LVI SBPO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
DE 04 ATÉ 07 NOVEMBRO 2024
FORTALEZA | CEARÁ

# Mapeamento de gargalos de uma usina de beneficiamento mineral por meio da simulação de eventos discretos e análise de falhas

**Fábio Fernandes Ribeiro**
Vale s/a.
Alameda Oscar Niemeyer, 132/17º andar - Vale do Sereno, Nova Lima - MG, 34006-049
fabio.fernandes.ribeiro@vale.com

**Maria Simone Alves**
Vale s/a.
Alameda Oscar Niemeyer, 132/17º andar - Vale do Sereno, Nova Lima - MG, 34006-049
simone.alves21@vale.com

## RESUMO

Este artigo apresenta uma metodologia abrangente baseada em simulação de Monte Carlo, simulação de eventos discretos e análise de falhas para identificar e abordar gargalos em uma usina de beneficiamento mineral. Através de experimentos sequenciais, a metodologia revelou a influência da taxa de alimentação, a baixa confiabilidade dos ativos como principais fatores limitantes, fornecendo insights valiosos para a melhoria do desempenho operacional. A abordagem demonstrou sua eficácia ao fornecer subsídios para identificar falhas em fases específicas do processo produtivo e gerar hipóteses adicionais para investigação futura, destacando-se como uma ferramenta poderosa para o mapeamento e a resolução de gargalos em sistemas complexos.

**PALAVRAS CHAVE. Simulação de eventos discretos, Gargalos operacionais, Mineração.**

**PO na Indústria, Simulação e PO na Administração e Gestão da Produção**

## ABSTRACT

This work deals with a comprehensive methodology based on Monte Carlo simulation, discrete event simulation and failure analysis to identify and address bottlenecks in a mineral plant. Through sequential experiments, the methodology revealed the influence of feed rate and low asset reliability as the main limiting factors, providing valuable insights for improving operational performance. The approach demonstrated its effectiveness in providing support for identifying failures in specific phases of the production process and generating additional hypotheses for future investigation, standing out as a powerful tool for mapping and solving bottlenecks in complex systems.

**KEYWORDS. Discrete event simulation, Operational bottlenecks, Mining.**

**OR in Industry, Simulation and OR in Production Administration and Management**

**DOI:** 10.59254/sbpo-2024-193535
https://proceedings.science/p/193535?lang=pt-br

## 1. Introdução

A indústria da mineração enfrenta desafios complexos relacionados ao seu impacto social e ambiental, exigindo a adoção de práticas mais sustentáveis e inovadoras. Nesse contexto, os avanços tecnológicos desempenham um papel fundamental ao oferecer soluções que visam não apenas aumentar a eficiência e a competitividade, mas também promover a preservação do meio ambiente e a melhoria das relações com as comunidades envolvidas.

Diante do contexto apresentado, este trabalho propõe uma metodologia inovadora fundamentada na gestão de ativos e na análise de gargalos para avaliar a operação de uma usina de beneficiamento mineral situada no quadrilátero ferrífero, em Minas Gerais. Esta usina foi projetada para atingir uma produção anual de 10 milhões de toneladas de produto, no entanto vem apresentando um desempenho abaixo das expectativas, comprometendo o plano de produção daquele complexo minerário.

O objetivo deste trabalho é identificar os principais gargalos presentes no sistema produtivo, promovendo uma análise abrangente das restrições com o propósito de identificar falhas que possam contribuir para o surgimento desses gargalos e para a baixa performance deste ativo.

A partir da identificação dos riscos ao cumprimento do plano de produção desta usina, foi desenvolvido um modelo de simulação de eventos discretos da fase a seca da referida instalação industrial. Neste modelo, as etapas de britagem, classificação, empilhamento e retomada de material foram representadas para compreender o comportamento dinâmico desses processos e identificar a formação dos gargalos resultantes da interação entre essas etapas. Após a identificação, esses gargalos foram analisados por meio de uma análise de falha, com o intuito de obter um entendimento abrangente sobre a influência do referido ativo no gargalo avaliado.

Os resultados obtidos por meio da aplicação desta metodologia indicam a existência de uma forte correlação entre os modos de falha dos ativos e os gargalos identificados no sistema.

O próximo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica da simulação de Monte Carlo, simulação de eventos discretos, das metodologias para identificação de gargalos e análise de falhas.

## 2. Revisão bibliográfica

A simulação de Monte Carlo é uma técnica estatística amplamente utilizada para modelar o comportamento de sistemas complexos por meio da geração de múltiplos cenários probabilísticos. Segundo [Nascimento et al. 2011], esta técnica é originária do projeto Manhattan desenvolvido durante a Segunda Guerra Mundial e seu nome deriva do famoso cassino de Mônaco, devido à natureza aleatória e estocástica da abordagem. Segundo [Nascimento et al. 2011], a aplicação da simulação de Monte Carlo tem se expandido significativamente nas últimas décadas, particularmente devido aos avanços na capacidade computacional. Além da sua utilização em modelagem estocástica e análise de riscos, a simulação de Monte Carlo tem se mostrado eficaz na otimização de sistemas, na valoração de opções financeiras, na resolução de problemas de programação linear, e na análise de propriedades físicas.

Já a simulação de eventos discretos é uma das ferramentas de análise mais poderosas disponíveis para profissionais responsáveis pelo projeto e operação de processos complexos ou sistemas, sendo uma metodologia essencial para resolver problemas que não podem ser abordados de forma analítica [Pedgen et al. 1995].Ela auxilia na identificação de problemas, gargalos e deficiências no projeto antes da construção ou modificação de um sistema, permitindo a comparação de várias alternativas de regras de funcionamento [Carson, 2004].

