



# Simulação dinâmica e otimização de uma usina de agregados

---

Thales Santiago Medeiros Gama

## Monografia em Engenharia Química

### Orientadores

Maurício Bezerra de Souza Jr., D.Sc.

Luís Marcelo Marques Tavares, Ph.D.

Rodrigo Magalhães de Carvalho, D.Sc.

Rio de Janeiro

Fevereiro de 2020

# **Simulação dinâmica e otimização de uma usina de agregados**

*Thales Santiago Medeiros Gama*

Monografia em Engenharia Química submetida ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharelado em Engenharia Química.

Aprovado por:

---

Argimiro Resende Secchi, D.Sc.

---

Ladimir José de Carvalho, D. Sc

Orientado por:

---

Maurício Bezerra de Souza Jr., D. Sc

---

Luís Marcelo Marques Tavares, Ph.D.

---

Rodrigo Magalhães de Carvalho, D. Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Fevereiro de 2020

Ficha Catalográfica

Gama, Thales Santiago Medeiros; Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2020

Simulação dinâmica e otimização de uma usina de agregados/ Thales Santiago Medeiros Gama. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2020

VII, 73.; il.

Orientadores: Maurício Bezerra de Souza Jr. e Luís Marcelo Marques Tavares e Rodrigo Magalhães de Carvalho.

1. Usina de agregados. 2. Modelagem 3 Simulação. 4. Otimização. 5. MatLab/Simulink. 6. Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ). 7. Maurício Bezerra de Souza Jr. e Luís Marcelo Marques Tavares e Rodrigo Magalhães de Carvalho. I. Simulação dinâmica e otimização de uma usina de agregados

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer aos meus pais, Flávio e Letícia, pois sem o apoio e amor dado por eles nenhuma das minhas conquistas seria possível.

Ao professor Luís Marcelo, pela oportunidade de trabalhar neste projeto, onde pude aprender e aprimorar minhas habilidades.

Ao professor Rodrigo, por todo o auxílio recebido ao longo deste trabalho, além da paciência e pelas valiosas dicas e conselhos.

Ao professor Maurício, por aceitar o desafio da orientação e acreditar no meu potencial.

Resumo da Monografia apresentada à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção de grau de Bacharelado em Engenharia Química.

## **Simulação dinâmica e otimização de uma usina de agregados**

Thales Santiago Medeiros Gama

Fevereiro, 2020

Orientadores: Prof. Maurício Bezerra de Souza Jr.

Prof. Luís Marcelo Marques Tavares

Prof. Rodrigo Magalhães de Carvalho

As usinas de agregados são um segmento importante que alimenta o mercado de construção civil no Brasil. O custo energético dessas usinas é muito alto e seu produto de baixo valor agregado, portanto, é necessário otimizar a produção de tais usinas, sem prejudicar a qualidade do produto final e reduzindo os custos energéticos da usina. Para tal, a modelagem e simulação são algumas das ferramentas mais adequadas para atingir tal objetivo, devido ao desenvolvimento tecnológico dos computadores e à melhor compreensão dos fenômenos físicos dos processos e operações unitárias presentes nas usinas de agregados. Este trabalho trata da implementação de modelos matemáticos de operações unitárias relevantes às operações de usina de agregados e ainda propõe a simulação e otimização da usina de agregados da Mineração Santa Luzia, localizada em Itaguaí, no estado do Rio de Janeiro, com intuito de aumentar a produtividade da usina, aumentando também a sua eficiência energética. Foram realizados ajuste de parâmetros para o modelo de peneiramento, implementação de códigos em plataforma Matlab/Simulink, modelagem de uma usina de agregados, assim como uma análise de sensibilidade e otimização dessa usina. O método de otimização é capaz de aumentar a produtividade da usina em 22,3% e reduzir a energia específica em 10%, ao alterar as aberturas em posição fechada dos britadores de (54; 30; 20) para (57,3; 27,2; 21,5), em vistas dos custos de produção e preço dos produtos da usina, sem alterar a qualidade dos produtos.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	VII
LISTA DE TABELAS .....	IX
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVO.....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
<b>3.1 Peneiramento industrial.....</b>	<b>4</b>
3.1.1 Modelagem matemática do peneiramento .....	5
3.1.2 Curvas de partição .....	5
3.1.3 Modelo de Karra .....	6
3.1.4 Modelo de eficiência de Whiten .....	10
<b>3.2 Britagem .....</b>	<b>11</b>
3.2.1 Modelo de quebra.....	13
3.2.2 A função quebra.....	14
3.2.3 Modelagem da Potência dos Britadores .....	15
<b>3.3 Modelagem das pilhas-pulmão.....</b>	<b>16</b>
<b>3.4 Modelagem das correias transportadoras.....</b>	<b>17</b>
<b>3.5 Modelagem e Simulação de usina de agregados .....</b>	<b>18</b>
3.5.1 Usina de britagem de agregados .....	19
3.5.2 Descrição do processo de britagem da usina Santa Luzia.....	20
3.5.3 Britagem.....	20
3.5.4 Peneiramento .....	23
3.5.5 Estratégia de controle .....	23
3.5.6 Preço da energia elétrica para a indústria no Brasil.....	26
3.5.7 Introdução de eventos estocásticos e paradas programadas.....	28
<b>3.6 Métodos numéricos e otimização .....</b>	<b>28</b>
<b>3.7 O método dos poliedros flexíveis .....</b>	<b>29</b>
4 METODOLOGIA.....	32
<b>4.1 Simulação do caso base da usina de agregados Santa Luzia .....</b>	<b>32</b>
4.1.1 Integrador .....	32
4.1.2 Função quebra .....	33

