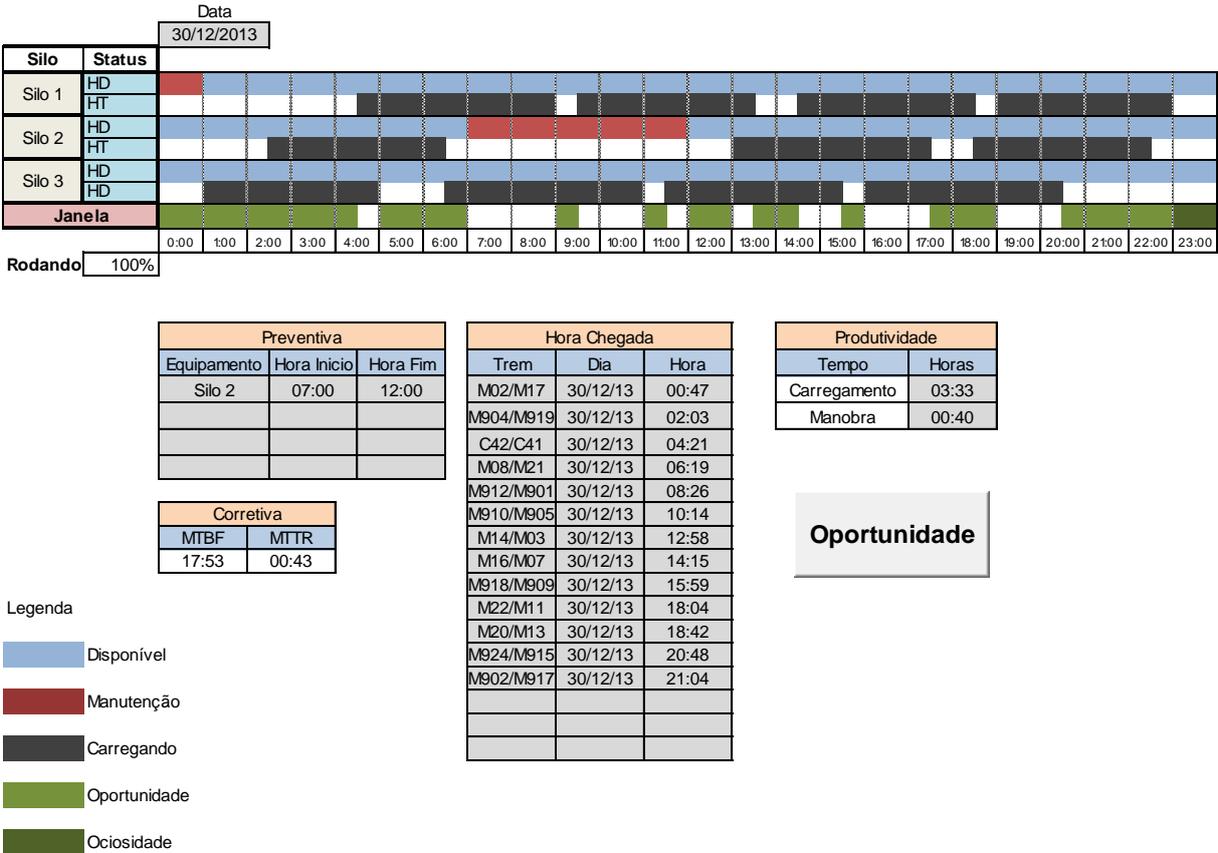


Figura 12 – Interface do Mosaico de Simulação da Expedição

A Figura 13 mostra a rotina final, que é a emissão de um relatório informando os horários de oportunidade. Este relatório indica o início e fim de cada janela de oportunidade estratificado por linha de carregamento disponível, silos e a quantidade de horas totais de oportunidade no período que podem ser capturadas para manutenção.

Para esta distribuição de chegada, foram identificadas					9:13:00	horas de oportunidades, sendo:
De	30/12/2013 00:43	hs às	30/12/2013 04:21	hs, no silo		1
De	30/12/2013 12:00	hs às	30/12/2013 13:53	hs, no silo		2
De	30/12/2013 20:16	hs às	30/12/2013 23:58	hs, no silo		3

Figura 13 – Relatório Final de Oportunidades de Manutenção

4.3 – TESTES E VALIDAÇÃO DO MOSAICO DE SIMULAÇÃO DA EXPEDIÇÃO

Para a etapa de validação das informações do Mosaico de Simulação da Expedição foram utilizados dados históricos do sistema de expedição. Foi selecionado o período de 02/12/2013 a 30/12/2013 para esta verificação. Os dados de horário de chegada, início de carregamento e fim de carregamento foram tabelados para o período e organizados de forma a serem lançados no gráfico do Mosaico de Expedição e gerar o relatório final que seria gerado por estas informações reais.

A seguir, os horários de chegada de trem foram lançados, e o Mosaico foi utilizado como se as informações de tempo de carregamento e manobra reais não estivessem disponíveis e sim estimadas pela média móvel dos valores realizados no último período anterior ao estudado.

A Tabela 4 mostra o comparativo entre os resultados obtidos para janelas de ociosidade geradas para os carregamentos efetivamente realizados e as saídas a partir da execução das rotinas do Mosaico de Simulação da Expedição.

A partir da Tabela 4, pode-se verificar que os resultados do Mosaico de Simulação da Expedição foram satisfatórios. O tempo total de ociosidades ocorridas no período foi de 459 horas e 31 minutos, enquanto o tempo total de ociosidades simulado para o mesmo período utilizando o mosaico foi de 411 horas e 36 minutos. Isso corresponde a uma diferença de aproximadamente 10%, a favor da segurança (tempo previsto menor que o tempo real disponível para atividades de manutenção). Essa diferença é considerada aceitável, e confirma a utilidade do Mosaico como suporte ao planejamento das atividades de manutenção.

Tabela 4 – Comparativo de janelas de oportunidades, Real x Simulado

<i>Dia</i>	<i>Executado</i>	<i>Simulado</i>	<i>Diferença</i>
02/12/2013	20:42:00	23:16:00	- 2:34:00
03/12/2013	32:29:00	26:25:00	+ 6:04:00
04/12/2013	25:21:01	20:17:00	+ 5:04:01
05/12/2013	16:00:00	10:26:00	+ 5:34:00
06/12/2013	2:39:00	0:00:00	+ 2:39:00
07/12/2013	13:48:00	17:05:00	- 3:17:00
08/12/2013	16:19:00	22:31:00	- 6:12:00
09/12/2013	12:04:00	15:33:00	- 3:29:00
10/12/2013	29:35:00	25:08:00	+ 4:27:00
11/12/2013	4:27:00	6:32:00	- 2:05:00
12/12/2013	13:37:00	17:09:00	- 3:32:00
13/12/2013	13:09:00	9:50:00	+ 3:19:00
14/12/2013	15:18:00	8:05:00	+ 7:13:00
15/12/2013	29:30:00	22:41:00	+ 6:49:00
16/12/2013	16:20:00	13:13:00	+ 3:07:00
17/12/2013	12:15:00	12:15:00	0:00:00
18/12/2013	5:32:00	2:22:00	+ 3:10:00
19/12/2013	29:16:00	22:41:00	+ 6:35:00
20/12/2013	3:27:00	3:25:00	+ 0:02:00
21/12/2013	20:39:00	23:31:00	- 2:52:00
22/12/2013	1:53:00	4:27:00	- 2:34:00
23/12/2013	9:25:00	6:06:00	+ 3:19:00
24/12/2013	17:53:00	17:17:00	+ 0:36:00
25/12/2013	16:20:00	12:53:00	+ 3:27:00
26/12/2013	28:59:00	23:38:00	+ 5:21:00
27/12/2013	12:54:00	5:00:00	+ 7:54:00
28/12/2013	6:32:00	3:46:00	+ 2:46:00
29/12/2013	19:32:00	23:02:00	- 3:30:00
30/12/2013	13:36:00	13:02:00	+ 0:34:00
Total	459:31:01	411:36:00	47:55:01

O valor de acurácia observado pode ser considerado adequado dada a variabilidade do processo de expedição, que é função das incertezas intrínsecas associadas ao processo de previsão de chegadas de trens e carregamentos nos silos. As informações de testes do Mosaico foram consideradas suficientes para início das etapas de grupo focado, e o Mosaico de expedição considerado válido para os fins deste trabalho.

Vale destacar, ainda, que a acurácia do Mosaico de Expedição depende da frequência de atualização do mesmo. Durante esse período de observação, reportado na Tabela 4, a

atualização do Mosaico era feita, em média quatro vezes por dia. Atualizações mais frequentes, que podem ser implementadas na prática com relativa facilidade, irão melhorar a acurácia do sistema desenvolvido.

CAPÍTULO 5 – GRUPO FOCADO

Neste capítulo são apresentados os resultados do grupo focado realizado para análise do mosaico da expedição. O estudo permitiu identificar os principais pontos para que as ociosidades na expedição possam ser aproveitadas.

Inicialmente é apresentada a estrutura e planejamento do grupo focado, incluindo o roteiro de questões e a escolha dos participantes. A seguir, os principais tópicos de discussão e as deliberações chave do grupo são apresentados. Finalmente, é apresentada uma tabela resumo contendo os pontos críticos para implantação da nova metodologia de aproveitamento de janelas de ociosidade na expedição.

5.1 – PLANEJAMENTO DO GRUPO FOCADO

Os grupos focados são fóruns de um pequeno grupo de indivíduos (usualmente 5 a 10 pessoas), com duração aproximada de duas horas, conduzidos por um moderador com o objetivo de discutir algum tópico de interesse (RIBEIRO, 2003).

O tópico de interesse levantado para discussão neste trabalho é o aproveitamento de oportunidades de manutenção através da utilização do mosaico da expedição e discussão sobre os recursos e estruturas necessários para possibilitar o efetivo uso das janelas de tempo disponíveis.

A estrutura do grupo focado foi planejada para: (i) permitir o entendimento das discussões técnicas envolvidas na definição do modelo aplicado ao mosaico, (ii) discutir a aplicabilidade do mosaico e (iii) definir os recursos para viabilizar o alcance de resultados indicados pelo modelo.

Dada a característica deliberativa do grupo, aliada à experiência técnica necessária para tais discussões, o grupo foi composto por cinco pessoas, sendo dois participantes com característica predominantemente deliberativa referente à disponibilização de recursos para aplicação do modelo, dois participantes com predominância do conhecimento técnico e um participante com característica tanto técnica quanto deliberativa, sendo este o principal interessado na aplicação do mosaico. Abaixo são enumerados os participantes e a principal característica que motivou sua escolha:

- Supervisor de operação do carregamento (técnica);
- Ex-gerente da expedição (técnica);
- Gerente de manutenção da expedição (deliberativa);
- Gerente de engenharia de manutenção da planta (deliberativa);
- Gerente da expedição (técnica e deliberativa);

Os tópicos de discussão foram roteirizados a partir de sete perguntas apresentadas a seguir:

- i. Questão Inicial
 - Existe ociosidade na expedição suficiente para a atuação de manutenção?
- ii. Questão de transição
 - É possível mapear as oportunidades de forma antecipada?
- iii. Questões Centrais
 - O modelo de previsão está adequado com a experiência observada no dia-a-dia?
 - Qual o tamanho da janela necessária para as tarefas de manutenção?
 - Quais os recursos e estrutura necessários para capturar esta janela?
- iv. Questão Resumo
 - Após a aplicação do modelo, pode-se esperar melhoria nos resultados de disponibilidade e volume expedido?
- v. Questão Final
 - Algum outro ponto para acrescentar ao modelo, para que se possa atingir os resultados?