Neste trabalho foi adotada uma metodologia de desenvolvimento de modelos de simulação de eventos discretos, segundo autores renomados como [Freitas 2008], [Banks e Carson 1984], [Law e Kelton 2000] e [Kelton e Sadowski 2004].

Segundo esses autores, um estudo que envolve simulação de eventos discretos deve conter e seguir uma série de passos/etapas: Formulação do problema, Planejamento do projeto, Modelo conceitual, Coleta de macro informações e dados, Codificação, Verificação e validação, Projeto experimental, Experimentação, Interpretação e análise dos resultados, Comparação de

**DOI:** 10.59254/sbpo-2024-193535
https://proceedings.science/p/193535?lang=pt-br

sistemas e identificação das melhores soluções, Documentação e Apresentação dos resultados e implementação.

A análise de gargalo é um processo de identificação e avaliação das áreas em um sistema, processo ou operação que estão limitando a capacidade geral ou eficiência do sistema como um todo. Gargalos podem ocorrer em várias formas e em diferentes contextos, como em processos de produção.

Atualmente a Vale tem um plano de recuperação de produção com a entrada de projetos que tendem a elevar a produção. Para as usinas suportarem essa demanda adicional é necessário analisar todo o processo produtivo, identificando os possíveis gargalos com a finalidade de definir iniciativas que auxiliem no cumprimento do plano de produção.

O objetivo deste processo de mapeamento de gargalos consiste em organizar as iniciativas que irão atuar na alavancagem da performance, estabelecendo uma visão de curto e médio prazo, com a orientação e priorização dos investimentos necessários para sustentabilidade do negócio.

Na Figura 1 é apresentado um fluxograma que apresenta as etapas do mapeamento dos gargalos com o intuito de direcionar o planejamento com foco na criação de valor, analisando paralelamente a discrepância entre o plano de produção e as referências técnicas e o desempenho recente dos ativos.

Quando observamos a projeção futura de produção é fundamental avaliarmos os riscos, buscando identificar os ativos/processos que estão com maiores potenciais de perdas ou ainda com oportunidades. Através da simulação dinâmica do processo buscamos uma análise mais consistente que nos direcione para os principais gargalos, contrapondo com as análises de falhas futuras dos ativos críticos ao processo.

Todo esse fluxo nos auxilia no planejamento futuro para monitorarmos o processo e estabelecer uma rotina de revisão contínua, isto é, o processo deve ser retroalimentado periodicamente dado as peculiaridades do ambiente e degradação dos ativos envolvidos.

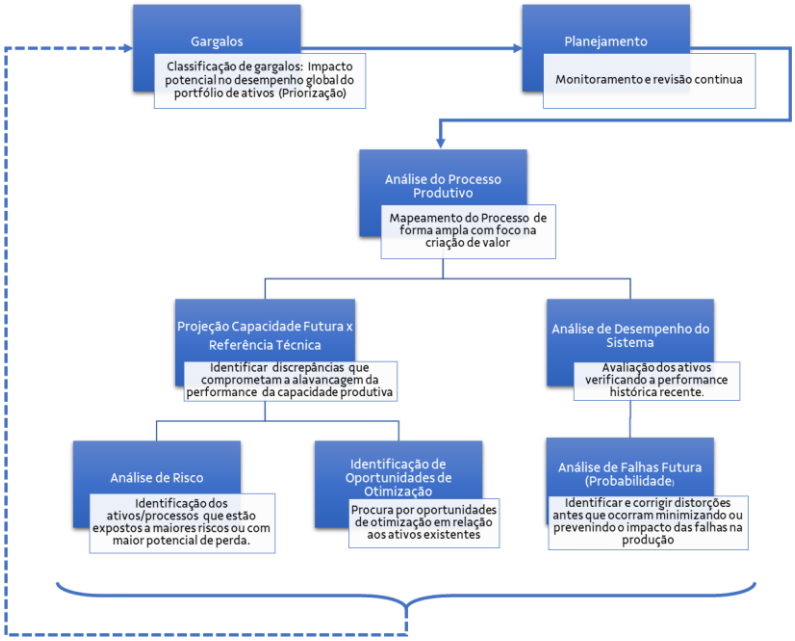


Figura 1: Fluxograma – Mapa de Gargalos

As falhas, segundo [Moubray 2001], [Kardec e Nascif 2001], [Lafraia 2001] e [Siqueira 2009], são caracterizadas pela interrupção ou alteração da capacidade de um item desempenhar uma função requerida ou esperada a atender o seu propósito específico, ou seja, é a perda da função de um determinado componente.

**DOI:** 10.59254/sbpo-2024-193535
https://proceedings.science/p/193535?lang=pt-br

A análise de falhas é uma área crucial em engenharia e gestão de sistemas, focada em compreender os mecanismos subjacentes a falhas em componentes, equipamentos ou sistemas. Este processo tem como objetivo identificar, entender e mitigar potenciais pontos de falha que possam comprometer a segurança, confiabilidade e eficiência de um sistema.

A análise de falhas é um processo sistemático de investigação que visa compreender as causas raiz por trás de uma falha em um sistema. Ela abrange a identificação dos modos de falha, suas consequências e as condições que levaram à ocorrência da falha. Os principais conceitos incluem modos de falha, causas raiz e análise de consequências.