4.1.3	Pilha pulmão .....	34
4.1.4	Britadores.....	35
4.1.5	Peneiramento .....	36
4.1.6	Correias Transportadoras.....	36
4.1.7	Estudo de caso .....	37
<b>4.2</b>	<b>Introdução de eventos estocásticos e paradas programadas .....</b>	<b>37</b>
<b>4.3</b>	<b>Ajuste dos parâmetros do modelo de Karra .....</b>	<b>38</b>
<b>4.4</b>	<b>Análise de sensibilidade .....</b>	<b>39</b>
<b>4.5</b>	<b>Otimização da usina de agregados .....</b>	<b>40</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>42</b>
<b>5.1</b>	<b>Ajuste de parâmetros do modelo de Karra.....</b>	<b>42</b>
<b>5.2</b>	<b>Fluxograma e caso base da usina Santa Luzia.....</b>	<b>43</b>
<b>5.3</b>	<b>Análise de sensibilidade .....</b>	<b>46</b>
<b>5.4</b>	<b>Otimização da usina de agregados .....</b>	<b>49</b>
<b>5.5</b>	<b>Introdução de eventos estocásticos.....</b>	<b>50</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>52</b>
<b>7.</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>53</b>
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>54</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1-Peneira vibratória de três deques .....	4
Figura 3.2-Curva de partição ideal e curva de partição corrigida para hidrociclones (Tavares, 2009).....	6
Figura 3.3-Britador cônico industrial .....	12
Figura 3.4-Alimentação do britador tipo VSI.....	12
Figura 3.5- Diagrama esquemático ilustrando as condições de abertura em posição aberta (APA) e fechada (APF) de um britador de mandíbulas (adaptado de KING, 2001).....	13
Figura 3.6-Diagrama esquemático do modelo de britagem desenvolvido por Whiten ( Adaptado de Napier-Munn et al, 1996).....	13
Figura 3.7-Pilha pulmão .....	17
Figura 3.8 – Os princípios de uma correia transportando o material a uma altura $hc$ (Adaptado de Asbjörnsson, 2014). .....	18
Figura 3.9-Fluxograma da usina de britagem da Mineração Santa Luzia.....	20
Figura 3.10-- Dinâmica de pilhas para o caso ótimo simulado, onde as faixas em verde indicam a operação do britador secundário e as faixas em vermelho representam os períodos no qual o mesmo se encontra ocioso (Adaptado de Miceli, 2019).....	26
Figura 3.11-Possíveis configurações após uma etapa do método dos poliedros flexíveis para o caso tridimensional (Adaptado de Deliberato Neto, 2007) .....	31
Figura 4.1-Relação entre $t_{10}$ e vários $t_{ns}$ para reconstrução da granulometria completa para a quebra de partículas individuais (Tavares & Neves, 2008). .....	34
Figura 4.2-Modelagem das pilhas-pulmão (Interface Matlab/Simulink) .....	35
Figura 4.3- Correia TC-16 da usina de agregados Santa Luzia.....	37
Figura 4.4-Lógica para a parada das correias utilizando o diagrama de blocos do Simulink. ....	38
Figura 5.1-Curva de partição para o modelo de eficiência e modelo de Karra para o primeiro e segundo deques da peneira PV3PV4 .....	42
Figura 5.2-Curva de partição para o modelo de eficiência e modelo de Karra para o primeiro e segundo e terceiro deques da peneira PV5PV6 .....	42
Figura 5.3-Curva de partição para o modelo de eficiência e modelo de Karra para o primeiro e segundo deques da peneira PV7.....	43
Figura 5.4-Fluxograma da usina Santa Luzia em interface MatLab/Simulink. Os blocos azuis representam as correias transportadoras; os blocos cinzas representam as pilhas-pulmão, os blocos verde-escuros representam as peneiras, os blocos verde-claros são	