O material apresentado para o grupo é mostrado no Anexo 2 deste trabalho. A reunião do grupo focado foi gravada em áudio, e as discussões tiveram duração de aproximadamente duas horas e quinze minutos. Um auxiliar também estava presente à reunião do grupo focado e realizou o registro dos principais tópicos discutidos no grupo. O moderador do grupo foi o próprio pesquisador.

5.2 – TÓPICOS DE DISCUSSÃO DO GRUPO FOCADO

A sessão de grupo focado foi iniciada por uma explanação do moderador sobre objetivos do grupo focado. O material de suporte utilizado foi a apresentação no Anexo 03. O mosaico

da expedição foi mostrado e, após uma breve discussão sobre o algoritmo utilizado, houve consenso entre os membros que o mosaico seria uma ferramenta adequada para buscar o aproveitamento das ociosidades existentes na expedição.

A primeira questão foi apresentada pelo moderador e as discussões estão sumarizadas a seguir:

a. Existe ociosidade na expedição suficiente para a atuação de manutenção?

A discussão foi iniciada pelo gerente de operação que afirmou perceber durante vários períodos do dia algum dos silos de carregamento ocioso, devido à baixa regularidade na cadência do ciclo ferroviário causada principalmente pela necessidade de paradas para cruzamentos de trens na ferrovia. Em função disso, as recuperadoras também ficam paradas com o status aguardando trem. O supervisor de carregamento ilustrou algumas ocasiões em que foi possível a atuação da manutenção nestas janelas de ociosidade, porém sempre em atividades de pequeno porte e de forma pontual. O gerente de manutenção prontamente reconheceu as ocasiões citadas pelo supervisor. e houve consenso do grupo sobre a resposta afirmativa para esta questão. Sem mais considerações dos que não se pronunciaram, o moderador avançou para a próxima questão.

b. É possível mapear as oportunidades de forma antecipada?

Novamente o gerente de operação iniciou a discussão, afirmando que, como existe a disponibilidade de todas as informações referentes aos horários de chegada dos trens, além de informações sobre restrições de manutenção preventiva dos equipamentos do terminal e tempos de carregamento, ele acredita ser possível prever com boa confiabilidade os momentos do dia em que o terminal de carregamento ficará vazio, liberando algum dos silos e recuperadoras para manutenção, sem impacto no volume expedido. O ex-gerente de expedição interveio citando sua expectativa prévia de uma fórmula simplificada para esta resposta, enquanto o supervisor de carregamento afirmou que alguns profissionais experientes conseguem realizar o cálculo destes momentos de maneira tácita, e o mapeamento antecipado pode ser realizado, porém não há uma sistemática definida para tal. Afirmou ainda que este mapeamento pode variar conforme situações particulares dentro do terminal e que, em períodos mais curtos, quando os trens já estão próximos ao terminal, a antecipação de ociosidades é realizada mais facilmente. Finalmente o gerente de engenharia de manutenção da planta interveio com a afirmação de que já existem tecnologias de simulação apuradas o

suficiente para realizar tais previsões, no entanto para utilização rotineira necessitariam de simplificação, dado o tempo que tais simuladores levariam para informar tais cenários.

Neste momento o moderador apresentou o mosaico de expedição, o fluxograma que originou o algoritmo do programa e resultados comparativos referentes ao mês de dezembro/13, base utilizada para a pesquisa em curso.

Os participantes compreenderam a lógica e o funcionamento do mosaico e, na sequência, solicitaram uma série de simulações variando os parâmetros operacionais do mosaico como um teste de sensibilidade dos resultados de saída do mosaico.

Após a explicação detalhada do mosaico, o moderador deu sequência à sessão lançando a próxima questão do roteiro.

c. O modelo de previsão está adequado com a experiência observada no dia-a-dia?

Nesta questão o supervisor de carregamento iniciou a resposta afirmando que pelos exemplos simulados na sessão, o mosaico têm boa precisão, e as orientações fornecidas pelo mosaico são semelhantes às suas decisões de paradas e oportunidade na prática. Afirmou ainda que, quanto maior a distância entre os trens e o terminal, maior será a dificuldade para prever o momento e tamanho da janela de ociosidade e que, considerando a sua experiência de mais de vinte e cinco anos na expedição de Carajás, esta previsão é muito boa para uma janela de no máximo quatro horas de antecedência. O gerente de expedição e o ex-gerente de expedição confirmaram imediatamente o comentário, validando a percepção de boa precisão para uma janela máxima de quatro horas. Ao serem estimulados pelo moderador sobre o percentual de acerto nesta janela, houve consenso esse número seria superior a oitenta por cento.

O gerente de manutenção da expedição achou interessante a abordagem do mosaico pela utilização dos indicadores de MTBF e MTTR e solicitou alguns testes de sensibilidade sobre estas entradas. Essa solicitação foi atendida pelo moderador do grupo. O gerente de manutenção da expedição mostrou-se satisfeito com os resultados apresentados pelo simulador.

Foi solicitada a alteração do parâmetro tempo de carregamento, deixando o mesmo aberto para alterações conforme necessidade do usuário. Afirmaram que, em função da flexibilidade e caráter dinâmico do sistema de expedição, seria melhor deixar este parâmetro livre. Isso

simplifica o simulador, evita discussões sobre decisão de parada das recuperadoras e mantém a precisão do modelo.

d. Qual o tamanho da janela necessária para as tarefas de manutenção?

Para esta questão, o gerente de manutenção da expedição respondeu prontamente que a necessidade da janela de ociosidade varia conforme à atividade a ser realizada. Afirmou ainda que é possível atuação em janelas superiores à uma hora, atuando em atividades como troca de rolos dos transportadores de correia ou ajustes mecânicos e elétricos simples. O gerente de operação ponderou que o período de uma hora não seria tempo suficiente para a realização dos procedimentos anteriores à intervenção, como por exemplo, desenergização e bloqueio do equipamento a ser mantido. O gerente de manutenção rebateu a colocação e indicou que seu comentário partiu da premissa de que seria informado da janela de ociosidade com antecedência mínima de quatro horas, e sendo assim, poderia realizar as preparações necessárias previamente, possibilitando o aproveitamento de janelas superiores a uma hora.

O ex-gerente de expedição concordou com o comentário do gerente de manutenção da expedição, no entanto, achava mais interessante uma posição um pouco mais conservadora inicialmente, onde o sistema poderia sinalizar como janelas de ociosidade suficientes para atividades de manutenção aquelas superiores à duas horas. Os demais participantes da sessão concordaram e houve consenso de que a janela mínima para atuação da manutenção seriam aquelas superiores à duas horas. O moderador lançou então outra questão central:

e. Quais os recursos e estrutura necessários para capturar esta janela?

Novamente o gerente de manutenção da expedição iniciou este tópico de discussão afirmando que os recursos e estrutura necessários dependem do serviço a ser realizado na janela. A estrutura atualmente existente, (atuação em manutenção corretiva com equipes mobilizadas em regime de turno vinte e quatro horas por dia e preventivas programadas de segunda à sexta em horário operacional, de sete da manhã a quatro da tarde), permite a execução de pequenas atividades, como troca de rolos em transportadores de correias e pequenos reparos eletromecânicos. O tamanho máximo de atividade possível para execução neste modelo seriam janelas de quatro a cinco horas, para atividades com uma equipe de cinco executantes, totalizando de vinte a vinte e cinco Homens-hora (Hh), onde seria possível realizar a troca de algum subconjunto completo, como rodas de translação ou caçambas de recuperadoras, cilindros e comportas de silo, desde que os mesmos estivessem preparados na oficina de subconjuntos da planta. O supervisor de carregamento questionou se esta lógica de

preparação de subconjuntos não poderia ser aplicada a outras partes e componentes dos equipamentos de expedição, permitindo melhor planejamento para as atividades em janela de oportunidade. O gerente de engenharia de manutenção da planta propôs a elaboração de uma lista de atividades e respectivos tempos de execução que poderiam ser realizadas conforme a janela de ociosidade sinalizada. Além disso, propôs a associação de manutenções sistemáticas a serem executadas nesses intervalos. O gerente de manutenção da expedição, no entanto, ponderou que os laudos de inspeção detectiva têm peso maior para aumento da confiabilidade do sistema, e que estas atividades deveriam ser priorizadas para atuação nas janelas de ociosidade. O gerente de engenharia de manutenção da planta rebateu e propôs a elaboração de uma carteira mista, entre manutenções condicionais (laudos detectivos) e sistemáticas (preventivas baseadas em tempo) para compor as atividades a serem executadas nas janelas de ociosidade, sugestão que foi bem aceita por todos os participantes da sessão.

O moderador estimulou a discussão e questionou sobre a possibilidade de executar grandes intervenções em caso de grandes janelas de ociosidade. O gerente de manutenção da expedição afirmou que, para esses casos, o aproveitamento das janelas de ociosidade pode ser comprometido, já que as preparações para atividades deste porte podem ser superiores a setenta e duas horas. Mesmo se houvesse recursos extras empenhados, esse prazo não seria reduzido de forma significativa. O moderador solicitou um exemplo, e o gerente de manutenção da expedição citou a troca dos tapetes das correias transportadoras, atividade que possui um tempo de preparação superior a setenta e duas horas e tempo de execução aproximado de vinte e quatro horas. O grupo concordou com esta posição e ponderou que, se ainda existem atividades que demandam paradas preventivas das recuperadoras e silo de carregamento, o aproveitamento das ociosidades deveria ser realizado a partir da lista de atividades proposta pelo gerente de engenharia de manutenção, e que atividades de grande tempo de preparação não deveriam ser contempladas nesta lista inicialmente, mantendo a programação destas atividades para as paradas preventivas programadas.

Houve consenso do grupo de que a estrutura e recursos atualmente presentes na planta são suficientes para o início do novo modelo de aproveitamento de janelas de ociosidade a partir do mosaico da expedição. Finalizadas as questões centrais, o moderador lançou a questão resumo:

f. Após a aplicação do modelo, pode-se esperar melhoria nos resultados de disponibilidade e volume expedido?

O ex-gerente da expedição iniciou a discussão deste tópico, afirmando que o principal resultado que pode-se esperar ao aplicar o mosaico de expedição como modelo para aproveitamento de janelas de ociosidade para manutenção é uma redução nas paradas inesperadas nos sistema, aumentando o volume de minério expedido e também a confiabilidade do sistema. Em relação à disponibilidade física, informou que acredita ser pouco provável observar melhoria neste indicador, já que as preventivas programadas não deixarão de ser executadas, e que, conforme as janelas de ociosidade observadas, pode ocorrer uma maior quantidade de intervenções para manutenção que atualmente, porém nos momentos adequados, mas ainda assim reduziria a disponibilidade física total do sistema de expedição.

O gerente de expedição concordou que esta é uma oportunidade para aumento do volume expedido, mas não opinou sobre a disponibilidade física do sistema. Finalmente o gerente de manutenção da expedição concordou com o comentário do ex-gerente de expedição e que percebe o mosaico de expedição como uma ferramenta para melhorar a confiabilidade do sistema de expedição e aumentar o volume expedido, e que este é o principal objetivo para os resultados da empresa. Propôs a avaliação de mudança no indicador de manutenção de disponibilidade física da expedição para algum indicador mais relacionado à confiabilidade do sistema para verificar a melhoria nos resultados. O moderador lançou então a questão final.

g. Algum outro ponto para acrescentar ao modelo, para que se possa atingir os resultados?

O gerente de operação respondeu à este tópico informando ser necessário a elaboração de um procedimento para uso do mosaico e que deve ser aplicado pela equipe de planejamento de expedição para medir os resultados de forma mais efetiva.

Os demais participantes concordaram e solicitaram o início dos testes do mosaico. Eles foram informados pelo moderador que os ajustes solicitados seriam executados e receberiam o cronograma para execução dos testes.