Diversos métodos são utilizados para conduzir uma análise de falhas de forma estruturada e eficaz. Alguns dos mais comuns incluem:

- Análise de Árvore de Falhas (FTA - Fault Tree Analysis): Esta técnica visualiza e analisa as relações lógicas entre eventos que levam a uma falha, identificando as combinações de falhas que podem resultar em consequências indesejadas [Borba Prá, 2010].
- Análise de Modo e Efeito de Falha (FMEA - Failure Mode and Effect Analysis): Um método sistemático para identificar os modos potenciais de falha em um sistema, avaliando suas consequências e priorizando-os com base no risco percebido [Puente et al., 2002].
- Análise de Causa Raiz (RCA - Root Cause Analysis): Foco em identificar a causa fundamental de uma falha, permitindo a implementação de medidas corretivas eficazes para prevenir recorrências [Sharma e Sharma, 2010].

A análise de falhas é essencial em diversas indústrias, incluindo manufatura, transporte, energia, saúde e tecnologia. Suas aplicações incluem melhoria da confiabilidade, garantia de qualidade, identificação precoce de potenciais falhas em processos de fabricação ou desenvolvimento de produtos, segurança e gerenciamento de riscos e otimização da manutenção. Ela desempenha um papel fundamental na engenharia e gestão de sistemas, permitindo a prevenção de falhas catastróficas, a melhoria contínua da confiabilidade e a garantia da segurança e qualidade em uma ampla gama de aplicações industriais e tecnológicas. O emprego de métodos e ferramentas apropriados de análise de falhas é essencial para o sucesso e eficácia desses esforços.

## 3. Métodos e Resultados

Nesta seção será descrito o processo utilizado para identificação dos riscos, gargalos e posterior análise de falhas.

### 3.1. Análise de riscos

A simulação de Monte Carlo é uma abordagem que utiliza números aleatórios para resolver problemas estocásticos ou determinísticos. No contexto dos modelos do CMA (Controle de Monitoramento de Ativos), essa abordagem é utilizada para desenvolver experimentos que se iniciam a partir de uma modelagem estatística baseada nos comportamentos históricos das variáveis.

#### 3.1.1. Modelagem Estatística e Estruturação dos Modelos

Os modelos do Centro de Monitoramento de Ativos da Vale (CMA) são desenvolvidos a partir da modelagem estatística, que inclui o tratamento dos dados e a obtenção das distribuições estatísticas das variáveis relevantes.Além disso, a estruturação dos modelos envolve a definição de correlações e covariâncias entre as variáveis, a fim de representar adequadamente suas inter-relações.

#### 3.1.2. Simulação e Geração de Cenários

Após a modelagem estatística e a estruturação dos modelos, a simulação de Monte Carlo é realizada para gerar uma ampla gama de cenários possíveis. Essa simulação visa obter o máximo de possibilidades de cenários, levando em consideração as inter-relações e variações das variáveis modeladas.

**DOI:** 10.59254/sbpo-2024-193535
https://proceedings.science/p/193535?lang=pt-br

### 3.1.3. Interpretação dos Resultados

Os resultados da simulação são então dispostos em um gráfico que relaciona o valor da premissa ou volume com a probabilidade de ocorrência. A interpretação desses cenários é feita a partir da área obtida sobre a curva que interliga os pontos no gráfico, proporcionando uma compreensão visual das probabilidades associadas a diferentes valores das variáveis.

### 3.1.4. Determinação da Integração dos Valores

Para determinar a integração dos valores até o ponto de visualização, é utilizada a equação (1), de acordo com [Nascimento, 2011].

$$\boldsymbol{F}: \mathbb{R} \to \mathbb{R}_+, \; definida\ por\ F(x) = \left( \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{1(t-\mu)^2}{2\ \sigma^2}} dt \right), \; para\ todo\ t\ \in \mathbb{R} \qquad (1)$$

Em resumo, a simulação de Monte Carlo é uma ferramenta essencial na elaboração e análise dos modelos do CMA, permitindo a geração de cenários probabilísticos e a interpretação visual das probabilidades de ocorrência associadas a diferentes valores das variáveis de riscos.

A lei dos grandes números e a probabilidade Bayesiana asseguram que, em um modelo bem calibrado, o resultado tenderá ao valor médio próximo ao valor real [Oliver, 2013]. Ao reduzir o resultado a uma curva normal, é possível empregar a notação de probabilidade para determinar a provável ocorrência de um determinado valor da função admitida [Luxburg et al, 2011]. A partir dos resultados da função f(x), é viável classificar o risco associado ao processo em questão, conforme ilustrado na Figura 2.

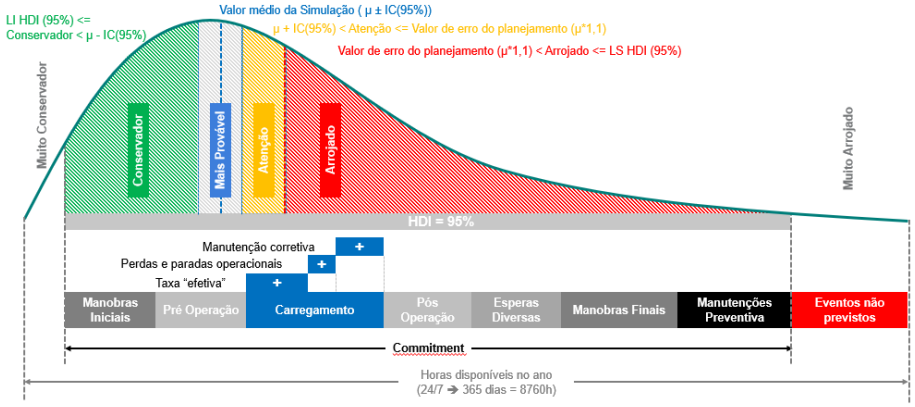



Figura 2: Classificação dos riscos

Sendo,

- Conservador – entre o limite inferior do HDI (high density interval) para uma credibilidade de 95% (LI HDI [95%]) e a média subtraída ao intervalo de confiança (μ - IC [95%]);
- Mais provável – valor médio da simulação (μ ± IC [95%]);
- Atenção – entre a média somada ao intervalo de confiança de 95% (μ + IC [95%]) e o valor de erro planejado (μ*1,1);
- Arrojado – entre o valor de erro planejado (μ*1,1) e o limite superior do HDI para uma credibilidade de 95% (LS HDI [95%]).