sensores responsáveis por exibir informações durante a simulação e os blocos marrom, verde-água e magenta representam os britadores S4000, HP300 e HP200/VSI, respectivamente. ....	44
Figura 5.5-Dinâmica do nível das pilhas do caso base.....	45
Figura 5.6-Dinâmica do P80 dos produtos das peneiras PV5PV6 e PV7 do caso base .	45
Figura 5.7-Consumo energético acumulado dos britadores no caso base .....	46
Figura 5.8 – Desenvolvimento da função objetivo ao longo das iterações .....	50
Figura 5.9-Dinâmica de pilhas para o caso em que é detectado metal na TC-05 durante a operação da usina.....	51
Figura 5.10- Dinâmica de pilhas para uma operação usual, sem eventos estocásticos ou paradas programadas. ....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1-Composição química do minério de Santa Luzia por espectrometria de fluorescência de raios-X. Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> é o total de óxidos de ferro da amostra e LOI é a perda por ignição (Adaptado de Tavares & Neves, 2008). .....	15
Tabela 3.2-Preços dos produtos da usina Santa Luzia (comunicação pessoal).....	19
Tabela 3.3- Parâmetros utilizados na função classificação dos britadores (Miceli, 2019) .....	21
Tabela 3.4- Parâmetros dos britadores (Miceli, 2019) .....	21
Tabela 3.5 <i>Appearance function</i> utilizada para a definição da função quebra (Miceli, 2019).....	21
Tabela 3.6-Potência dos motores acoplados aos britadores utilizados na usina Santa Luzia. Cada britador contém apenas um motor, com exceção do VSI, que necessita de dois motores para operar.....	22
Tabela 3.7-Parâmetros para o modelo de potência dos britadores da usina Santa Luzia (Miceli, 2019).....	22
Tabela 3.8-Parâmetros da rocha processada na usina Santa Luzia.....	23
Tabela 3.9- Parâmetros para o modelo de peneiramento (Miceli, 2019) .....	23
Tabela 3.10 – Diferentes lógicas possíveis de ocorrer durante a operação e as respectivas ações de controle a serem tomadas (Adaptado de Miceli, 2019). .....	24
Tabela 3.11-Granulometria da alimentação do S4000 para o caso base .....	25
Tabela 3.12-Significado de cada acrônimo para o cálculo do custo de energia (ANEEL, 2019).....	27
Tabela 3.13-Parâmetros das modalidades verde e azul para o cálculo da tarifa de energia elétrica (ANEEL, 2019).....	28
Tabela 4.1-Especificações do computador utilizado para as simulações .....	33
Tabela 4.2-Entradas e saídas do modelo da pilha pulmão.....	35
Tabela 4.3-Entradas e saídas do modelo de potência dos britadores.....	35
Tabela 4.4-Entradas e saídas do modelo de britagem .....	36
Tabela 4.5-Parâmetros das peneiras vibratórias .....	36
Tabela 4.6-Parâmetros ajustados do modelo de Karra .....	39
Tabela 4.7-Casos avaliados na análise de sensibilidade.....	39
Tabela 5.1-Resultados para a análise de sensibilidade, parada não programada e caso otimizado .....	47

Tabela 5.2- Disponibilidade dos britadores para a análise de sensibilidade, parada não programada e caso otimizado .....	48
Tabela 5.3-Consumo energético dos equipamentos para a análise de sensibilidade, parada não programada e caso otimizado .....	48
Tabela 5.4- Energia específica, em kWh/t, para os casos estudados.....	49
Tabela 5.5 -Estimativas iniciais e valores finais após a convergência do método dos poliedros flexíveis .....	49
Tabela 3.1-Composição química do minério de Santa Luzia por espectrometria de fluorescência de raios-X. Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> é o total de óxidos de ferro da amostra e LOI é a perda por ignição (Adaptado de Tavares & Neves, 2008). .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Tabela 3.2-Preços dos produtos da usina Santa Luzia (comunicação pessoal).....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Tabela 3.3- Parâmetros utilizados na função classificação dos britadores (Miceli, 2019) .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Tabela 3.4- Parâmetros dos britadores (Miceli, 2019) .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Tabela 3.5 <i>Appearance function</i> utilizada para a definição da função quebra (Miceli, 2019).....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Tabela 3.6-Potência dos motores acoplados aos britadores utilizados na usina Santa Luzia. Cada britador contém apenas um motor, com exceção do VSI, que necessita de dois motores para operar.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Tabela 3.7-Parâmetros para o modelo de potência dos britadores da usina Santa Luzia (Miceli, 2019).....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Tabela 3.8-Parâmetros da rocha processada na usina Santa Luzia	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Tabela 3.9- Parâmetros para o modelo de peneiramento (Miceli, 2019)	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Tabela 3.10 – Diferentes lógicas possíveis de ocorrer durante a operação e as respectivas ações de controle a serem tomadas (Adaptado de Miceli, 2019).	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Tabela 3.11-Granulometria da alimentação do S4000 para o caso base	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
Tabela 3.12-Significado de cada acrônimo para o cálculo do custo de energia (ANEEL, 2019).....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>

