



MODELO DE SIMULAÇÃO PARA CAPTURA E APROVEITAMENTO DE OCIOSIDADE PARA MANUTENÇÃO EM SISTEMAS DE EXPEDIÇÃO DE MINÉRIOS

SIMULATION MODEL TO CAPTURE AND USE WINDOWS OF IDLENESS FOR MAINTENANCE IN EXPEDITION SYSTEMS OF MINING PRODUCTS

Pedro Henrique Librelon de Faria* E-mail: pedro.faria@gmail.com

José Luis Duarte Ribeiro* E-mail: ribeiro@producao.ufrgs.br

Herbert Ricardo Garcia Viana** E-mail: herbertviana@hotmail.com

*Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil

**Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN, Brasil

Resumo: Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um simulador que permite prever janelas de oportunidade para manutenção em sistemas de expedição de produtos de mineração. 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. Testes realizados com dados históricos do sistema de expedição 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, buscando o aproveitamento das oportunidades e, conseqüentemente, melhorar o desempenho do sistema em estudo.

Palavras Chave: Mineração. Simulação. Gestão da Manutenção.

Abstract: This paper presents the development of a simulator that can predict windows of opportunity for maintenance activities at expedition systems for mining products. The simulator was developed considering the case of the Carajás mine in Para, one of the largest in Brazil. It is a heuristic model, based on prior knowledge of the researcher about the problem and on the study of the system's operating logic. The result was an application called Expedition Simulation Mosaic. Tests were conducted from historical data and showed that the difference between the actual windows of opportunities occurred in the historical period and the simulated windows of opportunity for the same period was approximately 10% in favor of safety (estimated time at mosaic less than the actual time available for maintenance activities). This difference was considered acceptable, and confirmed the applicability of the Mosaic to support the maintenance planning, in order to optimize the use of opportunities and improve the performance of the system under study.

Keywords: Mining. Simulation. Maintenance Management.

1 INTRODUÇÃO

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, conforme já ressaltava 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 das operações. Vale observar que, em setores com equipamentos de grande porte sujeitos a desgaste intenso, 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).

O termo manutenção em oportunidades, conforme apresentado por Vanneste (1991), 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.

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, segundo Zhang e Nakamura (2005), as estratégias de manutenção dos ativos da empresa e o gerenciamento deste processo de forma integrada assumem um papel fundamental para o atendimento dos objetivos de desenvolvimento das organizações.

Conforme descrito por Nascif e Dorigo (2010), 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.

Ainda segundo Márquez et al. (2009), 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.

Os sistemas de expedição de produtos de mineração e seus subsistemas (expedição, ferrovia e descarga) possuem equipamentos que têm grande ociosidade associada. No entanto, estes equipamentos 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 produto 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 x 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, aplicando a estratégia de manutenção em oportunidades. 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.

Neste trabalho é apresentado um modelo para prever as janelas de oportunidade no sistema de expedição de minério de ferro da mina de Carajás no Pará, de forma a capturá-las para manutenção. Inicialmente são apresentadas considerações sobre confiabilidade, manutenção de equipamentos de grande porte e métodos de modelagem. Nesta etapa, é realizada uma revisão dos conceitos de confiabilidade e modelos de gerenciamento de manutenção em plantas com equipamentos de grande porte. É apresentado um levantamento da literatura sobre estratégias de manutenção de equipamentos, indicadores de manutenção, além de técnicas de modelagem, focando as abordagens que poderão ser utilizadas.

A seguir, a abordagem proposta é desenvolvida e apresentada, explorando as técnicas utilizadas para obtenção dos dados, além da descrição do modelo de simulação adotado para prever as janelas de oportunidade no sistema de expedição de minério de ferro da mina de Carajás no Pará. Este modelo proposto, construído a partir de uma abordagem heurística, isto é, um sistema de raciocínio baseado na observação da realidade, consiste de um mosaico de previsão do sistema de expedição, onde cada linha de carregamento é apresentada de forma gráfica. O mosaico de previsão é uma

ferramenta para auxílio na tomada de decisão e proporciona aos gestores a possibilidade de simular cenários e avaliar os impactos financeiros reduzindo o risco de que as decisões gerem resultados negativos e prejuízos para o negócio.