Neste artigo um modelo real de análise de riscos e sensibilidade de capacidade, de uma usina de beneficiamento de minério de ferro, denominada genericamente como Vale 1, é apresentado com uma transformação linear nos dados de forma garantir a segurança da informação.

Para a aplicação do método de avaliação de risco do planejado em uma usina são considerados indicadores de produção, quem compõe o OEE (Overall Equipment Effectiveness),

**DOI:** 10.59254/sbpo-2024-193535
https://proceedings.science/p/193535?lang=pt-br

ou Eficiência Global do Equipamento. O período histórico considerado remete aos últimos 12 meses fechados, dados de planejamento tais como: utilização física (UF), disponibilidade física (DF), taxa de alimentação (TX), recuperação mássica (RM) e horas calendário (HC). A equação (2) de capacidade avaliada, de forma simplificada, é a seguinte:

$$Capacidade_{Usina} = UF\ x\ DF\ x\ TX\ x\ RM\ x\ HC$$

onde,
UF = Horas Operadas / Horas Disponíveis
DF = Horas Disponíveis / Horas Calendário (2)
TX = Volume Alimentado / Horas Operadas
RM = Volume Produzido / Volume Alimentado

Após os ajustes das premissas foi aplicada a amostragem aleatória e a simulação de até 30 mil vezes para cada cenário sazonalizado. Os resultados obtidos estão no gráfico de tornado indicando a sensibilidade dos meses simulados, a Figura 3. Observa-se que para a usina Vale 1 a premissa de capacidade que mais sensibiliza é a taxa de alimentação.

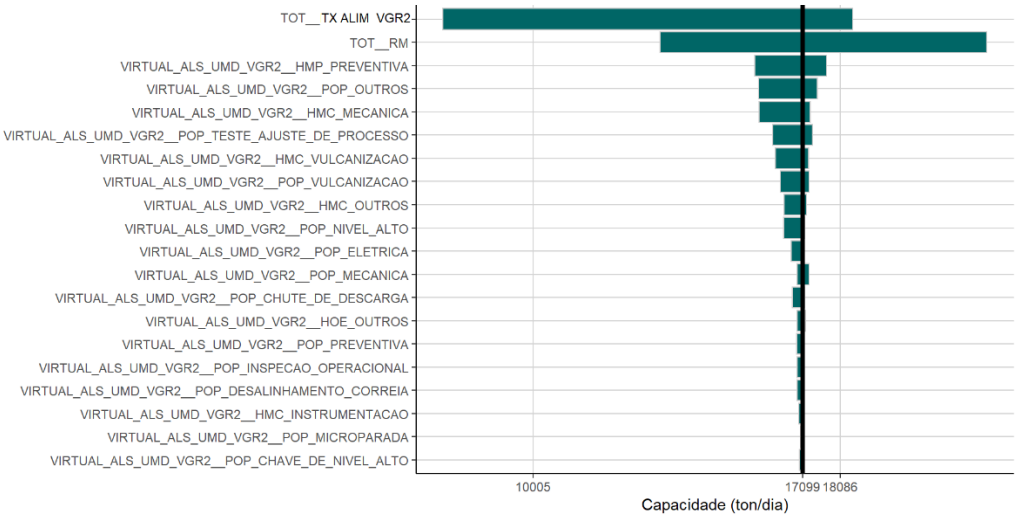



Figura 3: Gráfico de Sensibilidade Simulação Usina Vale 1

Os resultados obtidos na simulação mostram uma probabilidade de atendimento aos volumes planejados, na Tabela 1, observa-se riscos arrojado e muito arrojado para os meses em vermelho e roxo respectivamente, com patamares acima de 90% de risco de atendimento.

Tabela 1: Riscos do Pano de Usina Vale 1

| TAXA ALIMENTAÇÃO (t/h) | | | |
|---|---|---|---|
| ANO | MÊS | GCV | RISCO |
| 2024 | JAN | 2.171 | 99,1% |
| | FEV | 2.180 | 100,0% |
| | MAR | 2.135 | 100,0% |
| | ABR | 2.333 | 98,5% |
| | MAI | 2.313 | 97,6% |
| | JUN | 2.357 | 99,4% |
| | JUL | 2.337 | 98,6% |
| | AGO | 2.335 | 98,5% |
| | SET | 2.384 | 100,0% |
| | OUT | 2.373 | 99,8% |
| | NOV | 2.401 | 100,0% |
| | DEZ | 2.299 | 100,0% |

**DOI:** 10.59254/sbpo-2024-193535
https://proceedings.science/p/193535?lang=pt-br

De forma a comparar as médias simuladas (linha contínua preta) com o planejado (linha tracejada azul) e desta forma estimar o volume sob risco, ilustrou-se na Figura 4 . É possível verificar que o plano apresenta 0,6 Mt em risco (arrojado), pois a projeção de volume está acima do intervalo de confiança superior (zona de alta probabilidade – hachurado em cinza).