Tabela 3.13-Parâmetros das modalidades verde e azul para o cálculo da tarifa de energia elétrica (ANEEL, 2019).....**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 4.1-Especificações do computador utilizado para as simulações**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 4.2-Entradas e saídas do modelo da pilha pulmão**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 4.3-Entradas e saídas do modelo de potência dos britadores**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 4.4-Entradas e saídas do modelo de britagem .....**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 4.5-Parâmetros das peneiras vibratórias .....**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 4.6-Parâmetros ajustados do modelo de Karra .....**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 4.7-Casos avaliados na análise de sensibilidade...**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.1 -Estimativas iniciais e valores finais após a convergência do método dos poliedros flexíveis .....**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.2-Resultados para a análise de sensibilidade, parada não programada e caso otimizado .....**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.3- Disponibilidade dos britadores para a análise de sensibilidade, parada não programada e caso otimizado .....**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.4-Consumo energético dos equipamentos para a análise de sensibilidade, parada não programada e caso otimizado .....**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.5- Energia específica, em kWh/t, para os casos estudados**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 3.1-Composição química do minério de Santa Luzia por espectrometria de fluorescência de raios-X.  $Fe_2O_3$  é o total de óxidos de ferro da amostra e LOI é a perda por ignição (Adaptado de Tavares & Neves, 2008). .....**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 3.2-Preços dos produtos da usina Santa Luzia (comunicação pessoal).....**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 3.3- Parâmetros utilizados na função classificação dos britadores (Miceli, 2019) .....**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 3.4- Parâmetros dos britadores (Miceli, 2019) .....**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 3.5 *Appearance function* utilizada para a definição da função quebra (Miceli, 2019).....**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 3.6-Potência dos motores acoplados aos britadores utilizados na usina Santa Luzia. Cada britador contém apenas um motor, com exceção do VSI, que necessita de dois motores para operar.....**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 3.7-Parâmetros para o modelo de potência dos britadores da usina Santa Luzia (Miceli, 2019).....**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 3.8-Parâmetros da rocha processada na usina Santa Luzia**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 3.9- Parâmetros para o modelo de peneiramento (Miceli, 2019)**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 3.10 – Diferentes lógicas possíveis de ocorrer durante a operação e as respectivas ações de controle a serem tomadas (Adaptado de Miceli, 2019).**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 3.11-Granulometria da alimentação do S4000 para o caso base**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 3.12-Significado de cada acrônimo para o cálculo do custo de energia (ANEEL, 2019).....**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 3.13-Parâmetros das modalidades verde e azul para o cálculo da tarifa de energia elétrica (ANEEL, 2019).....**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 4.1-Especificações do computador utilizado para as simulações**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 4.2-Entradas e saídas do modelo da pilha pulmão**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 4.3-Entradas e saídas do modelo de potência dos britadores**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 4.4-Entradas e saídas do modelo de britagem .....**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 4.5-Parâmetros das peneiras vibratórias .....**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 4.6-Dados de velocidade e comprimento das correias transportadoras.....**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 4.7-Parâmetros ajustados do modelo de Karra .....**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 4.8-Casos avaliados na análise de sensibilidade...**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.1 -Estimativas iniciais e valores finais após a convergência do método dos poliedros flexíveis .....**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.2-Resultados para a análise de sensibilidade, parada não programada e caso otimizado .....**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.3- Disponibilidade dos britadores para a análise de sensibilidade, parada não programada e caso otimizado .....**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 5.4-Consumo energético dos equipamentos para a análise de sensibilidade, parada não programada e caso otimizado .....**Erro! Indicador não definido.**



## **LISTA DE ABREVIATURAS**

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

APA - Abertura de posição

APF - Abertura de posição fechada

brita00, brita0, brita1, brita 2 e pó de pedra – produtos gerados pela usina de agregados Santa Luzia

C A4 dist - Custo médio da energia elétrica para os consumidores A4

HP200 - britador quaternário da usina Santa Luzia

HP300 - britador terciário da usina Santa Luzia

P80 - Tamanho de partícula menor ou igual a 80% da distribuição granulométrica acumulada

S4000 - britador secundário da usina Santa Luzia

T10 - Porcentagem passante na malha de 1/10 de tamanho inicial da partícula

TEAFp - Tarifa de energia da modalidade azul para o horário fora de ponta

TEAp - Tarifa de energia da modalidade azul para o horário de ponta

TEVFp - Tarifa de energia da modalidade verde para o horário fora de ponta

TEVP - Tarifa de energia da modalidade verde para o horário de ponta

TUSD Afp - Tarifa de uso do sistema de distribuição da modalidade azul para horário fora de ponta

TUSD Ap - Tarifa de uso do sistema de distribuição da modalidade azul para horário de ponta

TUSD VFp - Tarifa de uso do sistema de distribuição da modalidade verde para horário fora de ponta

TUSD Vp - Tarifa de uso do sistema de distribuição da modalidade verde para horário de ponta

VSF - Vertical shaft impact, ou britador de impacto vertical

## LISTA DE SÍMBOLOS LATINOS

$A$  - Capacidade básica da peneira

$A_{ore}$  e  $b_{ore}$  - Parâmetros de dureza do minério

$A_p$  - Fator de escala do modelo de potência dos britadores

$B$  - Fator de oversize

$B_q$  - Vetor quebra do modelo de britagem

$C$  - Fator de tamanho de meia malha

$c(dp)$  - Fração mássica de material em dado intervalo na alimentação que será reportado ao oversize

$C(x)$  - Probabilidade de uma partícula de tamanho  $x$  ser reportada para quebra

$cdp_{Eff}$  - Curva de partição do modelo de eficiência

$cdp_{Karra}$  - Curva de partição do modelo de Karra

$cst$  - Preço médio da energia elétrica para a indústria no estado do Rio de Janeiro

$D$  - Fator de localização de deque

$d50$  - Tamanho de partícula que corresponde a 50% do passante acumulado

$dp$  - Tamanho representativo de partícula

$dw$  - Espessura do fio da malha

$E$  - Fator de peneiramento à úmido

$E_{cst10}$  - Energia específica de cominuição

$E_{oa}$  - Eficiência reportada para o overflow do modelo de eficiência

$F$  - Fator densidade do bulk

$fob2$  - Função objetivo para a otimização da usina de agregados

$fobj$  - Função objetivo para o ajuste dos modelos de peneiramento

$freq$  - Frequência de rotação do VSI

$g$  - Aceleração da gravidade

$G_c$  - Fator *near size*

$h$  - Abertura nominal da malha

$hc$  - Diferença de altura a qual o material é submetido pela correia transportadora

$h_{drop}$  - Altura a partir da qual o material é despejado na correia

$h_T$  - Abertura efetiva da malha

$I$  - Matriz identidade

$K$  - Coeficiente do modelo de Karra

$K1, K2, K3$  - Parâmetros da função de classificação para o modelo de britagem



$Kq, n1, n2$  - Parâmetros do vetor quebra para o modelo de britagem

$OA$  - Capacidade básica ajustada da peneira

$p$  - Granulometria do produto de britagem

$p$  - Granulometria do produto do modelo de britagem

$P(dp)$  - Fração de passante acumulado menor ou igual ao tamanho representativo  $dp$