Respondidos todos os questionamentos, o moderador agradeceu a participação e colaboração de todos com o grupo focado e finalizou a sessão.

5.3 – ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DA REUNIÃO

A partir das gravações do grupo focado, foram analisadas as intervenções de cada participante e os temas abordados. Os principais tópicos de discussão podem ser sumarizados em três itens: (i) adequação do modelo, (ii) infraestrutura de manutenção para suportar o modelo e (iii) resultados esperados com a aplicação do modelo. O Quadro 1 sintetiza os comentários do grupo.

Quadro 1 – Sumário dos dados Grupo Focado

Adequação do Modelo	Infraestrutura de Manutenção	Resultados Esperados
<ul style="list-style-type: none">• Premissas importantes verificadas e aplicadas• Boa sensibilidade operacional• Autonomia de simulação para usuário suficiente	<ul style="list-style-type: none">• Suficiente para aplicação do modelo• Não contempla paradas preventivas para vulcanização e grandes intervenções	<ul style="list-style-type: none">• Redução de corretivas• Manutenção do calendário de paradas preventivas programadas• Redução do tempo em carregamento• Melhor interface de comunicação Manutenção-Operação

Houve consenso no grupo focado de que o mosaico de expedição é um modelo suficientemente simples e eficaz para ser utilizado como ferramenta para melhoria do aproveitamento das janelas de ociosidade para manutenção. A lógica utilizada de escolha dos silos a serem priorizados para carregamento e a alternativa para substituir a inclusão da produtividade das recuperadoras no modelo foram consideradas adequadas.

A proposta validada pelo grupo é a utilização do mosaico da expedição como um simulador de cenários ao longo do dia. O grupo recomendou que as simulações devem ser atualizadas em intervalos de quatro horas para aumentar a precisão do mapeamento. Caso ocorram mudanças significativas nas condições operacionais, como por exemplo quebras de equipamentos ou alterações nos horários de chegada dos trens, um novo cenário será simulado pelo mosaico para auxílio na tomada de decisão. Para que esta premissa seja atendida foi estabelecido um procedimento de atualização diária uma hora após o início dos turnos de revezamento.

Em relação à infraestrutura de manutenção, foi entendido que paradas acima de duas horas devem ser consideradas para eventual aproveitamento através da realização de manutenção. A equipe de manutenção disponível conta com profissionais de todas as especialidades (mecânica, elétrica, hidráulica, etc) em turnos ininterruptos, além de recursos auxiliares (caminhão guindauto e ferramentaria). Desta forma, em qualquer momento que seja sinalizada uma janela de ociosidade, há a possibilidade de aproveitamento para intervenção de manutenção. Outros recursos auxiliares como andaimes e guindastes também estão disponíveis em turnos ininterruptos, no entanto, esses dependem de programação prévia mínima de quatro horas para que sejam mobilizados.

Em relação à organização da carteira de serviços, existe a disponibilidade prévia da mesma via sistema informatizado de manutenção, que pode ser consultado no momento da decisão de intervenção em uma janela de ociosidade. A carteira de serviços no sistema informatizado abrange tanto manutenções sistemáticas (baseadas em tempo) quanto manutenções condicionais (baseada em inspeção), sendo que a última possui prioridade.

Finalmente, em relação aos resultados esperados pela aplicação do modelo, houve consenso de que a eliminação de manutenções preventivas programadas não seria possível apenas adotando o modelo de aproveitamento de janelas de ociosidade como modelo para manutenção. As preventivas programadas devem ser mantidas, principalmente para atividades de vulcanização e trocas de subconjuntos de grande porte, como acionamentos e material de desgaste. Tais atividades tem duração acima de vinte e quatro horas, e o mosaico não tem boa sensibilidade para previsão de janelas tão longas.

Para previsões de mais longo prazo que possam gerar janelas com duração acima de vinte e quatro horas, apesar de estarem sujeitas a maiores incertezas, geralmente têm a sua causa fundamental em eventos de grande proporção, como por exemplo, intempéries naturais. Para estas situações, o planejamento das atividades é realizado através de reuniões diárias que envolvem todas as interfaces e tem como principal produto as previsões de liberação, dispensando, neste caso a utilização do mosaico de expedição.

Há uma expectativa na redução de corretivas indesejadas em componentes de menor porte, como rolos, cavaletes, guias, curtos em cabos elétricos e sistemas de lubrificação. Desta forma, espera-se um aumento na confiabilidade nos momentos críticos, isto é, nos momentos em que os trens se encontrarem em carregamento sob os silos.

A redução de quebras nos momentos de carregamento também gera a expectativa de redução do tempo de carregamento, uma vez que o tempo de parada dos trens por causas de quebra de equipamentos do sistema de expedição também será reduzido.

CAPÍTULO 6 – APLICAÇÃO DO MOSAICO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo é apresentada a aplicação do mosaico ao caso real do sistema de expedição da mina de Carajás bem como análise dos principais resultados decorrentes desta aplicação. Inicialmente, os procedimentos adotados para a aplicação do modelo são indicados e os resultados obtidos apresentados. A seguir, são realizadas as discussões e análises destes resultados frente às expectativas indicadas pelo grupo focado. Finalmente, os impactos nos indicadores da expedição são mensurados e, novamente, uma análise é realizada sob a ótica do sistema de expedição.

6.1 – APLICAÇÃO DO MOSAICO DA EXPEDIÇÃO

Para aplicação do mosaico da expedição, o primeiro passo envolveu elaborar uma lista de procedimentos para a utilização do mosaico. Essa lista foi estabelecida a partir das premissas indicadas pelo grupo focado. No entanto, foram necessárias algumas considerações a fim de integrar o mosaico às rotinas operacionais da área, de forma que o estudo não interferisse negativamente nos resultados, por ser observado como uma carga extra de trabalho.

A rotina de preenchimento do mosaico, conforme deliberado pelo grupo focado, deveria ser realizada em intervalos de quatro horas para uma maior acurácia das previsões. Porém para o estudo foram estabelecidas duas atualizações diárias, cada uma delas realizada uma hora após o início dos turnos de revezamento, sendo que a primeira acontecia à 1:00 da manhã e a outra às 7:00 da manhã. Esta proposta não prejudicou a aplicação, pois no período não foram verificadas ocorrências de grandes eventos que alterassem a distribuição de chegadas dos trens de forma significativa, provendo boa acurácia às previsões do mosaico.

O processo de análise para captura das janelas foi aplicado de segunda à sexta-feira, acoplado à reunião de rotina da manutenção-operação às 8:00, onde as principais atividades indicadas pela inspeção detectiva eram apresentadas e a carteira de tarefas era estabelecida conforme o tamanho das janelas indicadas no mosaico. No final do dia, as atividades executadas eram preenchidas pelo controle da manutenção, indicando os equipamentos, descrição da tarefa e o tempo estimado de cada atividade realizada.

Os técnicos e analistas de controle operacional foram treinados para utilização do mosaico e eram os responsáveis pelo preenchimento e divulgação dos resultados nos horários estabelecidos. O passo-a-passo para preenchimento foi acrescentado à planilha do mosaico para consultas pelos técnicos.

Os técnicos e supervisores de manutenção eram responsáveis pelo preenchimento da planilha de atividades executadas e indicação de captura das janelas mapeadas pelo mosaico. A planilha de atividades executadas é apresentada no Anexo 3.

O período de aplicação do mosaico foi de dezesseis dias, compreendido entre 02/09/2014 e 24/09/2014, e as informações obtidas foram compiladas na Tabela 5.

Tabela 5 – Informações da aplicação do Mosaico de Expedição

<i>Data</i>	<i>Previsão Horas Mosaico</i>	<i>Estimativa Horas Capturadas</i>	<i>Homens-Hora Aplicados</i>	<i>Equipamentos sob Manutenção</i>	<i>Principais atividades</i>	<i>% Horas Capturadas</i>	<i>Quantidade Atividades Realizadas</i>
02/09/2014	8:35:00	8:00:00	32	RP 152-01; TR 152-40; SI 152-03	Reparo em pino quebrado de caçamba e correção de vazamento na comporta de descarga	93%	3
03/09/2014	23:52:00	23:00:00	115	TR 152-10; TR 152-10; TR 152-33; TR 151-26; ER 151-01; SI 152-36	Reposicionado rolos no cavalete, trocado cavalete empenado e substituído pino e soldado trava de comporta	96%	7
04/09/2014	4:46:00	2:00:00	6	TR 151-26	Realizado corte de borda de correia danificada	42%	1
05/09/2014	14:09:00	10:00:00	46	TR 152-40; RP 152-01	Troca de cordoalhas danificadas do transportador e reaperto dos parafusos de fixação dos redutores de giro	71%	2
08/09/2014	21:22:00	13:00:00	46	TR 151-26; TR 152-30; ER 151-01	Substituídos rolos de carga, retorno plano e removida a roda do encoder de posicionamento	61%	3
09/09/2014	17:28:00	8:00:00	22	ER 151-01; RP 152-01	Eliminação de trinca nos trucks de translação e reabastecimento do sistema de lubrificação do giro	46%	2
10/09/2014	17:18:00	3:00:00	12	TR 152-04	Substituído rolo de retorno plano próximo ao chute de alimentação	17%	1
11/09/2014	9:37:00	9:00:00	36	SI 152-01; TR 152-33	Substituído rolo de carga e eliminado vazamento na tubulação hidráulica	94%	4
12/09/2014	23:03:00	13:00:00	44	TR 152-01; TR 152-02; ER 151-01	Realizado solda do anel de expansão do acoplamento e substituído rolo de retorno	56%	4
15/09/2014	11:27:00	12:00:00	44	SI 152-03; TR 152-09; SI 152-35; RP 152-01	Substituído rolo de carga e Substituído cilindro da comporta	105%	4
16/09/2014	5:29:00	3:00:00	9	TR 152-10	Substituído rolo de carga	55%	1
17/09/2014	32:22:00	23:00:00	122	TR 152-40; TR 151-26; RP 152-01; TR 152-02; SI 152-35	Retirado borda de correia de eixo do tambor; reconicionado os fios de rosca do tirante do carro tensor e completado nível de óleo no sistema hidráulico	71%	7
18/09/2014	5:45:00	3:00:00	15	RP 152-03	Realizado corte de chapa guia empenada no giro da máquina	52%	1
22/09/2014	7:12:00	8:00:00	24	TR 152-30	Substituído rolo de retorno	111%	2
23/09/2014	37:08:00	35:00:00	144	RP 152-01; TR 152-03; ER 151-01; SI 152-01; TR 152-30; SI 152-02	Reconicionado cavalete auto-alinhante, substituído rolo de impacto e confecção e montagem de travas de sapata para base de trilhos sob o silo	94%	10
24/09/2014	22:37:00	25:00:00	110	SI 152-01; RP 152-01; ER 151-01; RP 152-03; TR 152-04; SI 152-02	Substituídos rolos de carga, substituído buchas do olhal fixo da comporta e realizado reforço em solda de trilho sob o silo	111%	9
Total	262:10:00	198:00:00	827			76%	61

A partir da Tabela 5, pode-se verificar que, no período de observação, o mosaico indicou a ocorrência de 262 horas e 10 minutos de oportunidades a serem capturadas no sistema de expedição. Deste total, foi possível efetuar a captura de 198 horas com a realização de 61 atividades a partir das informações geradas pela metodologia proposta pelo mosaico, utilizando um total de 827 Hh. Este montante corresponde à 76% das horas indicadas pelo mosaico, sendo que o tempo médio das atividades realizadas foi de 3 horas e 14 minutos.