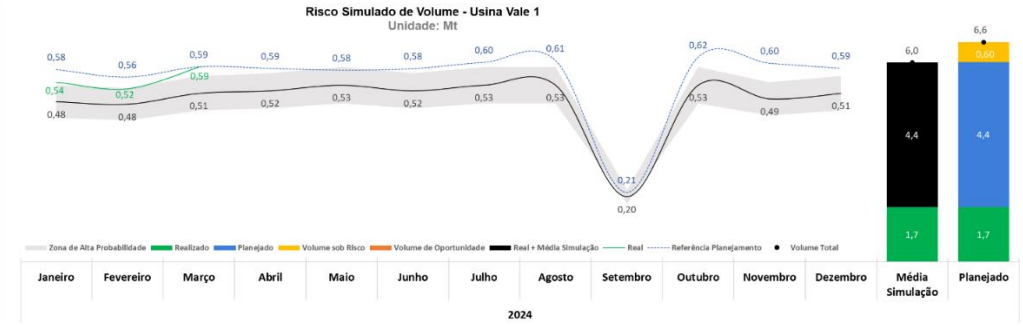



Figura 4: Região mais provável e volume sob risco do plano de Usina Vale 1

Com o intuito de traçar iniciativas que busquem mitigar/eliminar os riscos pautados na curva da Figura 4, foram alinhadas em conjunto com a área operacional/engenharia um plano de trabalho que visa atuar em ações correlacionadas com a premissa emblemática, taxa de alimentação. A Figura 5 apresenta a expectativa de mitigação dos riscos no decorrer do ano de 2024 e é possivel notar uma evolução ao longo do 1º trimestre da aderência ao volume realizado (linha contínua verde) com o plano e curva de captura (linha tracejada verde).

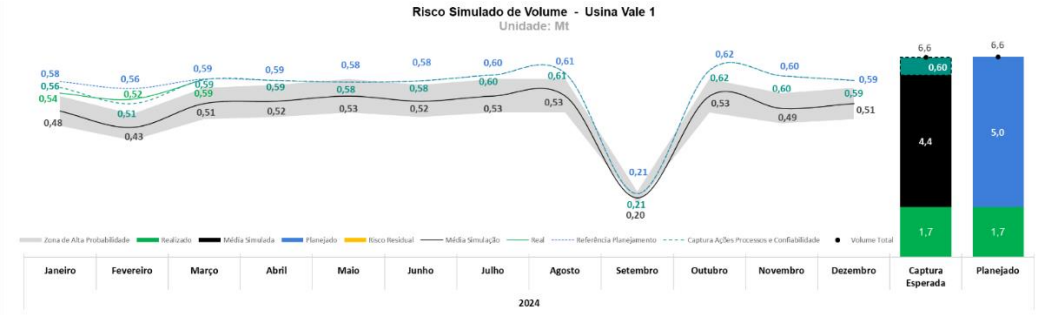



Figura 5: Região mais provável e volume sob risco do plano de Usina Vale 1 (considerando curva de captura)

### 3.2. Análise de gargalos

A análise de gargalos é crucial para identificar e resolver pontos de estrangulamento em processos produtivos, contribuindo para a otimização da eficiência operacional. Ao identificar onde a produção é interrompida ou reduzida, as empresas podem implementar estratégias para melhorar o fluxo de trabalho e maximizar a produtividade.

No caso específico deste trabalho, a análise de gargalos foi realizada por meio de um simulador de eventos discretos construído especificamente para usina Vale 1. Com base nos dados realizados ao longo do ano de 2023, as operações unitárias desta usina foram modeladas de forma a representar o funcionamento de cada uma delas no mundo real e desta forma tornar a análise de gargalos mais aderente à realidade.

Foram modelados britadores, grelhas. Peneiras, alimentadores e máquinas de pátio considerando como dados de entrada a sua taxa de alimentação, o tempo de processamento, suas paradas operacionais e suas paradas para manutenção corretiva e preventiva. A taxa de alimentação dos equipamentos, o intervalo entre as paradas para manutenção corretiva (MTBF – Mean Time Between Failure) e o tempo médio para reparação (MTTR – Mean Time to Repair) foram obtidos por meio do levantamento e tratamento estatístico dos dados realizados ao longo do ano de 2023.

**DOI:** 10.59254/sbpo-2024-193535
https://proceedings.science/p/193535?lang=pt-br

Esses dados, uma vez dispostos em formato de histograma, nos permitiram estabelecer a curva de distribuição de probabilidade que melhor se adaptaria a esses dados, ou seja, a que apresenta um melhor ajuste.

A Figura 6 apresenta um exemplo de ajuste de curva de distribuição de probabilidade para os dados de MTBF de um determinado equipamento da usina Vale 1. Já para o tempo de processamento, foram utilizados os dados de referência dos fabricantes desses equipamentos, de forma a representar a produtividade média esperada dos mesmos.

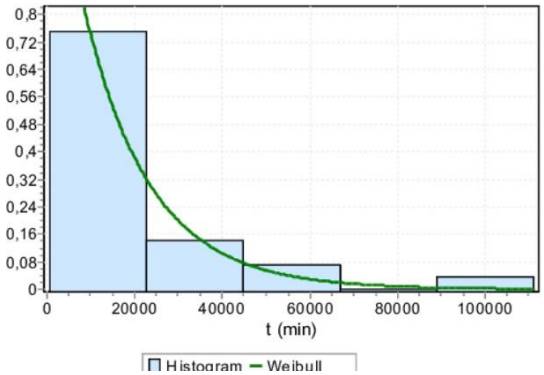



Figura 6: Ajuste de distribuição de probabilidade para os dados de MTBF de um dados equipamento

Uma vez modelados cada um dos equipamentos, eles foram dispostos de acordo com o fluxograma de processos da usina, representando a ordem das etapas de processamento. Todo o modelamento foi realizado a partir do software *Anylogic*, que é uma poderosa plataforma de simulação multimétodo que permite modelar e analisar sistemas complexos em diversos setores, como manufatura, logística, transporte e saúde. Sua abordagem inovadora e flexibilidade tornam o *AnyLogic* uma escolha popular para a simulação de processos e a tomada de decisões embasadas em dados. O fluxograma de processo da usina, pode ser visualizado na Figura 7, que representa o simulador desenvolvido como parte desta abordagem.