2 ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO

Segundo Wang (2012), 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-offs* entre os gastos com manutenção e os riscos de operação do sistema, visando maximizar os lucros que podem ser gerados pela operação do mesmo.

No entanto, conforme explicam Liu e Huang (2010), 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.

Segundo Pintelon (1992) as estratégias de manutenção podem ser classificadas em cinco tipos básicos resumidos abaixo:

- 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. Para Mann (1995), 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.
- 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. Segundo Kelly (1984), 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.

- 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. Conforme Vanneste (1991), a escolha dos componentes a serem trabalhados depende da distribuição residual de suas vidas úteis, que por sua vez tem forte influência das condições operacionais.
- 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. Segundo Pintelon (1992), 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”.

Para Wang (2002), 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.

Para redução da taxa de falhas durante os períodos de utilização dos equipamentos, em cenários onde o tempo de manutenção é uma restrição, Zhu et al. (2010) e Liu e Huang (2010) reportam a utilização da estratégia de manutenção seletiva com resultados satisfatórios. Cassady et al. (2001) afirma que 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.

Rice et al. (1998) iniciaram os estudos analisando problemas de confiabilidade de equipamentos do ponto de vista da manutenção seletiva. Esses autores elaboraram um modelo computacional de decisão para o caso especial de um sistema série paralelo. 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 existam à disposição dados de custo e tempos de manutenção para estimativa dos parâmetros de forma satisfatória.

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.

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.

Segundo Dekker (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.

Segundo 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 conforme relatado por 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, 1998) 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.

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.

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.

3 MODELAGEM COMPUTACIONAL PARA SISTEMAS DE 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. Conforme descrito por Einsinger e Rakowsky (2001), para decidir minimizando os erros e extrair o máximo dos recursos no sistema produtivo, é imprescindível recorrer às ferramentas apropriadas.

Segundo Bertrand e Fransoo (2002), 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. Segundo Lai e Chen (2006) 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.

Para Miguel et al. (2010), 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.

Para Sellitto (2005), 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) apresenta ainda uma proposta de método objetivo para formular estratégias de manutenção em equipamentos industriais. A partir de modelagem computacional buscou focar 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.

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. Conforme Fogliatto (2000), 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 (tempo, carga de uso) sobre variáveis dependentes (desgaste, falha). Modelos com uma única variável dependente são ditos univariados. Modelos com múltiplas variáveis dependentes são ditos multivariados.

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, segundo Dekker (1996), 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.

Arenales et al. (2007) apresenta quatro etapas cruciais para o processo de modelagem:

- **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. Segundo Cavalcante e Costa (2006), este passo requer esforço e deve ser realizada de maneira focada no propósito do trabalho para evitar dispersões na etapa de avaliação.

Para Ben-Daya (2000), 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.

Conforme Taha (2008) 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.

Segundo Kahneman (2012), heurística é um método ou processo criado com o objetivo de encontrar soluções para um problema. É um procedimento simplificador (embora não simplista) que, em face de questões difíceis envolve a substituição destas questões por outras de resolução mais fácil a fim de encontrar respostas viáveis, ainda que imperfeitas. Tal procedimento pode ser tanto uma técnica deliberada de resolução de problemas, como uma operação de comportamento intuitivo.

Para Tversky & Kahneman (1974) as técnicas heurísticas trazem soluções válidas, porém aproximadas, e a observação do processo é uma etapa fundamental para validação dos resultados encontrados. 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. Para modelagem de manutenção em equipamentos de expedição de minério e mesmo equipamentos de mineração de grande porte, pouca literatura foi encontrada.