O principal equipamento onde foram realizadas as capturas de ociosidades foi a RP 152-01, com a execução de dez atividades, seguido pela ER 151-01, com a execução de sete atividades. A principal atividade realizada durante os períodos de ociosidade foi substituição de rolos, correspondendo a dez atividades e 33 horas de trabalho e 125 Hh.

Os resultados da aplicação do mosaico indicam que a metodologia para capturar ociosidades na expedição e realizar atividades de manutenção obteve sucesso em seu objetivo, que era estabelecer o direcionamento para execução de atividades priorizadas nos momentos apontados pelo mosaico.

6.2 – ANÁLISE DOS RESULTADOS DA EXPEDIÇÃO

Os principais indicadores avaliados para apuração dos resultados na expedição foram o Tempo em Carregamento e o MTBF do sistema de expedição. Estes indicadores foram apontados pelo grupo focado como os principais elementos que seriam influenciados pela aplicação da metodologia de captura de janelas para manutenção.

Estes indicadores são consolidados mensalmente, sendo que o Tempo em Carregamento é apresentado como média simples de todos os Tempos em Carregamento executados para os trens carregados no mês em apuração, e recebe a nomenclatura de TMC (Tempo Médio em Carregamento). O MTBF é calculado a partir dos dados obtidos para as Horas Disponíveis da Expedição, sendo uma importante medida de confiabilidade conforme explanado no Capítulo 2 (item 2.2). As fórmulas de cálculo e descrição dos indicadores de Tempos em Carregamento e Horas Disponíveis da Expedição foram apresentadas e detalhadas no Capítulo 3 (item 3.3).

As Figuras 14 e 15 apresentam o comportamento desses indicadores no trimestre anterior à aplicação do mosaico de expedição, bem como sua avaliação no mês de aplicação do estudo (Setembro/14).

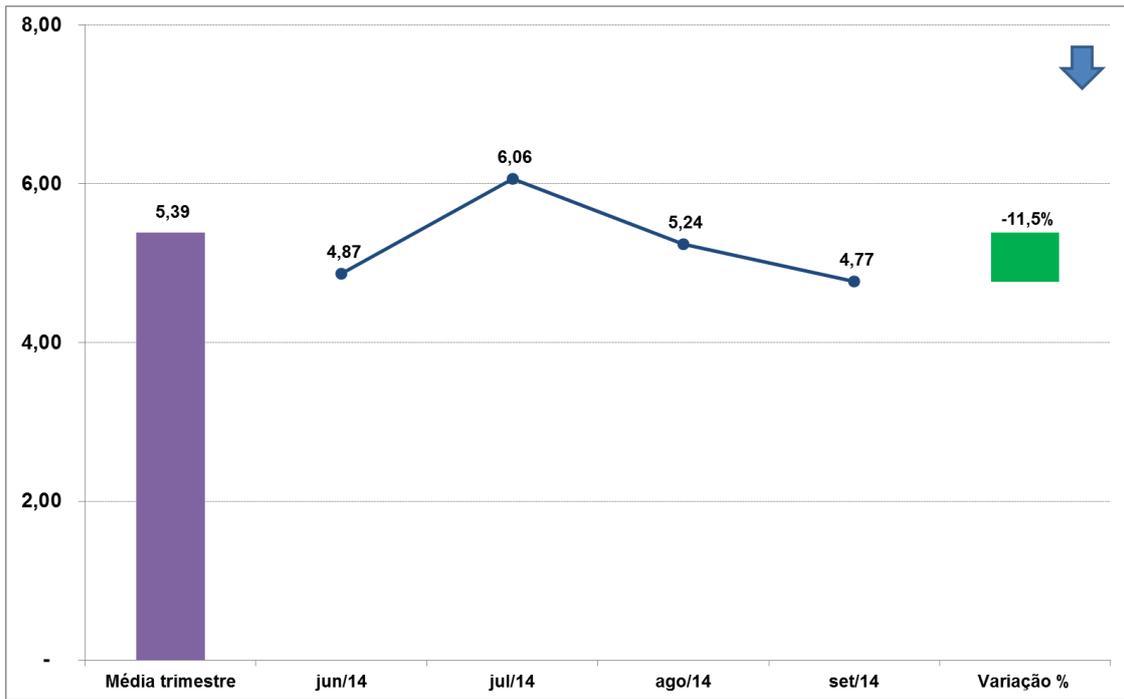


Figura 14 - Valores observados do indicador Tempo Médio de Carregamento da Expedição

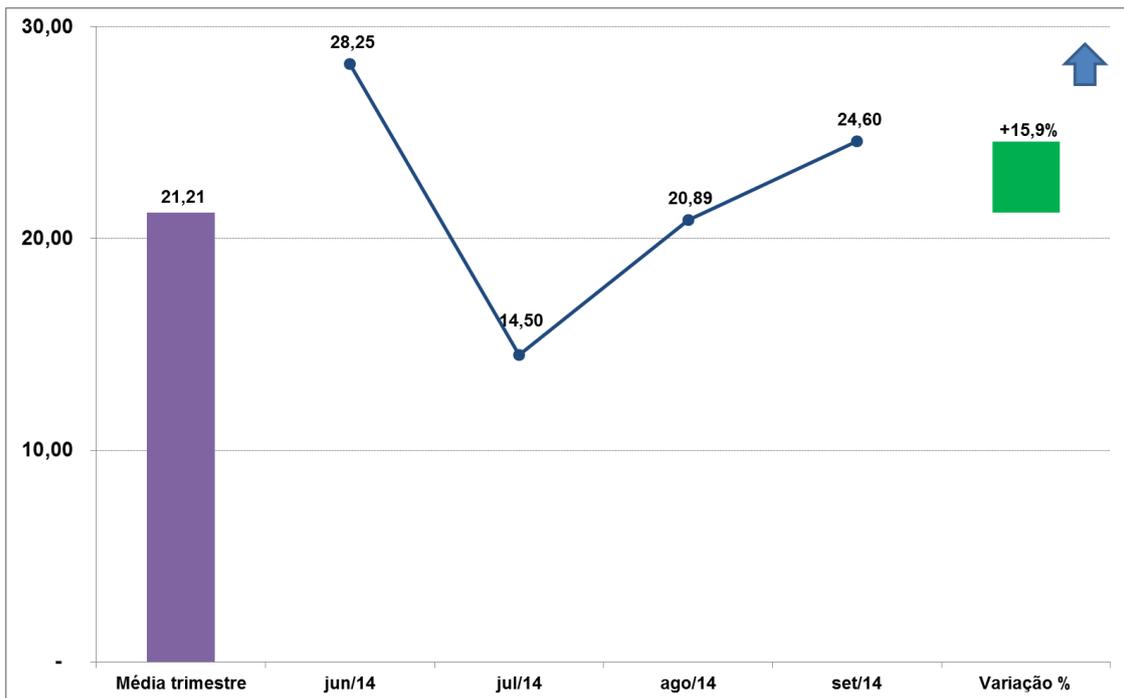


Figura 15 - Valores observados do indicador MTBF da Expedição

Pode-se verificar que no mês de Setembro/14, mês em que o estudo foi aplicado, houve uma redução de 11,5% no valor do TMC e aumento de 15,9% no valor do MTBF em comparação com a média dos valores apurados do trimestre anterior à aplicação do estudo.

Apesar de não apresentar o menor valor histórico da série do MTBF da expedição, pode-se perceber que ocorreu a melhoria nos indicadores apontados pelo grupo focado como relevantes para o sistema de expedição. Este fato indica que a aplicação da metodologia trouxe resultados positivos para o sistema avaliado.

A fim de quantificar os ganhos, pode-se analisar o principal indicador de interesse para apuração dos resultados da expedição, o Volume de Minério Expedido. Este indicador é medido em toneladas e apura todo o volume de minério de todos os tipos (Pellet Feed, Sinter Feed e Lump Ore) carregados a partir do sistema de expedição em Carajás. A consolidação do Volume de Minério Expedido também é realizada mensalmente, e para realizar a comparação em uma base comum, o valor apurado foi normalizado pela quantidade de dias do mês. Para o mês em estudo (Setembro/14), os dados foram consolidados até 28/09/14. No período de 29/09/14 a 30/09/14 houve um evento atípico de interdição total da ferrovia Carajás por movimentos populares. Devido a este fato, todos os dados de indicadores destas datas foram excluídos do presente estudo.

O gráfico na Figura 16 apresenta o desempenho no trimestre anterior à aplicação do mosaico e sua avaliação no mês em estudo.

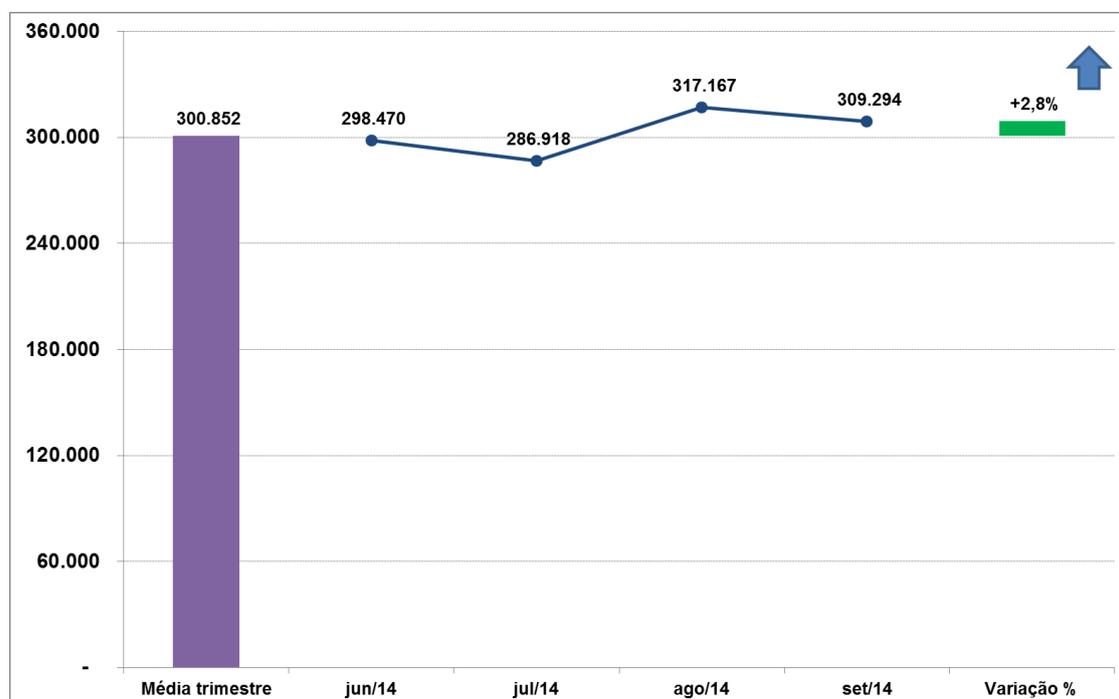


Figura 16 – Volumes de Minério Expedido em toneladas/dia

A Figura 16 permite observar que, no mês de aplicação da metodologia e mosaico da expedição, houve um incremento de 2,8% no Volume de Minério Expedido se comparado ao desempenho médio do trimestre anterior.

Porém, além da captura de janelas de ociosidade para manutenção, existem outros indicadores, como, por exemplo, Simultaneidade e Produtividade da Expedição, que também afetam o incremento do Volume de Minério Expedido e que não estão relacionados aos ganhos apontados pelo mosaico. Desta forma, optou-se a partir da heurística, conhecimento do pesquisador sobre o tema e estimativas de ganho de trabalhos associados à confiabilidade (SELLITTO, 2005), atribuir uma parcela do ganho aos indicadores influenciados pelo mosaico (TMC e MTBF Expedição), estimando 5% deste incremento a estes indicadores.