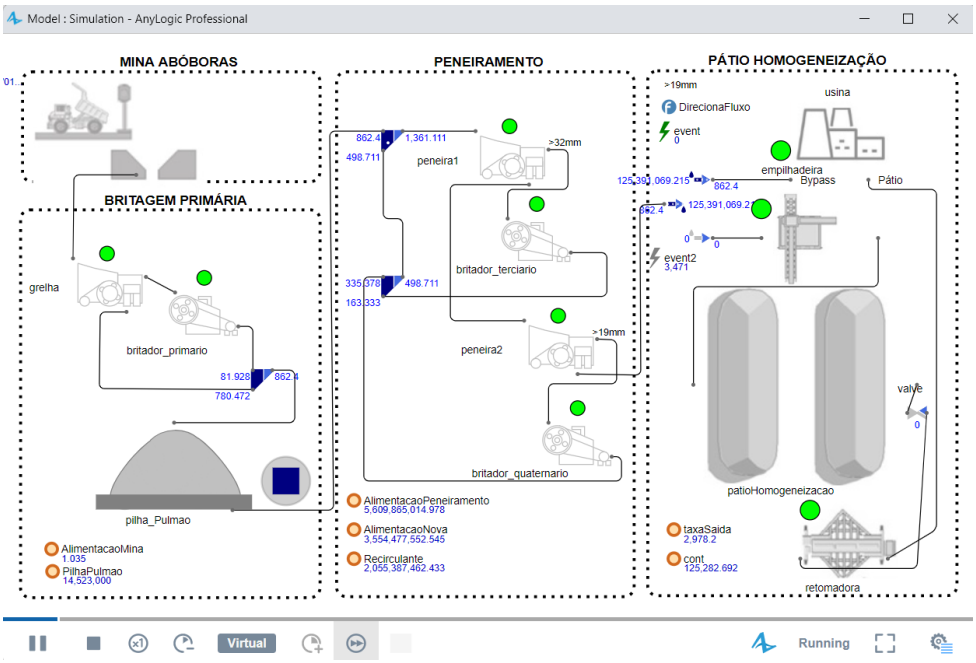



Figura 7: Fluxograma do processo de beneficiamento mineral da usina Vale 1

**DOI:** 10.59254/sbpo-2024-193535
https://proceedings.science/p/193535?lang=pt-br

Com o simulador de eventos discretos construído e validado, foram realizados experimentos que identificaram a ocorrência de três gargalos no processo de beneficiamento mineral, a saber: Taxa de alimentação da Mina, Britador Primário e Britador Terciário;

A identificação da taxa de alimentação foi realizada a partir do entendimento de que a alimentação histórica praticada ao longo do ano de 2023 era capaz de fornecer em média 2.000t/h de ROM, que é o material oriundo da mina, frente a uma capacidade instalada de 3.657t/h, fazendo com que a usina trabalhasse sempre com folga em suas instalações.

Um segundo experimento tomou como base o "afogamento" da britagem primária, ou seja, um fornecimento de ROM dentro da capacidade nominal da usina, exatamente para identificarmos o que aconteceria com a instalação industrial caso ela fosse alimentada em sua capacidade máxima. O resultado foi a migração do gargalo para a britagem primária, que apresentou elevado índice de falhas, comprometendo o atingimento da produtividade máxima da usina.

O terceiro experimento considerou a substituição do britador primário por outro que apresentasse maior confiabilidade, visto que por essa análise apenas, não pudemos identificar se as quebras do britador primário eram ocasionadas pelo tipo de material, por exemplo, ou se teriam outra causa. Este experimento apontou como gargalo o britador terciário, que desta vez apresentou-se como limitador ao atingimento da capacidade produtiva máxima da usina Vale1.

Já no quarto experimento, consideramos a substituição do britador terciário por um britador com maior confiabilidade, o que nos permitiu atingir a produtividade máxima da usina de beneficiamento mineral, que é de 10Mt/ano.

A Figura 8 mostra o fluxograma da usina Vale 1, com a identificação dos três gargalos mapeados através da simulação dinâmica.

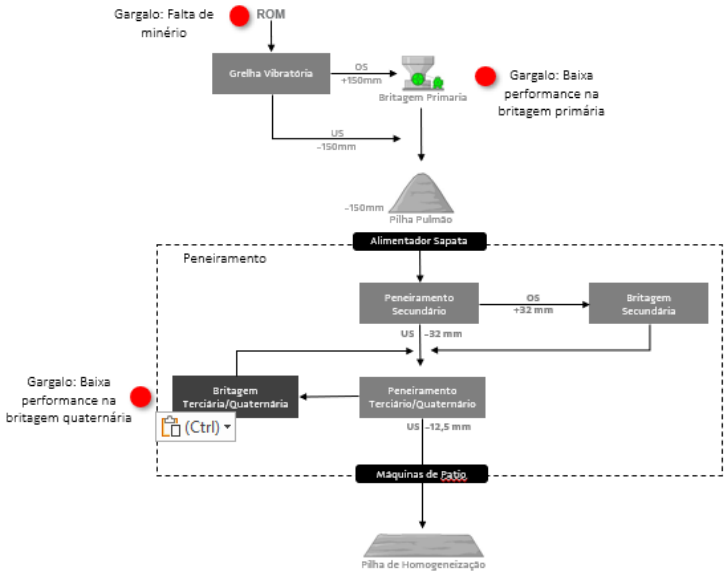



Figura 8: Mapa de gargalos da usina Vale 1

### 3.3. Análise de falhas

Com intuito de realizar uma análise de falha para entender as causas subjacentes em um sistema/equipamento, a fim de implementar medidas corretivas e/ou preventivas para evitar falhas futuras, foi realizado um estudo buscando identificar as causas raízes, visando prevenir recorrências de falhas, melhorar a confiabilidade, aumentar a segurança, otimizar a manutenção, reduzir custos, melhorar a qualidade e consequentemente dar suporte à tomada de decisão.