4 METODOLOGIA

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo para prever as janelas de oportunidade no sistema de expedição de minério de ferro da mina de Carajás no Pará, de forma a capturá-las para manutenção.

Para tal, o trabalho foi estruturado em três etapas, sendo:

- (i) Observação do processo produtivo e 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. Esta é a etapa de formulação do modelo.
- (ii) Através da observação, desenvolver de um modelo heurístico de previsão das janelas de oportunidade no sistema de expedição de minério de ferro a fim de aproveitá-las para realização de manutenção. Esta é a etapa de análise do modelo.
- (iii) Desenvolvimento de aplicativo do simulador e validação do modelo utilizando testes de sensibilidade: Após o desenvolvimento, o modelo foi avaliado a partir de dados históricos do sistema de expedição. Finalmente, esta fase abrange as etapas de interpretação e avaliação do modelo.

As etapas são detalhadas à seguir:

(i) 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), SinterFeed (partículas de 1 a 6,3 mm) e Lump Ore (partículas de 6,3 a 15 mm).

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. 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 1, estão listados os equipamentos deste sistema e suas capacidades de projeto.

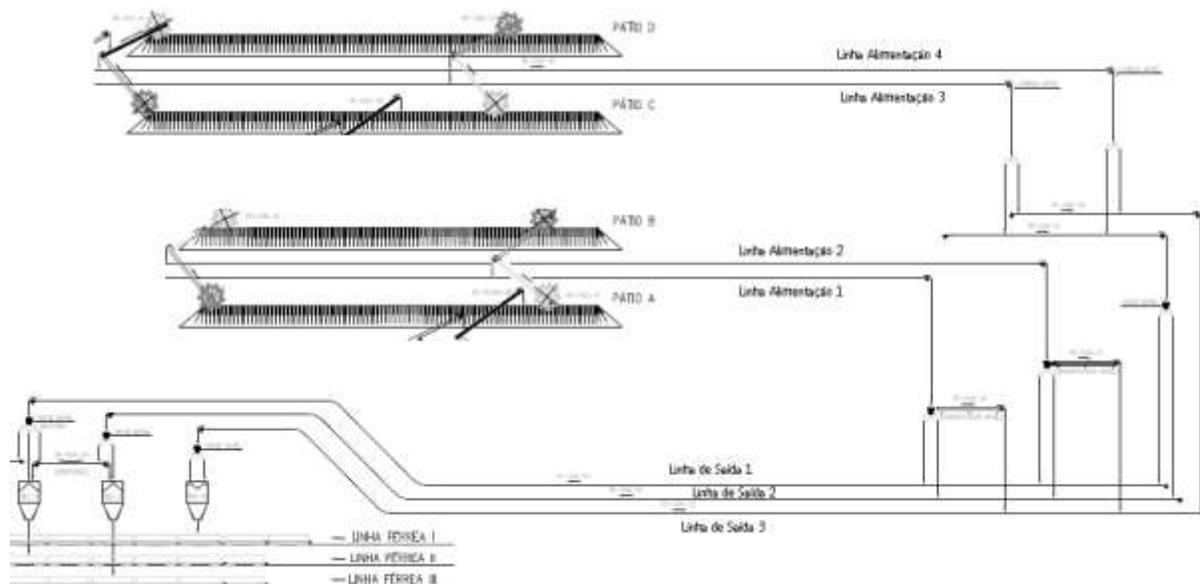
A Figura 1 apresenta o diagrama do sistema de expedição de Carajás, base para entendimento da modelagem heurística. O diagrama mostra quatro linhas de alimentação para três linhas de saída. As três linhas de saída, se somadas, têm capacidade superior à soma das quatro linhas de alimentação.

Tabela 1 – 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

Conforme Tabela 1, 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 necessário 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 do modelo de um Mosaico de Simulação da Expedição devem ser tomadas conforme algumas premissas heurísticas, baseadas na observação do sistema, descritas a seguir.