Esta parcela corresponde a 422 toneladas/dia, e a partir da estimativa do preço do minério de ferro mostrada na Figura 17 em 82,27 US\$/tonelada (www.indexmundi.com - data 21/10/2014), pode-se aferir um ganho de faturamento mensal de US\$ 1,04 milhões. Para a projeção de ganho anual, foi utilizada a projeção de preço de minério em 70,00 US\$/tonelada (www.indexmundi.com - data 21/10/2014) totalizando US\$ 10,7 milhões em um ano de sua aplicação. Esta estimativa de ganho tem como premissa a manutenção de todas as condições, recursos, estrutura operacional, preços e demandas por minério de ferro à qual o estudo foi aplicado.

Importante observar que esse ganho foi obtido logo no primeiro mês de uso do Mosaico, quando a equipe ainda estava familiarizando-se com a nova sistemática. Esses ganhos são consequência da maior clareza e qualidade das informações disponibilizadas pelo uso do mosaico, que qualificam as decisões referentes às atividades de manutenção. Ganhos maiores podem ser esperados nos meses subsequentes, quando a equipe reunir maior experiência no uso do sistema.

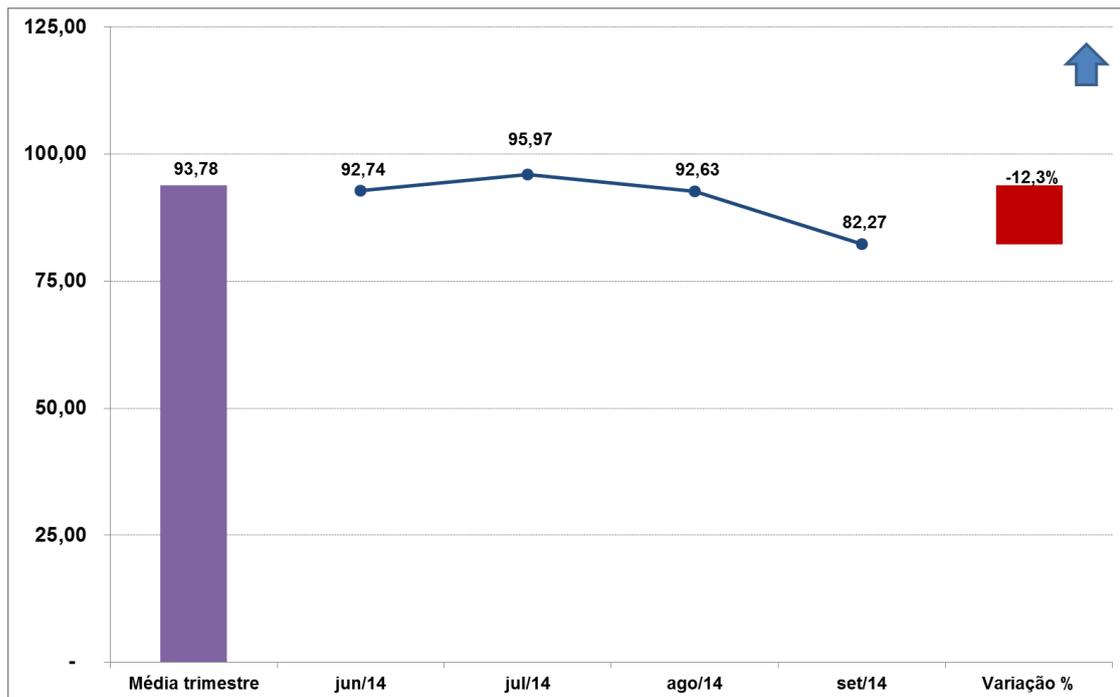


Figura 17 – Preço Médio Minério de Ferro Mercado Externo

Finalmente, pode-se indicar que o principal objetivo do estudo, de desenvolver uma sistemática para o aproveitamento das oportunidades de manutenção, visando reduzir o impacto das paradas de manutenção e consequente aumento do volume de minério expedido, foi alcançado com sucesso, pois, conforme indicado pelo aumento no Volume de Minério Expedido, o *trade-off* da aplicação do mosaico de expedição foi positivo, havendo um aumento de receita para a empresa pela venda deste minério, sem aumento da estrutura de manutenção e custos envolvidos. Os recursos e estruturas necessários para esta aplicação já se encontravam mobilizados nos gastos do processo de expedição.

CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES

7.1 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho envolveu o desenvolvimento, aplicação e discussão de uma sistemática para o aproveitamento das oportunidades de manutenção no processo de expedição de minério em Carajás. Essa sistemática foi desenvolvida com o intuito de reduzir o impacto das paradas de manutenção e consequente permitir o aumento do volume de minério expedido.

Os resultados iniciais obtidos com a aplicação da sistemática desenvolvida indicaram um incremento de 422 toneladas/dia no Volume de Minério Expedido na mina de Carajás no Pará, usando como base de comparação o desempenho médio do trimestre imediatamente anterior à sua aplicação. A partir desta estimativa, e considerando que todas as condições, recursos, estrutura operacional, preços e demanda por minério de ferro à qual o estudo foi aplicado sejam mantidas, pode-se aferir um ganho de faturamento mensal de US\$ 1,04 milhões, totalizando US\$ 10,7 milhões em um ano.

Os seguintes aspectos podem ainda ser ressaltados numa retrospectiva do trabalho elaborado. Foi elaborado um modelo heurístico para prever as janelas de oportunidade, de forma a capturá-las para atividades de manutenção. Este modelo foi baseado em conhecimentos prévios do pesquisador sobre o problema e lógica de operação do sistema em estudo, dando origem a um aplicativo que foi nomeado Mosaico de Simulação da Expedição.

O Mosaico de Simulação da Expedição tem como entradas os horários de chegada dos trens ao terminal de carregamento, o tempo de carregamento, tempo de manobra além das paradas preventivas programadas previstas para o período. A principal saída deste simulador é um relatório indicando o início e fim de cada janela de oportunidade estratificado por linha de carregamento disponível, silos e a quantidade de horas totais de oportunidade no período que poderiam ser capturadas para manutenção.

Os testes do Mosaico de Simulação da Expedição foram realizados a partir de dados históricos do sistema de expedição e mostraram que a diferença entre o tempo real de ociosidades ocorridas no período histórico e o tempo simulado de ociosidades para o mesmo período foi de aproximadamente 10% a favor da segurança (tempo previsto pelo Mosaico menor que o tempo real disponível para atividades de manutenção). Esta diferença foi

considerada aceitável, e confirmou a utilidade do Mosaico como suporte ao planejamento das atividades de manutenção.

Apoiado no modelo desenvolvido, foram estabelecidas novas diretrizes e procedimentos de manutenção, buscando otimizar o aproveitamento das oportunidades e, conseqüentemente, melhorar o desempenho do sistema em estudo. Para tal, foi elaborado um grupo focado com estrutura planejada para: (i) permitir o entendimento das discussões técnicas envolvidas na definição do modelo aplicado ao mosaico, (ii) discutir a aplicabilidade do mosaico e (iii) definir os recursos para viabilizar o alcance de resultados indicados pelo modelo.

O grupo foi composto por participantes com poder de decisão referente a disponibilização de recursos para aplicação do modelo e participantes com experiência técnica para as discussões do Mosaico. O moderador do grupo foi o próprio pesquisador. Houve consenso no grupo focado de que o mosaico de expedição era um modelo suficientemente simples e eficaz para ser utilizado como ferramenta para melhoria do aproveitamento das janelas de ociosidade para manutenção.

O grupo focado realizou também a avaliação da estrutura de manutenção necessária para suportar as diretrizes e procedimentos de manutenção estabelecidos. Foi entendido pelo grupo que a equipe de manutenção disponível atualmente, que conta com profissionais de todas as especialidades (mecânica, elétrica, hidráulica, etc) em turnos ininterruptos, além de recursos auxiliares (caminhão guindauto e ferramentaria) possibilitava o aproveitamento para intervenção de manutenção das janelas de ociosidade em qualquer momento em que esta fosse sinalizada. É importante ressaltar que a utilização da força de trabalho disponível, mensurada em Hh apenas é distribuída de forma mais otimizada pela utilização do mosaico, atuando nos trabalhos mapeados para as ociosidades. Nos momentos em que não existem ociosidades mapeadas as equipes continuam suas atividades nas outras áreas de atuação da planta de beneficiamento e em atividades de preparação para atuação nas ociosidades.

A abordagem proposta (constituída do mosaico de expedição e procedimentos para aproveitamento das oportunidades) foi aplicada ao caso real da expedição de Carajás. Para aplicação do mosaico da expedição, foi necessária a integração do mosaico às rotinas operacionais da área, de forma que o estudo não interferisse negativamente nos resultados, por ser observado como uma carga extra de trabalho. No período de observação, o mosaico indicou a ocorrência de 262 horas e 10 minutos de oportunidades a serem capturadas no sistema de expedição. Deste total, foi possível utilizar 198 horas com a realização de 61

atividades a partir das informações geradas pela metodologia proposta pelo mosaico, utilizando um total de 827 Hh. Este montante corresponde a 76% das horas indicadas pelo mosaico.

Os resultados da aplicação do mosaico indicam que a metodologia para capturar ociosidades na expedição e realizar atividades de manutenção obteve sucesso em seu objetivo, que era estabelecer o direcionamento para execução de atividades priorizadas nos momentos apontados pelo mosaico.

O Tempo Médio em Carregamento (TMC) e o MTBF do sistema de expedição foram apontados pelo grupo focado como os principais indicadores influenciados pela aplicação da metodologia. Foi verificado que, no mês de aplicação do estudo, houve uma redução de 11,5% no valor do TMC e aumento de 15,9% no valor do MTBF em comparação com a média dos valores apurados do trimestre anterior à aplicação do estudo.

A aplicação do mosaico de expedição gerou retorno positivo, pois houve um aumento de receita para a empresa pela venda do minério expedido a mais, sem aumento da estrutura de manutenção e custos envolvidos, uma vez que os recursos e estruturas necessários para esta aplicação já se encontravam mobilizados nos gastos do processo de expedição. Finalmente, vale observar que retornos maiores podem ser esperados nos meses subsequentes, quando a equipe reunir maior experiência no uso do sistema. Esses ganhos são consequência da maior clareza e qualidade das informações disponibilizadas pelo uso do mosaico, que qualificam as decisões referentes às atividades de manutenção.

7.2 – PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento deste trabalho, diversos tópicos referentes ao processo de confiabilidade e modelagem de sistemas de expedição puderam ser levantados e estudados. Alguns deles conduziram a análises que foram incluídas no corpo deste trabalho, outros, no entanto, demandariam estudos adicionais não foram avaliados por questões de tempo. Estes pontos levantados são apresentados a seguir e constituem sugestões para trabalhos futuros.

A primeira proposta é referente à extensão do modelo aplicado a projetos de expansão dos terminais de carregamento. Conforme discutido no Capítulo 2 (item 2.1), e segundo a Teoria das Restrições (GOLDRATT, 2003), um dos passos para eliminação de uma restrição

interna é a ampliação de capacidade do sistema quando há evidências que a demanda do mercado é maior do que a capacidade do sistema. Desta forma o estudo de ampliação do mosaico de expedição com a inclusão de novos equipamentos é uma linha de trabalho que pode ser explorada para maximizar os ganhos destes projetos de expansão. Atualmente, o terminal de Carajás possui um projeto de expansão, que inclui a montagem de novas linhas de alimentação, novas linhas de saída e um novo silo de carregamento.

Outra proposta relevante que merece investigação é a possibilidade de replicação do modelo para outros sistemas de expedição de produtos minerais à granel, que possam incluir modais e equipamentos diferentes dos avaliados neste trabalho. Existem na região do sul do Pará operações de extração mineral de Cobre (Mina do Sossego), Manganês (Mina do Azul) e Ferro (Serra Leste) que operam o sistema de expedição via pás carregadeiras e transporte via caminhões. Adaptar o mosaico de simulação da expedição para esses sistemas pode melhorar a eficiência operacional e trazer ganhos financeiros para o grupo.