$P_c$  - Potência do britador operando em cheio

$pdt$  - Produção de cada um dos produtos finais da usina ao fim de 8h de operação, em toneladas

$p^F$  - Granulometria da alimentação da peneira

$P_{load}$  - Potência consumida da correia transportadora

$P_n$  - Potência do britador operando em vazio

$p^o$  - Granulometria do produto reportado para o oversize

$pow$  - Energia consumida, em kWh, de cada equipamento e correia transportadora

$P_p$  - Potência do pêndulo

$p_{rt}$  - Preço de cada um dos produtos gerados na usina de agregados

$p^u$  - Granulometria do produto reportado para o undersize

$v$  - Velocidade da esteira da correia

$W$  - Vazão mássica do produto reportado para o undersize

$W^F$  - Vazão mássica da alimentação da peneira

$W^o$  - Vazão mássica do produto reportado para o oversize

$x$  - Tamanho reduzido

$xf$  - Partículas originárias da partícula mãe no modelo de quebra

$y$  - Partícula mãe

$y_{vsi}$  - Capacidade do britador VSI

## LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

$\alpha$  - Parâmetro de eficiência de separação do modelo de eficiência

$\eta_{tot}$  - Eficiência energética da correia transportadora

$\theta$  - Ângulo de inclinação do deque da peneira

$\rho_B$  - Densidade do minério

## 1 Introdução

O projeto de circuitos de cominuição baseia-se em simulações acuradas de plantas industriais. Usinas de britagem são projetadas para atingir uma determinada produtividade com especificações definidas (por exemplo, certa distribuição de tamanhos de partículas) enquanto operam com custo e consumo de energias razoáveis.

A britagem de agregados é a primeira etapa de cominuição nas usinas de processamento mineral. Esta etapa é responsável também por grande parte do consumo energético das usinas e pela redução de tamanhos das partículas processadas. É uma etapa fundamental nos processos de cominuição. Portanto faz-se necessário estudar e avaliar seus parâmetros de operação para maximizar seu desempenho, levando em consideração as restrições de capacidade e a vida útil do revestimento dos britadores. Por isso, a etapa de cominuição, ao ser associada às ferramentas de simulação, pode alcançar grandes benefícios, pois permite antecipar a existência de possíveis gargalos e deficiências derivadas de operações não otimizadas de seus parâmetros e equipamentos periféricos (King, 2012).

Segundo Napier-Munn (1992), fabricantes de equipamentos e projetistas utilizam pacotes computacionais para prever o desempenho das usinas de britagem. Existem inúmeros pacotes computacionais disponíveis que são capazes de prever o desempenho de tais circuitos. O tipo de simulação de circuitos de britagem de agregados mais utilizado são as simulações estáticas ou estacionárias, o que implica que o sistema é considerado em equilíbrio e que todas as derivadas em relação ao tempo são nulas. Alguns exemplos de simuladores estacionários são: Plantdesigner (Sandvik), Bruno (Metso), JKSimMet (JKSimMet), Aggflow (BedRock Solution) e UsimPac (Caspeo).

Modelos dinâmicos incorporam características do processo que são dependentes do tempo e são capazes de refletir a resposta dinâmica do processo a um determinado distúrbio. Segundo Napier-Munn e Lynch (1991), tais modelos podem ser usados para o desenvolvimento de sistemas de controle, projeto de equipamentos e treinamento de operadores; e geralmente requerem maior desempenho computacional se comparado com os simuladores estacionários. Alguns exemplos de plataformas para simulações dinâmicas são Simulink (Mathworks), EMSO (Projeto ALSOC), SysCAD (Kenwalt), Aspen Dynamics (AspenTech) e Dymola (Dassault Systèmes). Entretanto, nenhuma das

plataformas citadas foi desenvolvida com foco em circuitos de britagem de agregados que, em grande maioria dos casos, não opera em regime permanente.

A demanda por qualidade na produção de usinas de agregados tem aumentado em todo o mundo. Como resultado, o uso de técnicas de modelagem e simulação de usinas de agregados está se tornando popular na indústria de agregados nas últimas décadas (Tavares & Neves, 2008).

Apesar de processos de modo geral experimentarem condições características de estado estacionário sob determinadas circunstâncias, é inaccurado afirmar que o sistema está em estado estacionário em todos os momentos de operação. A operação de britagem é um processo contínuo; e, como um sistema contínuo, equipamentos estão sujeitos a variações e mudanças ao longo do tempo. Tais variações ocorrem devido ao desgaste dos equipamentos, eventos estocásticos e variações naturais na alimentação do processo (Asbjörnsson, 2013).

O capítulo 2 apresenta os objetivos deste trabalho; o capítulo 3 discorre a respeito da revisão bibliográfica, assim como os termos e expressões que serão usados ao longo do texto; o capítulo 4 trata da metodologia, apresentando a maneira como a implementação dos modelos ocorreu, assim como os parâmetros utilizados; o capítulo 5 apresenta os resultados e discussões a respeito da análise de sensibilidade, ajuste de parâmetros e otimização de uma usina de agregados; o capítulo 6 apresenta as conclusões deste trabalho à luz dos resultados e discussões apresentados; o capítulo 7 sugere passos futuros capazes de aprimorar o trabalho.