Para tal propósito foi utilizado o software ReliaSoft Weibull++, no módulo de Dados de Vida. Foi conduzido um estudo de probabilidade de falha futura para os eventos de manutenção corretiva dos ativos da usina que mais impactaram as perdas de volume no ano de 2023. O processo teve início com a avaliação das falhas dos ativos no ano de 2023 com base nos registros de manutenção no banco de dados. A partir desses dados de falhas, foi calculado o Tempo até a Falha

**DOI:** 10.59254/sbpo-2024-193535
https://proceedings.science/p/193535?lang=pt-br

(TTF) para cada ativo, e foram construídas as curvas de probabilidade de falhas, resultantes do agrupamento das falhas dos equipamentos e falhas mecânicas que causaram os maiores impactos nas perdas de produção. Os tempos até a falha de 4 britadores, 1 alimentador, 1 peneira e 1 grelha, coletados no período de 01/01/2023 a 31/12/2023, foram considerados, levando em conta apenas as falhas com MTTR que impactaram o processo, e agrupando falhas com tempo de reparo menor que 1 hora. Adicionalmente, tempos até a falha menores que 1 hora também foram agrupados para análise, conforme Tabela 2.

Tabela 2: Relatório de Probabilidade de falhas futuras

| Ativo | Falhas | Probabilidade de falha Condicional (% em dias) | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 15 | 30 | 60 | 90 |
| Britador-A | GERAL | 90% | 99% | 100% | 100% |
| | FALHAS.MECANICAS | 78% | 94% | 99% | 100% |
| | BAIXA.PRESS.SIST.HIDR. | 17% | 30% | 47% | 59% |
| | VAZAMENTOS | 25% | 46% | 74% | 88% |
| | QUEBRA.TRINCA.ABANADEIRA | 9% | 18% | 32% | 44% |
| | FIXAÇÃO.REVESTIMENTO | 31% | 52% | 77% | 88% |
| | SIST.HIDR. | 23% | 39% | 59% | 71% |
| Alimentador-A | GERAL | 93% | 99% | 100% | 100% |
| | FALHAS.MECANICAS | 87% | 97% | 100% | 100% |
| | CHUTE.DESCARGA | 9% | 16% | 28% | 38% |
| | SIST.LUBRIF. | 60% | 80% | 93% | 97% |
| | SIST.HIDR. | 33% | 87% | 94% | 97% |
| Grelha-A | BASES.ESTRUTURAS | 53% | 71% | 83% | 88% |
| Britador-B | GERAL | 91% | 99% | 100% | 100% |
| | FALHAS.MECÂNICAS | 86% | 97% | 100% | 100% |
| | TRAV.CONTRA.EIXO | 16% | 30% | 52% | 67% |
| | SIST.LUBRIF. | 6% | 13% | 29% | 45% |
| | SIST.HIDR. | 28% | 44% | 63% | 74% |
| | ACIONAMENTO | 1% | 5% | 29% | 70% |
| Peneira-A | GERAL | 1% | 1% | 3% | 4% |
| Britador-C | GERAL | 15% | 27% | 44% | 56% |
| | FALHAS.MECANICAS | 13% | 53% | 66% | 72% |
| Britador-D | GERAL | 60% | 77% | 90% | 94% |
| | FALHAS.MECANICAS | 20% | 36% | 61% | 76% |

A Tabela 2 mostra uma análise de falha futura direcionada pela premissa emblemática de risco, taxa de alimentação. Os ativos que apresentaram maiores chances de falhar corroboram com os modos de falhas que impactam diretamente a taxa de alimentação da usina.

Verifica-se que é mais provável que ocorra uma falha mecânica no Britador-A, Alimentador-A e Britador-B. Uma análise detalhada revela que é provável que ocorra uma falha na fixação/revestimento do Britador-A em até 60 dias. Para o Britador-B, há uma alta probabilidade de falha no sistema hidráulico dentro de 60 dias, enquanto para o Alimentador-A, a probabilidade é alta para falhas no sistema de lubrificação e no sistema hidráulico em 30 dias.

## 4. Conclusões

Este artigo abordou uma metodologia de mapeamento de gargalos baseada em simulação de Monte Carlo, Simulação de eventos discretos e análise de falhas para a identificação dos gargalos de uma usina de beneficiamento mineral. A partir de uma análise de risco de cumprimento de um plano de produção de um complexo minerário, pôde-se identificar como principal ofensor a taxa de alimentação daquele ativo.

Ao realizar uma análise mais aprofundada por meio de um simulador de eventos discretos, o gargalo taxa de alimentação foi confirmado como um dos principais responsáveis pelo não atingimento dos patamares de produção esperados para aquele ativo. No entanto uma dúvida acerca da capacidade do ativo para atingimento da produção esperada ainda pairava e um novo experimento foi realizado para que a seguinte pergunta pudesse ser respondida: “Se a taxa de

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193535
https://proceedings.science/p/193535?lang=pt-br

alimentação da usina Vale1 for reestabelecida para os padrões de alimentação esperados, a usina será capaz de produzir em sua capacidade nominal?".