BIBLIOGRAFIA

Adeyeri M.K., Kareem B., Ayodeji S.P., Emovon I.; “Dynamic Maintenance Strategy, the Panacea to Materials Wastage from Machinery”; Proceedings of the World Congress on Engineering, London, UK, 2011.

Amstel M.J., Amstel W.; “Economic Trade-offs in Physical Distribution - A Pragmatic Approach” *Int. Journal of Physical Dist. & Materials Management* 17 (7); pp 15-54, 1985.

Arenales M., Armentano V., Morabito R., Yanasse H.; “Pesquisa Operacional”, Rio de Janeiro; Campus-Elsevier, 2007.

Ben-Daya M.; “You May Need RCM to Enhance TPM Implementation”. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 6 (2); pp 82-85, 2000.

Cassady C.R., Pohl E.A., Murdock W.P.; “Selective Maintenance Modeling for Industrial Systems”; *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 7 (2); pp 104-117, 2001.

Bertrand J.W.M., Fransoo J.C.; “Operations management research methodologies using quantitative modeling”, *International Journal of Operations & Production Management* 22 (3); pp 241-264, 2002.

Cavalcante C.A.V., Costa A.P.C.S.; “Multicriteria Model of Preventive Maintenance” *Brazilian Journal of Operations & Production Management* 3 (1); pp 71-86, 2006.

Cheng C., Meng M., Zuo M.J.; “Selective maintenance optimization for multi-state system” *Proceedings of IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering* (3), pp 1477-1482, 1999.

Christer A.H., Whitelaw J.; “An operational research approach to breakdown maintenance: problem recognition” *Journal of the Operational Research Society* 34; pp 1041-1052, 1983.

Christer A.H., Wang W., Baker R.D., Sharp J.M.; “A delay-time-based maintenance model of multi-component system” *IMA Journal of Management Mathematics* 6; pp 67-83, 1995.

Christier A.H., Wang W., Sharp J.M., Baker R.D.; “The delay-time modeling of preventive maintenance of plant given limited PM data and selective repair at PM.” *Journal of Operational Research Society* 49; pp 210-219, 1998.

- Dekker R.; "Applications of Maintenance Optimization Models: A Review and Analysis" *Reliability Engineering and System Safety* 51(3); pp 229-240, 1996.
- Eisinger S., Rakowsky U.K.; "Modeling of uncertainties in reliability centered maintenance - a probabilistic approach" *Reliability Engineering and System Safety* 71; pp 159-164, 2001.
- Fávero L.P., Belfiore P., Silva F.L., Chan B.L.; "Análise de Dados – Modelagem Multivariada para Tomada de Decisões", Rio de Janeiro; Campus-Elsevier, 2009.
- Figueiredo K.F., Pereira L.; "Os serviços oferecidos pelas ferrovias brasileiras no transporte de cargas"; *Revista Tecnológica* 91, 2003.
- Fleury P.F.; "Gestão estratégica do transporte"; *Revista Tecnológica* 82, 2002.
- Fogliatto F.S., Ribeiro J.L.D.; "Confiabilidade e Manutenção Industrial", Rio de Janeiro; Campus-Elsevier, 2009.
- Fogliatto F.S.; "Estratégias para modelagem de dados multivariados na presença de correlação" *Gestão & Produção* 7 (1), pp 17-28, 2000.
- Goldratt E.M., Cox J.; "A Meta", Barueri; Nobel, 2003.
- Goldstein A.; "Brazilian privatization in international perspective: the rocky path from state capitalism to regulatory capitalism" *Industrial and Corporate Change* 8 (4); pp 673-711, 1999.
- Gudehus T., Kotzab H.; "Planning and scheduling production systems from a logistics perspective" *Logist. Res.* 1 (3-4); pp 163-172, 2009.
- Haywood-Farmer J., "A Conceptual Model of Service Quality" *Int. Journal of Production and Operations Management* 8 (6); pp 19-29, 1988.
- Kelly A.; "Maintenance documentation and computers." *Maintenance Management International* 4; pp 251-267, 1984.
- Lai M., Chen Y.; "Optimal Periodic Replacement Policy for a Two-Unit System with Failure Rate Interaction" *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 29 (3); pp 367-371, 2006.

Lapa C.M.F., Pereira C.M.N.A., Barros M.P. de; “A model for preventive maintenance planning by genetic algorithms based in cost and reliability”; *Reliability Engineering and System Safety* 91; pp 233-240, 2006.

Li L., Ni J.; “Reliability Estimation Based On Operational Data of Manufacturing Systems” *Quality and Reliability Engineering International* 24; pp 843-854, 2008.

Liu Y., Huang H-Z.; “Optimal selective maintenance strategy for multi-state systems under imperfect maintenance” *IEEE Transactions on Reliability* 59 (2); pp 356-367, 2010.

Lu W.Y., Wang W., Christier A.H.; “The delay time modelling of preventive maintenance of plant based on subjective PM data and actual failure records” *Proceedings of the 4th International Conference on Quality Reliability, Beijing, China, 2005.*

Lu W.Y., Zheng R.; “The delay-time-based inspection models and their comparison” *Journal of Management Sciences* 20 (1); pp 18-21, 2007.

Jones B., Jenkinson I., Wang J.; “Methodology of using delay-time analysis for a manufacturing industry” *Reliability Engineering and System Safety* 94; pp 111-124, 2009.

Kumar, U., Knezevic, J., e Crocker, J. “Maintenance free operating period - an alternative measure to MTBF and failure rate for specifying reliability?” *Reliability Engineering and System Safety* 64, pp 127–131, 1999.

Mann L., Saxena A., Knapp G.; “Statistical-based or condition-based preventive maintenance?” *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 1; pp 46-59, 1995.

Márquez A.C., de León P.M., Fernández J.F.G., Márquez C.P., Campos M.L.; “The maintenance management framework: a practical view to maintenance management” *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 15 (2); pp 167-178, 2009.

Marques V.; “Utilizando o Transportation Management System para uma gestão eficaz de transportes”; *Revista Tecnologica* 77, 2002.

Martorell S., Sanchez A., Serradell V.; “Age-dependent reliability model considering effects of maintenance and working conditions” *Reliability Engineering and System Safety* 64; pp 19-31, 1999.

Matthies K.; “Slower Price Rises in Commodity”; *MarketsIntereconomics* 42 (2); pp. 109-112, 2007.

Miguel P.A.C., Fleury A., Mello C.H.P, Nakano D.N., Turrioni J.B., Ho L.L., Morabito R., Martins R.A., Pureza V.; “Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações”, Rio de Janeiro; Campus - Elsevier, 2010.

Minério de ferro Preço Mensal - Dólares americanos por tonelada métrica seca; <http://www.indexmundi.com/pt/pre%20os-de-mercado/?mercadoria=min%20rio-de-ferro>; Consulta realizada em (21/10/2014)

Nascif J., Dorigo L.C.; “Manutenção Orientada para Resultados”, Rio de Janeiro; Qualymark, 2010.

Niu G., Yang B.S., Pecht M., “Development of an optimized condition-based maintenance system by data fusion and reliability-centered maintenance”; *Reliability Engineering and System Safety* 95; pp 786-796, 2010.

Pérès F., Noyes D.; “Evaluation of a maintenance strategy by the analysis of the rate of repair” *Quality and Reliability Engineering International* 19; pp 129-148, 2003.

Pintelon L.M., Gelders L.F.; “Maintenance management decision making”; *European Journal of Operational Research* 58; pp 301-317, 1992.

Rebouças L.; “A Revanche dos Dinossauros”; *Exame* 707, pp 93-102, 2000.

Ribeiro J.L.D.; “Grupos Focados: Teorias e Aplicações”, Porto Alegre; FEENG/UFRGS, PPGEF, UFRGS, 2003.

Rice W.F., Cassady C.R., Nachlas J.A.; “Optimal maintenance plans under limited maintenance time”. *Proceedings of Seventh Industrial Engineering Research Conference, Banff, Canada, 1998.*

Saranga H.; “Relevant condition-parameter strategy for an effective condition-based maintenance” *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 8 (1); pp 92-105, 2002.

Savelsbergh M.W.P., Goetschalckx; “A comparison of the efficiency of fixed versus variable vehicle routes”; *Journal of Business Logistics* 16 (1), 1995.

Sellitto M.A.; “Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos” *Revista Produção* 15 (1), pp 44-59, 2005.

Serger J.K.; “Reliability investment and life-cycle cost” *IEEE Transactions on Reliability* 32 (3); pp 259-263, 1983.

Souza A.M., Ethur A.B.M., Lopes L.F.D., Zanini R.R.; “Introdução a Projetos de Experimentos - Caderno Didático”, Santa Maria : Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Departamento de Estatística, 2002.

Shankar G., Sahani V.; “Reliability analysis of a maintenance network with repair and preventive maintenance” *International Journal of Quality & Reliability Management* 20 (2); pp 268-280, 2003.

Taha H.A.; “Pesquisa Operacional”, São Paulo; Pearson-Prentice Hall, 2008.

Thomas L.C., Gaver D.P., Jacobs P.A., “Inspection models and their application” *IMA Journal of Management Mathematics* 3 (4); pp 283-303, 1991.

Todinov, M.T. ; “Minimum failure-free operating intervals associated with random failures of non-repairable components”; *Computers & Industrial Engineering* 45, pp 475-491, 2003

Vanneste S.G.; “A Markov model for opportunity maintenance”. Catholic University of Brabant, Tilburg, 1991.

Wang H. Z.; “A survey of maintenance policies of deteriorating systems” *European Journal of Operational Research* 139 (3); pp 469-489, 2002.

Wang W.; “An overview of the recent advances in delay-time-based maintenance modeling”; *Reliability Engineering and System Safety*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2012.04.004>, 2012.

Wanke P., Fleury P.F., Figueiredo K.F., “Logística e Gerenciamento da Cadeias de Suprimentos”. São Paulo: Atlas, 2003.

Worm J.M. & Van Harten A.; “Model based decision support for planning of road maintenance”; *Reliability Engineering and System Safety* 51(3); pp 305-316, 1996.

Wu S., Zuo M.J.; “Linear and nonlinear preventive maintenance models” *IEEE Transactions on Reliability* 59 (1); pp 242-249, 2010.

Zhang T., Nakamura M.; “Reliability-based optimal maintenance scheduling by considering maintenance effect to reduce cost.” *Quality and Reliability Engineering International* 21; pp 203-220, 2005.

Zhao Y.X.; “On preventive maintenance policy of a critical reliability level for system subject to degradation” *Reliability Engineering and System Safety* 79; pp 301-308, 2003.

Zhu H., Liu F., Shao X., Liu Q., Deng Y.; “A Cost-based Selective Maintenance Decision-making Method for Machining Line” *Quality and Reliability Engineering International*, Published Online, 2010.