Figura 1 – Diagrama esquemático do sistema de expedição em Carajás



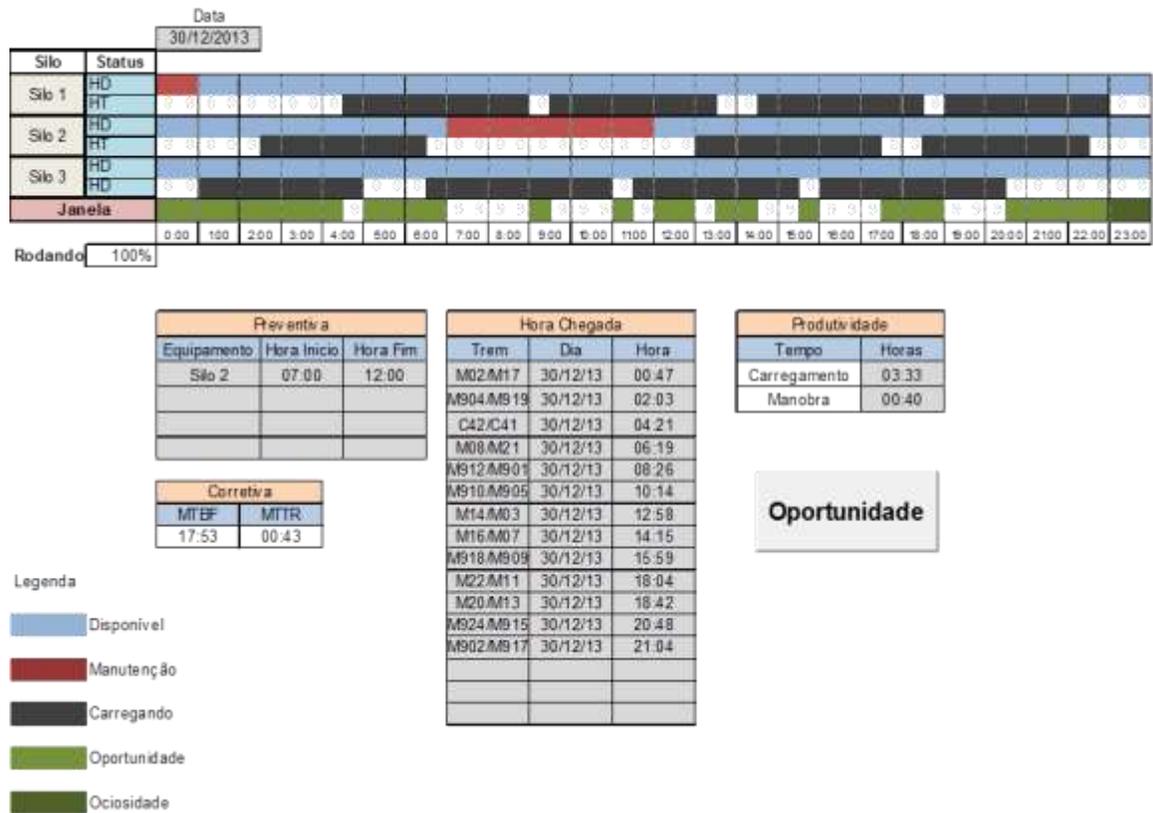
(ii) O modelo proposto, denominado de Mosaico de Previsão da Expedição, apresenta cada linha de carregamento de forma gráfica, utilizando cores, que estabelecem uma figura similar a um mosaico, conforme apresentado na Figura 2.

Para construção desse mosaico, a primeira premissa heurística de modelagem 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 heurística importante utilizada 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.

Figura 2 – Interface do Mosaico de Simulação da Expedição

Mosaico Expedição



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 heurística 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.