## **2 Objetivo**

O objetivo do presente trabalho é implementar modelos matemáticos em *software* MatLab/Simulink, com o objetivo de modelar e simular usinas de agregados e suas operações inerentes. Além disso, tal simulação servirá de ferramenta para um estudo de caso e otimização de uma usina de agregados.

### 3 Revisão Bibliográfica

Nesta seção os conceitos envolvidos nos processos de britagem e classificação em usinas de agregados são discutidos. Apresenta-se uma referência bibliográfica referente aos modelos matemáticos aplicados, ao controle e automação das instalações de uma usina à otimização de processos industriais.

#### 3.1 Peneiramento industrial

A classificação consiste em separar populações de partículas de acordo com suas características. No caso de usinas de britagem, o material é separado em diferentes faixas de tamanhos de acordo com o seu destino. A peneira vibratória é o equipamento responsável por promover tal separação nas usinas de britagem, dividindo o fluxo material em diferentes faixas de tamanho. A separação se dá pela inclinação do deque da peneira, que juntamente com o movimento vibratório, promove a separação das partículas e eventual classificação dos finos através das aberturas da tela da peneira (Wills & Napier-Munn, 2006). A figura 3.1 apresenta uma peneira industrial de três deques.



Figura 3.1-Peneira vibratória de três deques

### 3.1.1 Modelagem matemática do peneiramento

#### 3.1.2 Curvas de partição

Na prática, nem todos os finos são transmitidos devido a diversos fatores físicos que prejudicam a eficiência da peneira. Este efeito é descrito pela curva de partição da peneira.

A curva de partição representa a probabilidade de uma partícula de determinado tamanho representativo ser reportada ao oversize. É uma função complexa dependente das propriedades das partículas e a ação de classificação do equipamento estudado. A função de classificação  $c(dp_i)$  é definida como a fração mássica de material em dado intervalo de tamanho  $i$  na alimentação que será reportado ao oversize. Diversas formas de funções estão disponíveis para descrever esse efeito, e Karra sugere a curva de partição do tipo Rosin-Rammler (King, 2012):

$$c(d_p) = 1 - \exp\left(-0.693\left(\frac{d_p}{d_{50}}\right)^{5.9}\right) \quad 3.1$$

A equação 3.1 calcula a eficiência de transferência de partículas de tamanho  $dp$  para o oversize.

O parâmetro que determina o ajuste da separação é o  $d_{50}$ . Valores de  $d_{50}$  maiores que o tamanho da malha resultam em altas eficiências e vice-versa.

Além disso, nota-se que, nos sistemas reais, parte do material que deveria ser reportado ao underflow é encontrado no overflow. Tal efeito é conhecido como curto-circuito e é bastante comum em diversos tipos de classificadores, principalmente em ciclones. Este fenômeno é bem representado pela curva de eficiência corrigida, que se trata de uma adaptação da curva de partição para representar a fração mássica que deveria ser reportada ao underflow mas fica retida no overflow (Napier-Munn, 1996). A Figura 3.2 apresenta a curva de partição ideal e com curto circuito.

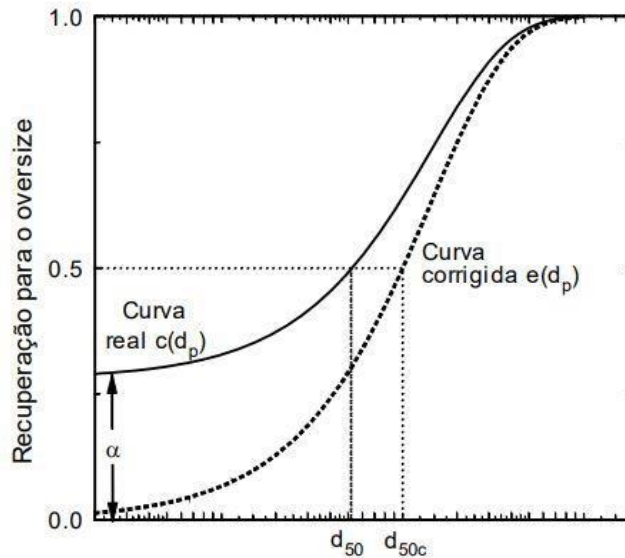


Figura 3.2-Curva de partição ideal e curva de partição corrigida para hidrociclones (Tavares, 2009)

### 3.1.3 Modelo de Karra

O modelo de Karra é um modelo empírico para o peneiramento realizado em peneiras vibratórias de deques inclinados e movimento circular. O fato de o modelo de Karra não necessitar de dados experimentais é sua maior vantagem e também sua maior fraqueza. O próprio autor admite que variáveis como a frequência de oscilação, material constituinte da tela da peneira, o formato da tela e o tipo de movimento da peneira podem interferir na qualidade dos resultados dos modelos frente aos dados experimentais, mas não detalha tais interferências (King, 2011).

O modelo de Karra baseia o desempenho da peneira na abertura efetiva da malha, que é calculada como:

$$h_T = (h + d_w) * \cos(\theta) - d_w \quad 3.2$$

Na qual  $d_w$  é o diâmetro do fio em mm,  $h$  é a abertura nominal da peneira em mm e  $\theta$  é o ângulo de inclinação do deque em graus.