ANEXOS

A.1 – CÓDIGO FONTE MOSAICO EXPEDIÇÃO

```
Sub Manutencao()  
  
Dim Dia, MTBF, MTTR, EqPrev(4), IniPrev(4), FimPrev(4) As Variant  
Dim Liberado As Variant  
Dim Parada(3, 15) As Variant  
Dim Horas(15), TempoCarr, Manobra, HorasFim(15) As Variant  
  
'-----Limpeza dos Valores-----  
Sheets("Mosaico").Select  
Range("D8", "N19").ClearContents  
Range("O8", "DF8").ClearContents  
Range("O10", "DF10").ClearContents  
Range("O12", "DF12").ClearContents  
Range("O14", "DF14").ClearContents  
Range("O16", "DF16").ClearContents  
Range("O18", "DF18").ClearContents  
Range("O4").Select  
Dia = ActiveCell.Value  
'-----Atribuição das Preventivas-----  
Range("O30").Select  
For i = 0 To 3  
    EqPrev(i) = ActiveCell.Offset(i, 0).Value  
    IniPrev(i) = Dia + ActiveCell.Offset(i, 1).Value  
    FimPrev(i) = Dia + ActiveCell.Offset(i, 5).Value  
Next i  
For j = 0 To 3  
Select Case EqPrev(j)  
    Case Is = "Silo 1"  
        Range("E9").Select  
        If ActiveCell.Value = "" Then  
            EqPrev(j) = 1  
            ActiveCell.Value = IniPrev(j)  
            ActiveCell.Offset(0, 1).Value = FimPrev(j)  
        End If  
    Case Is = "Silo 2"  
        Range("E13").Select  
        If ActiveCell.Value = "" Then  
            EqPrev(j) = 2  
            ActiveCell.Value = IniPrev(j)  
            ActiveCell.Offset(0, 1).Value = FimPrev(j)  
        End If  
    Case Is = "Silo 3"  
        Range("E17").Select  
        If ActiveCell.Value = "" Then  
            EqPrev(j) = 3  
            ActiveCell.Value = IniPrev(j)  
            ActiveCell.Offset(0, 1).Value = FimPrev(j)  
        End If  
    End Select  
Next j  
'-----Atribuição das Corretivas-----  
Range("O37").Select  
MTBF = ActiveCell.Value  
MTTR = ActiveCell.Offset(0, 1).Value  
Range("E9").Select
```

```

For k = 0 To 2
    If ActiveCell.Offset(4 * k, 0).Value <> "" Then
        ActiveCell.Offset(4 * k, 2).Value = ActiveCell.Offset(4 * k,
1).Value + MTBF
        ActiveCell.Offset(4 * k, 3).Value = ActiveCell.Offset(4 * k,
2).Value + MTTR
    Else
        ActiveCell.Offset(4 * k, 0).Value = Dia + k * MTBF
        ActiveCell.Offset(4 * k, 1).Value = Dia + k * MTBF + MTTR
    End If
Next k
'-----Coleta dados de chegada-----
Range("AG30").Select
For i = 0 To 10
    If ActiveCell.Offset(i, 0).Value <> "" Then
        Horas(i) = ActiveCell.Offset(i, 0).Value + ActiveCell.Offset(i,
1).Value
        p = p + 1
    End If
Next i
Range("E9").Select
For m = 0 To 9
    If ActiveCell.Offset(0, m).Value <> "" Then
        Parada(1, m) = ActiveCell.Offset(0, m).Value
    End If
    If ActiveCell.Offset(4, m).Value <> "" Then
        Parada(2, m) = ActiveCell.Offset(4, m).Value
    End If
    If ActiveCell.Offset(8, m).Value <> "" Then
        Parada(3, m) = ActiveCell.Offset(8, m).Value
    End If
Next m
Range("D9").Value = Parada(1, 1)
Range("D13").Value = Parada(2, 1)
Range("D17").Value = Parada(3, 1)
Range("AW30").Select
TempoCarr = ActiveCell.Value
Manobra = ActiveCell.Offset(1, 0).Value
'-----Posicionamento dos trens-----
For j = 0 To p - 1
Silo3: Range("E19").Offset(0, 2 * s3).Select
    If ActiveCell.Value = "" And Horas(j) > Range("D19").Value Then
        HorasFim(j) = Carrega(Horas(j), Parada, EqPrev, 3, TempoCarr,
Manobra)
        If HorasFim(j) <> 0 Then
            ActiveCell.Value = Horas(j)
            ActiveCell.Offset(0, 1).Value = HorasFim(j)
            Range("D19").Value = HorasFim(j)
            s3 = s3 + 1
        Else
            If Range("D19").Value < Range("D17").Value Then
                Range("D19").Value = Range("D17").Value
            End If
            GoTo Silo2
        End If
    Else
Silo2: Range("E15").Offset(0, 2 * s2).Select
        If ActiveCell.Value = "" And Horas(j) > Range("D15").Value Then
            HorasFim(j) = Carrega(Horas(j), Parada, EqPrev, 2, TempoCarr,
Manobra)
            If HorasFim(j) <> 0 Then

```

```

        ActiveCell.Value = Horas(j)
        ActiveCell.Offset(0, 1).Value = HorasFim(j)
        Range("D15").Value = HorasFim(j)
        s2 = s2 + 1
    Else
        If Range("D15").Value < Range("D13").Value Then
            Range("D15").Value = Range("D13").Value
        End If
        GoTo Silo1
    End If
Else
    Silo1: Range("E11").Offset(0, 2 * s1).Select
        If ActiveCell.Value = "" And Horas(j) > Range("D11").Value Then
            HorasFim(j) = Carrega(Horas(j), Parada, EqPrev, 1,
TempoCarr, Manobra)
            If HorasFim(j) <> 0 Then
                ActiveCell.Value = Horas(j)
                ActiveCell.Offset(0, 1).Value = HorasFim(j)
                Range("D11").Value = HorasFim(j)
                s1 = s1 + 1
            Else
                If Range("D11").Value < Range("D9").Value Then
                    Range("D11").Value = Range("D9").Value
                End If
                GoTo Manut
            End If
        Else
            Manut: Call Libera(Horas(j))
                Horas(j) = Min(Range("D19").Value, Min(Range("D15").Value,
Range("D11").Value)) + Manobra
                GoTo Silo3
            End If
        End If
    End If
Next j
'-----Preencher Painel-----
Call Preenche
'-----Gera Relatório-----
Call Relatorio
End Sub
Function Min(a, b)
If a > b Then
    Min = b
End If
If a <= b Then
    Min = a
End If
End Function
Function Max(a, b)
If a > b Then
    Max = a
End If
If a <= b Then
    Max = b
End If
End Function
Function Carrega(Ini, Par, Prev, Eq, Temp, Man)
Carrega = Ini + Temp + Man
For i = 0 To 3
    Select Case Prev(i)
        Case Eq

```

```

        IP = Par(Eq, 0)
        FP = Par(Eq, 1)
    End Select
Next i
If Ini > IP And Ini < FP Then
    Carrega = 0
Else
    If Carrega > IP And Carrega < FP Then
        Carrega = 0
    Else
        For k = 0 To 5
            If Par(Eq, 2 * k) > Ini And Par(Eq, 2 * k + 1) < Carrega Then
                Carrega = Carrega + Par(Eq, 2 * k + 1) - Par(Eq, 2 * k)
            End If
        Next k
    End If
End If
End Function
Sub Libera(Atual)
    Dim Tempo(5, 10)
    Range("D9").Select
    For i = 0 To 10
        For j = 0 To 5
            If ActiveCell.Offset(2 * j, i).Value <> "" Then
                Tempo(j, i) = ActiveCell.Offset(2 * j, i).Value
            End If
        Next j
    Next i
    For k = 0 To 2
        If Tempo(2 * k + 1, 0) > Tempo(2 * k, 0) Then
            For m = 1 To 5
                If Tempo(k, 2 * m) <> "" Then
                    If Tempo(k, 2 * m) > Atual Then
                        Tempo(k, 0) = Tempo(k, 2 * m)
                    End If
                End If
            Next m
        End If
    Next k
    For n = 0 To 2
        ActiveCell.Offset(4 * n + 2, 0).Value = Tempo(2 * n + 1, 0)
    Next n
End Sub
Sub Relatorio()
    Dim Hora(20, 1), Silo(20) As Variant
    Sheets("Mosaico").Select
    Range("E9").Select
    For i = 0 To 5
        For j = 0 To 4
            If ActiveCell.Offset(2 * i, 2 * j).Value <> "" Then
                Select Case i
                    Case 0 To 1
                        Hora(a, 0) = ActiveCell.Offset(2 * i, 2 * j).Value
                        Hora(a, 1) = ActiveCell.Offset(2 * i, 2 * j + 1).Value
                        Silo(a) = 1
                        a = a + 1
                    Case 2 To 3
                        Hora(a, 0) = ActiveCell.Offset(2 * i, 2 * j).Value
                        Hora(a, 1) = ActiveCell.Offset(2 * i, 2 * j + 1).Value
                        Silo(a) = 2
                        a = a + 1
                End Select
            End If
        Next j
    Next i
End Sub

```

```

                Case 4 To 5
                    Hora(a, 0) = ActiveCell.Offset(2 * i, 2 * j).Value
                    Hora(a, 1) = ActiveCell.Offset(2 * i, 2 * j + 1).Value
                    Silo(a) = 3
                    a = a + 1
                End Select
            End If
        Next j
    Next i
    c = 0
    Sheets("Relatório").Select
    Range("B4", "G12").ClearContents
    Padrão = Range("K3").Value
    For Each k In Silo
        c = c + 1
        Select Case c
            Case 21
                GoTo FIM
            Case Else
                If k = Silo(c) Then
                    Tempo = Hora(c, 0) - Hora(c - 1, 1)
                    If Tempo > Padrão Then
                        Range("B4").Offset(d, 0).Value = "De"
                        Range("B4").Offset(d, 1).Value = Hora(c - 1, 1)
                        Range("B4").Offset(d, 2).Value = "hs às"
                        Range("B4").Offset(d, 3).Value = Hora(c, 0)
                        Range("B4").Offset(d, 4).Value = "hs, no silo"
                        Range("B4").Offset(d, 5).Value = k
                        d = d + 1
                    End If
                End If
            End Select
        Next
    FIM:
    End Sub
    Sub Preenche()
        r = 0
        For n = 0 To 5
            Range("O8").Offset(2 * n, 0).Select
            If ActiveCell.Offset(1, -9).Value < Range("O4").Value Then
                ActiveCell.Value = 2
                Pass = 4
            Else
                ActiveCell.Value = 0
                Pass = 2
            End If
        Next n
        m = 0
        While ActiveCell.Offset(1, m) <> ""
            Select Case ActiveCell.Offset(1, m)
                Case Is < ActiveCell.Offset(1, m + 1)
                    ActiveCell.Offset(0, m + 1) = ActiveCell.Offset(0, m)
                    ActiveCell.Offset(0, m + 2) = ActiveCell.Offset(0, m)
                Case Is > ActiveCell.Offset(1, m + 1)
                    ActiveCell.Offset(0, m + 1) = Pass
                    ActiveCell.Offset(0, m + 2) = Pass
                    Pass = Pass + 2
                Case Else
                    ActiveCell.Offset(0, m + 1) = ActiveCell.Offset(0, m)
                    ActiveCell.Offset(0, m + 2) = ActiveCell.Offset(0, m)
            End Select
            m = m + 1
        End While
    End Sub

```

```
    Range("C25").Value = r / ((96 * 6) - 1)
    r = r + 1
Wend
Pass = 0
Next n
End Sub
```

A.2 – APRESENTAÇÃO DA REUNIÃO COM GRUPO FOCADO



Nossa Missão

Transformar recursos naturais em prosperidade e desenvolvimento sustentável



Nossa Visão

Ser a empresa de recursos naturais global número um em criação de valor de longo prazo, com excelência, paixão pelas pessoas e pelo planeta

Nossos Valores

- 1 A vida em primeiro lugar
- 2 Valorizar quem faz a nossa empresa
- 3 Cuidar do nosso planeta
- 4 Agir de forma correta
- 5 Crescer e evoluir juntos
- 6 Fazer acontecer

Regras de Ouro

Compromisso de Ferrosos com a vida . Porque a regra nº 1 é viver.