O código fonte desenvolvido para o mosaico, apresentado no Apêndice tem a seguinte lógica de funcionamento: 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 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.

(iii) Definidas as premissas heurísticas utilizadas para elaboração do modelo, inicia-se a etapa de desenvolvimento do simulador que será o aplicativo para implementação do modelo. 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, o algoritmo utilizado pode ser observado na Figura 3. 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 3 mostra o fluxograma do algoritmo da rotina preenchimento de manutenção de linhas no mosaico. A Figura 4 apresenta o fluxograma da rotina de preenchimento carregamento de trens no mosaico.

Figura 3 – Algoritmo de Composição do Mosaico (linha de carregamento)

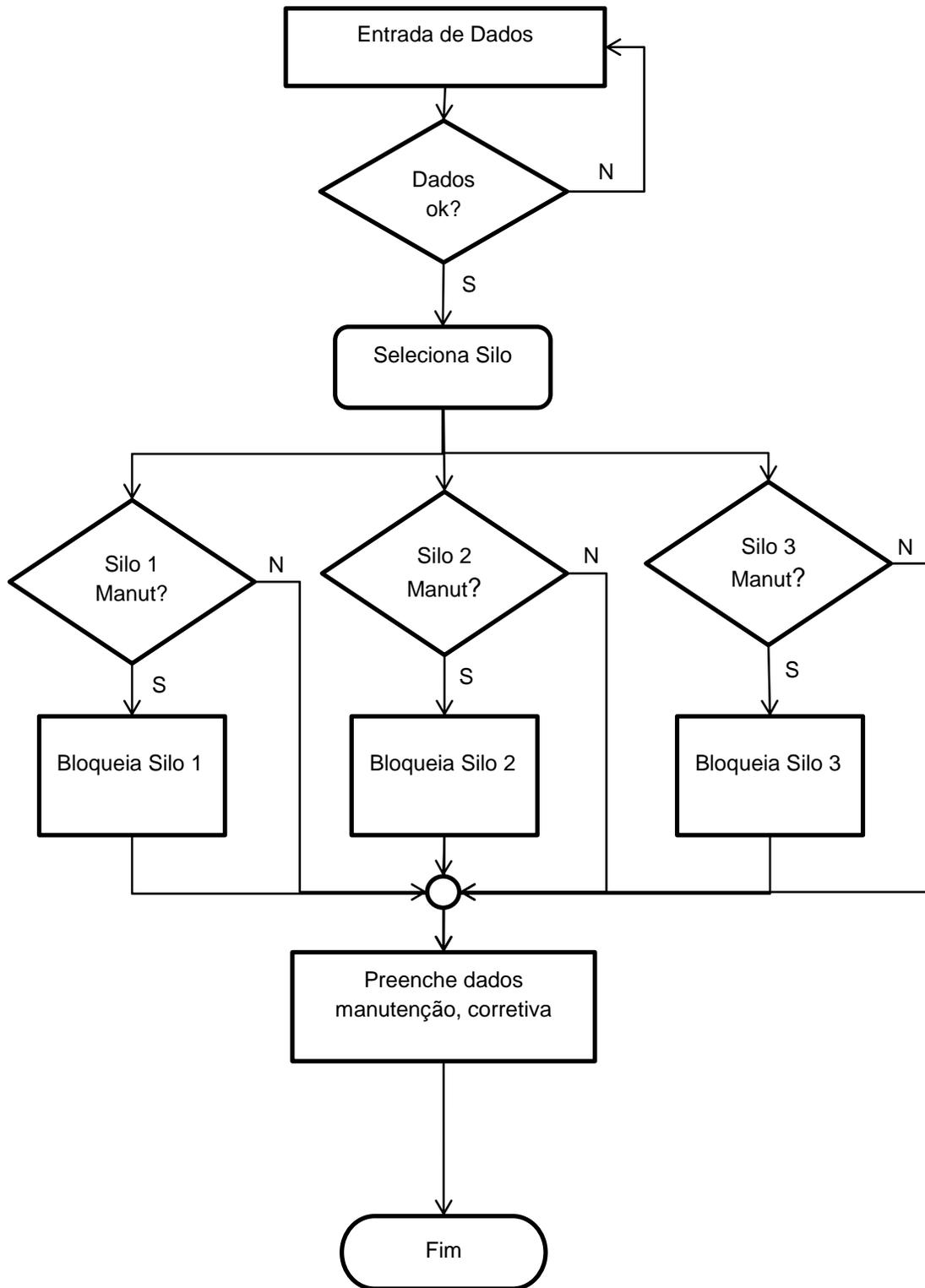
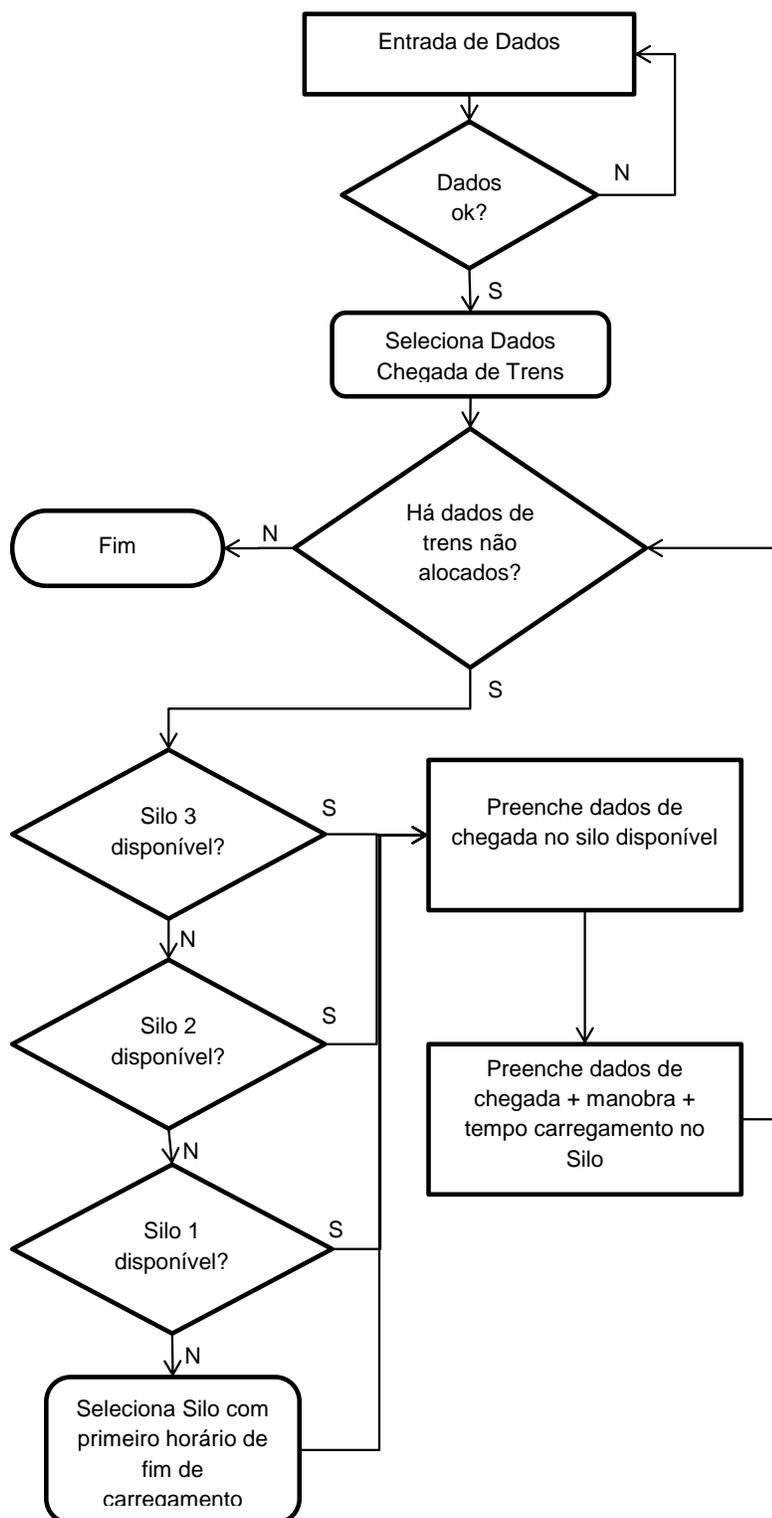