A capacidade básica é determinada pela abertura nominal através da abertura efetiva da tela como a medida apropriada de abertura da malha:



$$A = 12.13h_T^{0.32} - 10.3, \text{ se } h_T < 51 \text{ mm} \quad 3.3$$

$$A = 0.34h_T + 14.41, \text{ se } h_T \geq 51 \text{ mm} \quad 3.4$$

com  $h_T$  em mm e  $A$  em  $t/(h \cdot m^2)$

A capacidade básica também depende da área aberta da peneira. A capacidade calculada nas equações 3.3 e 3.4 é aplicável em malhas de arame. Para outros materiais,  $A$  deve ser ajustada em relação à área aberta. A área aberta percentual para malhas de arame está relacionada com a abertura da malha da seguinte maneira:

$$OA = 21.5 \log_{10} h + 37 \quad 3.5$$

com  $h$  em milímetros.

Portanto, a capacidade básica deve ser ajustada para:

$$\frac{A * \% \text{área aberta}}{OA} \quad 3.6$$

Na qual:

$$\% \text{área aberta} = 100 * \frac{h^2}{(h + dw)^2} \quad 3.7$$

com  $h$  e  $dw$  em milímetros.

Para o cálculo dos demais fatores, é necessário determinar o passante para determinados tamanhos representativos, que são interpolações da curva de passante acumulado em função do tamanho representativo, sendo que o passante acumulado deve atender às seguintes propriedades:

$$P(0) = 0$$

$$P(\infty) = 1$$

$P(dp)$  cresce monotonicamente de 0 a 1 conforme  $dp$  cresce de 0 a infinito. Esses valores são o tamanho representativo igual a abertura efetiva ( $Pf_{h_T}$ ), o tamanho representativo equivalente à metade da abertura efetiva ( $Pf_{0.5h_T}$ ), o tamanho

representativo equivalente a 3/4 da abertura efetiva ( $Pf_{0.75h_T}$ ) e o tamanho representativo equivalente a 5/4 da abertura efetiva ( $Pf_{1.25h_T}$ ).

O fator de oversize  $B$  é calculado de acordo com a equações 3.8 e 3.9.

$$B = 1.6 - 1.2 * (1 - Pf_{h_T}) \text{ se } Pf_{h_T} \geq 0.13 \quad 3.8$$

$$B = 4.3 - 4.3(1 - Pf_{h_T}) \text{ se } Pf_{h_T} < 0.13 \quad 3.9$$

O fator de tamanho de meia malha  $C$  é definido como:

$$C = 0.7 + 1.2 * (Pf_{0.5h_T}) \text{ se } Pf_{0.5h_T} \leq 0.3 \quad 3.10$$

$$C = 2.053(Pf_{0.5h_T})^{0.564}, 0.3 < Pf_{0.5h_T} \leq 0.55 \quad 3.11$$

$$C = 3.35(Pf_{0.5h_T})^{1.37}, 0.55 < Pf_{0.5h_T} \leq 0.8 \quad 3.12$$

$$C = 5.0 * (Pf_{0.5h_T}) - 1.5 \text{ se } Pf_{0.5h_T} > 0.8 \quad 3.13$$

O fator de localização de deque  $D$ :

$$D = 1.1 - 0.1*S \quad 3.14$$

Na qual  $S=1$  para o primeiro deque,  $S=2$  para o segundo deque e assim por diante.

Para  $T = 1.26h_T$  ( $h_T$  em mm), tem-se

$$E = 1.0, \text{ se } T < 1 \quad 3.15$$

$$E = T, \text{ se } 1 \leq T < 2 \quad 3.16$$

$$E = 1.5 + 0.25 * T, \text{ se } 2 \leq T < 4 \quad 3.17$$

$$E = 2.5, \text{ se } 4 \leq T < 6 \quad 3.18$$

$$E = 3.25 - 0.125 * T, \text{ se } 6 \leq T < 10 \quad 3.19$$

$$E = 4.5 - 0.25 * T, \text{ se } 10 \leq T < 12 \quad 3.20$$

$$E = 2.1 - 0.05 * T, \text{ se } 12 \leq T < 16 \quad 3.21$$

$$E = 1.5 - 0.00125 * T, \text{ se } 16 \leq T < 24 \quad 3.22$$

$$E = 1.35 - 0.00325 * T, \text{ se } 24 \leq T < 32 \quad 3.23$$

$$E = 1.15, \text{ se } T > 32 \quad 3.24$$

sempre que o material for pulverizado com água.

O fator densidade do bulk  $F$ :

$$F = \frac{\rho_B}{1.6} \quad 3.25$$

sendo  $\rho_B = \rho_{\text{minério}} / 1600$ , com  $\rho_{\text{minério}}$  em  $\text{kg/m}^3$ .

A capacidade da peneira também é afetada pela presença de material com tamanho muito próximo ao tamanho da abertura efetiva  $h_T$ . O material com tamanho próximo está na faixa de  $0.75 h_T$  a  $1.25 h_T$ . Quantidades consideráveis desse material irão inibir a passagem do material mais fino através da malha. O fator  $G_c$  pode ser calculado como:

$$G_c = 0.975 * (1 - \text{Pf}_{1.25h_T} + \text{Pf}_{0.75h_T})^{0.511} \quad 3.26$$

Para o modelo de Karra, o  $d_{50}$  dependerá primariamente da abertura efetiva da malha usada na peneira, em um coeficiente definido por:

$$K = \frac{\frac{\text{toneladas de undersize na alimentação}}{(\text{unidade de área da peneira})}}{ABCDEF} \quad 3.27$$

$$K = \frac{(W^F * Pf_{hT})/(\text{área da peneira})}{ABCDEF} \quad 3.28$$

Nas quais  $W^F$  é a vazão mássica de alimentação, em tonelada/hora.