Para responder a esta pergunta foi realizado um segundo experimento, considerando que desta vez os problemas relacionados a taxa de alimentação seriam solucionados e a usina seria alimentada com a sua taxa nominal. O resultado desta simulação apontou que mesmo regularizando a taxa de alimentação, não seria possível atingir o patamar de produção esperado de 10 Mt/ano, visto que o gargalo, neste experimento, apontou para a baixa confiabilidade do Britador Primário. Um terceiro experimento foi então realizado desta vez garantindo confiabilidade ao Britador Primário, esperando-se que desta vez a usina performasse em sua capacidade máxima. No entanto a simulação apontou para a movimentação do gargalo para a britagem terciária, também prejudicada por sua baixa confiabilidade. No quarto e último experimento, após um reestabelecimento do desempenho da britagem terciária, a usina performou conforme o esperado.

Ao analisarmos a análise de falhas futuras dos britadores, podemos identificar que a mesma aponta problemas mecânicos como sendo um dos principais ofensores ao desempenho desses britadores. Tal característica de falha pode apontar também para uma conclusão de que o tipo de material que alimenta esses britadores apresenta, por exemplo, alta compacidade, ou seja, dureza do material, fazendo com que esses ativos tenham que trabalhar sobrecarregados, apresentando falhas mecânicas, como sobrecarga no sistema hidráulico, quebra de material de revestimento e etc.

A metodologia apresentada neste artigo mostrou-se altamente eficiente para o mapeamento de gargalos e principalmente por fornecer subsídios que reforçam a incidência de falhas em determinadas fases do processo produtivo e que também apontem para novas hipóteses que não puderam ser testadas por meio desta abordagem.

**Referências**

Banks, J. and Carson, J.S. (1984) Discrete-Event System Simulation. Prentice-Hall, New Jersey, E.U.A.

Banks, J. (2000) Introduction to Simulation, Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference, Atlanta, E.U.A.

Borba Prá, e. A.(2010); Manutenção Industrial sob a Perspectiva da Manutenção Centrada em Confiabilidade (Mcc) Em uma Empresa da Área de Compressores Herméticos. 2010. Dissertação (Mestrado em Eng. Produção e Sistemas) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville - SC.

Carson, J.S (2000) Introduction to modeling and simulation, Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference, Washington, DC, E.U.A.

Crainic, T.G.; Laporte, G. (1997) Planning models for freight transportation, European Journal of Operational Research, n.97, p.409-438.

Fioroni, M.M.; Franzese, L.A.G.; Bianchi, T.J.; Ezawa, L.; Pinto, L.R.; Miranda JR.G. (2008) Concurrent simulation and optimization models for mining planning. Proceedings of Winter Simulation Conference 2008, Miami – FL, E.U.A..

Freitas, F.P.J.(2008) Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas com Aplicações em Arena. 2. ed. Florianopolis.

Kardec, A.; Nascif, J. A.(2001); Manutenção – Função Estratégica. 2ed. - Rio de Janeiro: Qualitymark.

**DOI:** 10.59254/sbpo-2024-193535
https://proceedings.science/p/193535?lang=pt-br

Kelton, W.D.; Sadowsky, R.P.; Sadowsky D.A (2009). Simulation with Arena, 5 Ed. McGraw-Hill. Boston, Massachusetts, E.U.A.

Knepell, P.L.; Arangno, D.C (1993). Simulation validation: a confidence assessment methodology, IEEE Computer Society Press.

Lafraia, J. R. B.(2001); Manual de Confiabilidade, Mantenabilidade e Disponibilidade. Rio de Janeiro: Qualitymark.

Law, A.M.; Kelton, W.D. (2014) Simulation Modeling and Analysis, 5 ed., New York, McGraw-Hill Companies Inc.

Luxburg V. L., Schölkopf B. (2011), Statistical Learning Theory: Models, Concepts, and Results, North-Holland, Volume 10, 2011, Pages 651-706, ISSN 1874-5857, ISBN 9780444529367.

Moubray, J.(1998); Reliability-Centred Maintenance. Editora: Rio de Janeiro.

Nascimento F. C. G., Narciso M. A. (2011), Avaliação de Investimento Utilizando Simulação de Monte Carlo: um estudo de caso em uma empresa multinacional do setor siderúrgico, Trabalho de Conclusão de Curso do MBA Executivo em Controladoria e Finanças, FUCAPE.

Oliver C. Ibe (2013), Markov Processes for Stochastic Modeling (Second Edition), Elsevier, 2013, Pages 1-27, ISBN 9780124077959.

Pedgen, C.D; Shannon, R.E.; Sadowski, R.P (1995). Introduction to Simulation Using SIMAN. McGraw Hill.

Pidd, M. (1998) Modelagem Empresarial: Ferramentas para Tomada de Decisão; Ed. Artes Médicas Sul: Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

Puente, J.; Pino, R.; Priore, P.; La Fuente, D. de (2002). A Decision Support System for Applying Failure Mode and Effects Analysis. International Journal of Quality & Reliability Management, v.19, n.2, p.137-150.

Sharma, R. K.; Sharma, P. (2010); Methodology and Theory System Failure Behavior and Maintenance Decision Making UsingRCA, FMEA and FM. Journal of Quality in Maintenance Engineering. v.16, n. 1, p. 64-88.

Siqueira, I. P. (2009); Manutenção Centrada na Confiabilidade – Manual de Implementação. Editora Quality Mark. 1ª ed.

**DOI:** 10.59254/sbpo-2024-193535
https://proceedings.science/p/193535?lang=pt-br