Figura 4 – Algoritmo de Composição do Mosaico (sistema de expedição)



Inicialmente, 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, com uma confiabilidade na previsão de chegada do trem que aumenta à medida que o mesmo se aproxima do terminal de expedição de minério. A observação indica que há uma alta probabilidade de confirmação dos horários de chegada previstos pelo sistema 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.

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 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, o que corresponde a realidade observada no terminal de expedição.

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.

A Figura 5 mostra o relatório emitido pelo simulador informando os horários de cada 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.

Figura 5 – Relatório de Oportunidades de 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	

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

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 2 mostra o teste de sensibilidade do modelo com 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 2, 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.

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.

Neste trabalho 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.

Tabela 2 – 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

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.

Uma proposta de trabalho futuro é realizar a aplicação do modelo desenvolvido e, a partir das informações geradas pelas equipes de reparo (tempos, demanda por ferramentas, demanda por sobressalentes, etc.), estabelecer novas diretrizes e procedimentos de manutenção, buscando otimizar o aproveitamento das oportunidades e, conseqüentemente, melhorar o desempenho do sistema em estudo.

REFERÊNCIAS

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. <https://doi.org/10.1108/13552510010328086>

BERTRAND J.W.M., FRANSOO J.C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 3, p 241-264, 2002. <https://doi.org/10.1108/01443570210414338>

CASSADY C.R., POHL E.A., Murdock W.P.; Selective Maintenance Modeling for Industrial Systems. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, v.7, n. 2, p 104-117, 2001. <https://doi.org/10.1108/13552510110397412>

CAVALCANTE C.A.V., COSTA A.P.C.S. Multicriteria Model of Preventive Maintenance” **Brazilian Journal of Operations & Production Management**, v. 3, n. 1, p. 71-86, 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-530X2013000100010>

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), p. 1477-1482, 1999. <https://doi.org/10.1109/CCECE.1999.804927>

CHRISTER A.H., WHITELAW J. An operational research approach to breakdown maintenance: problem recognition” **Journal of the Operational Research Society**, v. 34, p. 1041-1052, 1983. <https://doi.org/10.1057/jors.1983.235>

CHRISTER A.H., WANG W., BAKER R.D., SHARP J.M. Modelling maintenance practice of production plant using the delay-time concept. **IMA Journal of Management Mathematics** 6; pp 67-83, 1995. <https://doi.org/10.1093/imaman/6.1.67>

CHRISTIER A.H., WANG W., SHARP J.M., BAKER R.D. A case study of modelling preventive maintenance of a production plant using subjective data. **Journal of Operational Research Society**, v. 49, p. 210-219, 1998. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600518>

DEKKER R. Applications of Maintenance Optimization Models: A Review and Analysis. **Reliability Engineering and System Safety** 51(3); pp 229-240, 1996. [https://doi.org/10.1016/0951-8320\(95\)00076-3](https://doi.org/10.1016/0951-8320(95)00076-3)

EISINGER S., RAKOWSKY U.K.. Modeling of uncertainties in reliability centered maintenance — a probabilistic approach. **Reliability Engineering and System Safety**, v.71; p 159-164, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(00\)00088-0](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(00)00088-0)