1. Analisar os riscos das atividades e cumprir as medidas de prevenção e proteção adequadas
2. Usar corretamente os EPI's obrigatórios para as atividades
3. Fazer, testar e não violar bloqueios de máquinas e equipamentos
4. Não realizar nenhuma atividade sem estar habilitado e autorizado
5. Não trabalhar sob efeito de álcool e drogas
6. Não trabalhar em altura sem cinto de segurança apropriado
7. Não usar ferramentas, máquinas e equipamentos improvisados
8. Não transitar embaixo de carga suspensa
9. Não conduzir veículos e equipamentos acima da velocidade limite



Política de Gestão de Ferrosos Norte



Compromisso da liderança

Comprometimento	É do líder a total responsabilidade pelos subordinados
Disciplina operacional	O líder deve garantir o cumprimento das Regras de Ouro, procedimentos e Política de Gestão da Diretoria.
ProAtividade	O líder deve garantir o respeito à vida, melhoria nas condições de trabalho, clima organizacional, etc.
Controle	Líder deve ser presente e vigilante na área.
Gestão por Consequência	O líder deve aplicar prêmios ou penalidades para as boas e más ocorrências, respectivamente.



Compromissos Grupo Focado

Objetivo Grupo Focado

- Explorar a validação do modelo de previsão de ofertas para expedição e aplicação para obter os resultados de melhoria do processo

Compromissos Grupo Focado

- Confidencialidade
- Imparcialidade
- Participação
- Contribuição



Questões Iniciais

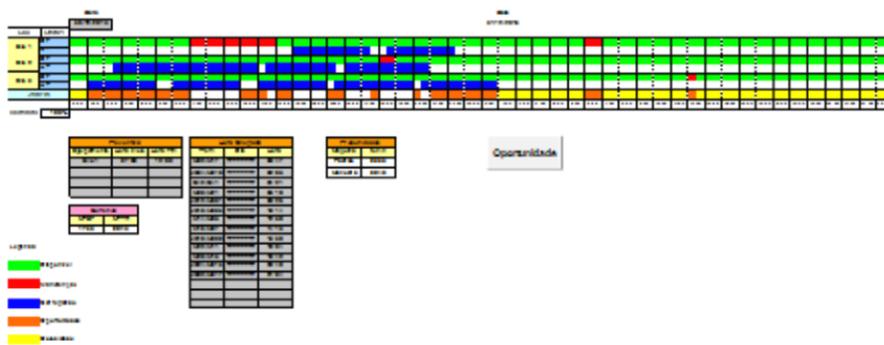
Compromissos Grupo Focado

- Existe ociosidade na expedição suficiente para a atuação de manutenção?
- É possível mapear as oportunidades de forma antecipada?



Mosaico da Expedição

Interface Mosaico Expedição



Descritivo funcionamento



12



Resultados obtidos – Simulação x Realizado – Dez/13

Data	Executado	Simulado	Diferença
02/12/2013	20:42:00	23:16:00	2:34:00
03/12/2013	22:29:00	26:23:00	6:04:00
04/12/2013	25:21:00	20:17:00	5:04:00
05/12/2013	16:00:00	10:26:00	5:34:00
06/12/2013	2:39:00	0:00:00	2:39:00
07/12/2013	15:46:00	17:05:00	1:17:00
08/12/2013	16:19:00	22:31:00	6:12:00
09/12/2013	11:04:00	15:33:00	4:29:00
10/12/2013	29:35:00	25:06:00	4:27:00
11/12/2013	4:27:00	6:31:00	2:05:00
12/12/2013	15:37:00	17:09:00	1:32:00
13/12/2013	15:09:00	9:30:00	5:39:00
14/12/2013	15:16:00	8:09:00	7:15:00
15/12/2013	29:30:00	22:41:00	6:49:00
16/12/2013	16:20:00	15:13:00	1:07:00
17/12/2013	12:16:00	12:19:00	0:00:00
18/12/2013	5:32:00	2:21:00	3:10:00
19/12/2013	29:16:00	22:41:00	6:35:00
20/12/2013	5:27:00	3:23:00	2:03:00
21/12/2013	20:39:00	23:31:00	2:52:00
22/12/2013	1:55:00	4:27:00	2:34:00
23/12/2013	9:25:00	6:06:00	3:19:00
24/12/2013	17:55:00	17:17:00	0:38:00
25/12/2013	16:20:00	12:39:00	3:27:00
26/12/2013	26:39:00	23:36:00	3:03:00
27/12/2013	12:54:00	5:00:00	7:54:00
28/12/2013	6:52:00	5:48:00	1:04:00
29/12/2013	19:52:00	23:02:00	3:50:00
30/12/2013	15:36:00	13:02:00	2:34:00
Total	439:31:00	411:36:00	27:55:00

13





Questões Centrais

Roteiro de Perguntas

- O modelo de previsão está adequado com a experiência observada no dia-a-dia?
- Partindo da premissa de que a janela de oportunidade varia por dia, qual a janela mínima para atuação em manutenção?
- Quais os recursos e estrutura necessários para capturar esta janela?



Questões Finais

Roteiro de Perguntas

- Após a aplicação do modelo, podemos esperar melhoria nos resultados de disponibilidade e volume expedido?
- Algum outro ponto para acrescentar ao modelo, para que possamos atingir os resultados?

A.3 – ATIVIDADES EXECUTADAS NAS JANELAS DE OCIOSIDADE

Data	Equipamento	Atividade	Horas
02/09/2014	RP 152-01	Efetuada reparo em pino quebrado da caçamba 2	03:00
02/09/2014	TR 152-40	Retirado borda de correia que estava enrolada no eixo do tambor de desvio	02:00
02/09/2014	SI 152-03	Efetuada correção de vazamento na comporta de descarga 01 B	03:00
03/09/2014	TR 152-10	Efetuada reparo em viga de carro tensor do transportador - Lado Direito	02:00
03/09/2014	TR 152-10	Reposicionado rolos no cavalete do módulo 2 e trocado cavalete empenado no módulo 4	04:00
03/09/2014	TR 152-33	Substituído rolo de carga central no módulo 41	02:00
03/09/2014	TR 151-26	Reposicionado e reafixado base do cavalete de impacto módulo 4	02:00
03/09/2014	TR 151-26	Substituído rolo de carga central próximo à baliza 61	03:00
03/09/2014	ER 151-01	Realizado ajuste no tambor alinhador da correia. Reafixada talha que estava danificada - Lado Direito	04:00
03/09/2014	SI 152-36	Substituído pino e soldado trava na comporta 1 - Lado Esquerdo	06:00
04/09/2014	TR 151-26	Realizado corte de borda de correia danificada	02:00
05/09/2014	TR 152-40	Foi realizada a troca de cordoalhas danificadas do transportador	04:00
05/09/2014	RP 152-01	Realizado reaperto dos parafusos de fixação dos redutores de giro	06:00
08/09/2014	TR 151-26	Substituído rolo de carga central e rolo de retorno plano	06:00
08/09/2014	TR 152-30	Substituído válvula do sistema de frenagem do transportador	03:00
08/09/2014	ER 151-01	Removida a roda do encoder de posicionamento da máquina.	04:00
09/09/2014	ER 151-01	Eliminação de trinca nos trucks de translação M 12 e M 13	06:00
09/09/2014	RP 152-01	Reabastecimento do sistema de lubrificação do giro	02:00
10/09/2014	TR 152-04	Substituído rolo de retorno plano próximo ao chute de alimentação	03:00
11/09/2014	SI 152-01	Eliminado vazamento na tubulação hidráulica das comportas 1 e 2	02:00
11/09/2014	TR 152-33	Substituído rolo de carga central e removido rolo desaguador preso na estrutura	03:00
11/09/2014	TR 152-33	Realizado solda de chave de desalinhamento próximo ao chute de alimentação	02:00
11/09/2014	TR 152-33	Reposicionado braço da chave de desalinhamento danificada próximo ao chute de descarga	02:00
12/09/2014	TR 152-01	Realizado solda do anel de expansão do acoplamento de baixa do transportador	04:00
12/09/2014	TR 152-01	Realizado montagem da janela de entupimento no chute de descarga	03:00
12/09/2014	TR 152-02	Substituído rolo de retorno em V no módulo 17	03:00
12/09/2014	ER 151-01	Montagem de tubulação, lançamento de cabos e montagem de 5 refletores no tripper da máquina	03:00
15/09/2014	SI 152-03	Efetuada reparo em olhal do cilindro da comporta de descarga 02 A	02:00
15/09/2014	TR 152-09	Substituído rolo de retorno plano e rolo de carga lateral	03:00
15/09/2014	SI 152-35	Substituído cilindro da comporta 2 - Lado Esquerdo	04:00
15/09/2014	RP 152-01	Substituído rolo de carga central e rolo de carga lateral no transportador da lança	03:00
16/09/2014	TR 152-10	Substituído rolo de carga lateral	03:00
17/09/2014	TR 152-40	Retirado borda de correia que estava enrolada no eixo do tambor de acionamento	05:00
17/09/2014	TR 152-40	Reposicionado linha de rip-cord do transportador	02:00
17/09/2014	TR 151-26	Substituído rolo de retorno plano no módulo 35	03:00
17/09/2014	RP 152-01	Realizado abastecimento da bomba de graxa do giro da máquina	02:00
17/09/2014	TR 152-02	Realizada regulagem dos rolos desaguadores da correia	03:00
17/09/2014	RP 152-01	Recondicionado os fios de rosca do tirante de travamento do carro tensor	04:00
17/09/2014	SI 152-35	Completado nível de óleo no sistema hidráulico	04:00
18/09/2014	RP 152-03	Realizado corte de chapa guia empenada no giro da máquina	03:00
22/09/2014	TR 152-30	Substituído rolo de retorno no módulo 52	03:00
22/09/2014	TR 152-30	Substituído 05 rolos de retorno em V	05:00
23/09/2014	RP 152-01	Recondicionado cavalete auto-alinhante e realizado montagem de rolo lateral faltante	05:00
23/09/2014	TR 152-03	Reposicionado rolo de carga central	04:00
23/09/2014	SI 152-03	Realizado solda em olhal da tala de articulação da comporta de descarga 01 A	03:00
23/09/2014	ER 151-01	Substituído rolo de impacto módulo 01	03:00
23/09/2014	RP 152-01	Realizado solda para travamento do chute de alimentação da roda de caçamba	03:00
23/09/2014	SI 152-01	Sanado vazamento de óleo na tubulação da comporta 01	03:00
23/09/2014	ER 151-01	Substituído rolo de impacto módulo 02	04:00
23/09/2014	TR 152-30	Removida borda de correia enrolada em rolo protetor de estrutura.	02:00
23/09/2014	SI 152-02	Confecção e montagem de travas de sapata para base de trilhos sob o silo	04:00
23/09/2014	SI 152-02	Realizado solda das travas de sapata na base montadas previamente	04:00
24/09/2014	SI 152-01	Substituído buchas do olhal fixo da comporta 02 - Lado esquerdo	02:00
24/09/2014	SI 152-01	Realizado reparo no cone do silo acima da comporta 01	02:00
24/09/2014	RP 152-01	Substituídos rolo de carga central e rolo de carga lateral	03:00
24/09/2014	ER 151-01	Substituídos 02 rolos de carga laterais	03:00
24/09/2014	RP 152-03	Realizado reaperto dos parafusos de fixação dos redutores de giro	03:00
24/09/2014	TR 152-04	Substituídos 02 rolos de carga centrais e 01 rolo de carga lateral no módulo 22	04:00
24/09/2014	TR 152-04	Desativado rolo de carga lateral	02:00
24/09/2014	SI 152-02	Realizado reforço em solda de trilho sob o silo	04:00
24/09/2014	RP 152-01	Substituído rolo de carga central	02:00