FOGLIATTO F.S. Estratégias para modelagem de dados multivariados na presença de correlação. **Gestão & Produção**, v. 7, n. 1, p 17-28, 2000. <https://doi.org/10.1590/S0104-530X2000000100002>

GOLDSTEIN A.. Brazilian privatization in international perspective: the rocky path from state capitalism to regulatory capitalism. **Industrial and Corporate Change**, v. 8, n.4, p.673-711, 1999. <https://doi.org/10.1093/icc/8.4.673>

JONES B., JENKINSON I., WANG J. Methodology of using delay-time analysis for a manufacturing industry. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 94, p. 111-124, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2007.12.005>

KAHNEMAN D.; **Rápido & devagar**: duas formas de pensar. Rio de Janeiro, Ed. Objetiva 2012.

KELLY A. Maintenance documentation and computers. **Maintenance Management International**, v. 4, p. 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**, v. 29, n. 3, p. 367-371, 2006. <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2486-8>

LIU Y., HUANG H-Z.. Optimal selective maintenance strategy for multi-state systems under imperfect maintenance. **IEEE Transactions on Reliability**, v. 59, n. 2, p. 356-367, 2010. <https://doi.org/10.1109/TR.2010.2046798>

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.

MANN L., SAXENA A., KNAPP G. Statistical-based or condition-based preventive maintenance?. **Journal of Quality in Maintenance Engineering** 1, p. 46-59, 1995. <https://doi.org/10.1108/13552519510083156>

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**, v. 15, n. 2, p. 167-178, 2009. <https://doi.org/10.1108/13552510910961110>

MATTHIES K. Slower Price Rises in Commodity. **Markets Intereconomics**, v. 42, n. 2, p. 109-112, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10272-007-0213-z>

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.

NASCIF J.,DORIGO L.C. **Manutenção orientada para resultados**. Rio de Janeiro: Qualymark, 2010.

PINTELON L.M., GELDERS L.F.Maintenance management decision making. **European Journal of Operational Research**, v. 58, p. 301-317, 1992. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(92\)90062-E](https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90062-E)

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.

SELLITTO M.A.. Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos. **Revista Produção**, v. 15, n. 1,p. 44-59, 2005. <https://doi.org/10.1590/s0103-65132005000100005>

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**, v. 3, n. 4, p. 283-303, 1991. <https://doi.org/10.1093/imaman/3.4.283>

TVERSKY, A., & KAHNEMAN, D.; Judgment under uncertainty: heuristics and biases. **Science** v. 185, n. 4157, p. 1124-31, 1974. <https://doi.org/10.1126/science.185.4157.1124>

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**, v. 139, n.3, p 469-489, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00197-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00197-7)

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

WORM J.M. ; VAN HARTEN A. Model based decision support for planning of road maintenance. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 51, n. 3, p. 305-316, 1996. [https://doi.org/10.1016/0951-8320\(95\)00100-X](https://doi.org/10.1016/0951-8320(95)00100-X)

ZHANG T., NAKAMURA M.. Reliability-based optimal maintenance scheduling by considering maintenance effect to reduce cost. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 21, p. 203-220, 2005. <https://doi.org/10.1002/qre.645>

ZHAO Y.X.; On preventive maintenance policy of a critical reliability level for system subject to degradation. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 79, p. 301-308, 2003.
[https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(02\)00201-6](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(02)00201-6)

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**, 2010.
<https://doi.org/10.1002/qre.1111>



Artigo recebido em 16/02/2015 e aceito para publicação em 01/11/2016

DOI: <http://dx.doi.org/10.14488/1676-1901.v16i4.1990>

APÊNDICE : 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

```

```

        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
End If
Next j
'-----Preencher Painei-----
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
                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
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
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
    Range("C25").Value = r / ((96 * 6) - 1)
    r = r + 1
Wend
Pass = 0
Next n
End Sub

```