O  $d_{50}$  dependerá também do fator  $G_c$ :

$$\frac{d_{50}}{h_T} = \frac{G_c}{K^{0.148}} \quad 3.29$$

com  $h_T$  em milímetros.

Com isso, é possível calcular a granulometria de ambas as correntes de saída da peneira, através da função classificação, também conhecida como curva de partição:

$$p_i^u = \frac{[1 - c_{dp}]p_i^F}{\sum_i [1 - c_{dp}]p_i^F} \quad 3.30$$

$$p_i^o = \frac{c_{dp}p_i^F}{\sum_i c_{dp}p_i^F} \quad 3.31$$

$$W^u = W^F \sum_i [1 - c(d_{pi})]p_i^F \quad 3.32$$

$$W^o = W^F \sum_i c(d_{pi})p_i^F \quad 3.33$$

Nas quais  $W^F$  é a vazão de alimentação,  $W^O$  é a vazão do oversize e  $W^U$  é a vazão do undersize.

### 3.1.4 Modelo de eficiência de Whiten

O modelo de eficiência descrito por Whiten (1972). O conjunto de equações é:

$$E_{oa} = \frac{\exp(\alpha) - 1}{\exp(\alpha x) + \exp(\alpha) - 2} \quad 3.34$$

Na qual  $\alpha$  é o parâmetro que define a eficiência de separação,  $x$  é o tamanho reduzido ( $d_i/d_{50}$ ) e  $E_{oa}$  é a eficiência para o overflow.

Diferentemente do modelo de Karra, o modelo de Whiten não calcula o  $d_{50}$ , sendo este, portanto, um parâmetro definido pelo usuário.

De posse de  $\alpha$  e  $d_{50}$ , o cálculo para a granulometria e vazões do oversize e undersize é idêntico ao modelo de Karra, ou seja, usando as equações 3.30 a 3.33.

## 3.2 Britagem

O objetivo de uma usina de britagem é a redução do tamanho de partícula por meio de sua cominuição. A cominuição é o ato de fragmentar minérios em tamanhos menores, seja para viabilizar a liberação mineral ou para preparar o material com uma granulometria desejada, de modo que a utilização de energia é necessária para fraturar o minério por meio de forças trativas, compressivas e cisalhantes (Wills & Napier-Munn, 2016).

Diversos equipamentos podem ser utilizados para promover a quebra de partículas. Os esforços tipicamente utilizados nas usinas de produção de agregados são classificados em compressão, aplicados através do deslocamento de superfícies em um britador (britador de mandíbulas, cônico e giratório) ou de impacto, aplicados por meio da transferência de energia cinética às partículas, arremessando-as contra uma superfície sólida ou um leito de partículas. Tais britadores são conhecidos como britadores de eixo de impacto vertical ou horizontal (figura 3.4). Um britador cônico é representado pela Figura 3.3, enquanto a Figura 3.5 apresenta um diagrama esquemático de um britador, apresentando a APF (abertura em posição fechada) e a APA (abertura em posição aberta).



Figura 3.3-Britador cônico industrial



Figura 3.4-Alimentação do britador tipo VSI.

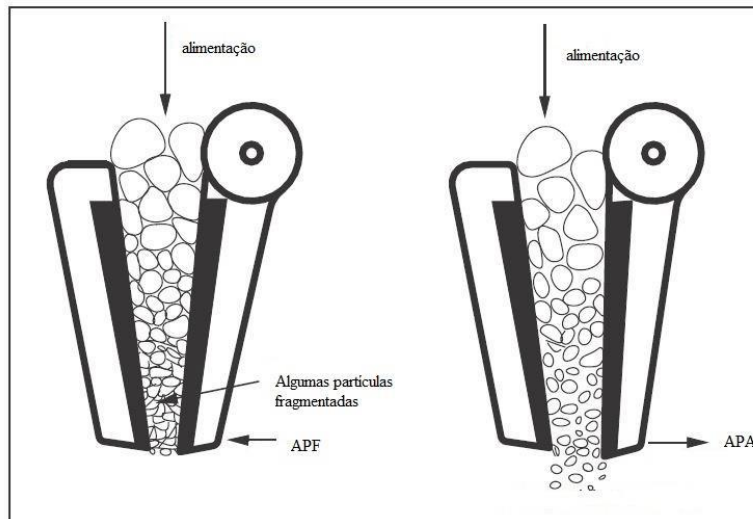


Figura 3.5- Diagrama esquemático ilustrando as condições de abertura em posição aberta (APA) e fechada (APF) de um britador de mandíbulas (adaptado de KING, 2001)

### 3.2.1 Modelo de quebra

Whiten (1972) propôs uma abordagem matemática para a modelagem do funcionamento do britador sob a ótica da fragmentação das partículas. O modelo descreve a redistribuição das partículas fragmentadas após o evento de quebra, dependendo assim de duas funções empíricas: a função classificação e a função quebra, cujos parâmetros devem ser ajustados de acordo com os dados obtidos dos circuitos de britagem. A Figura 3.6 demonstra esquematicamente o modelo desenvolvido por Whiten.

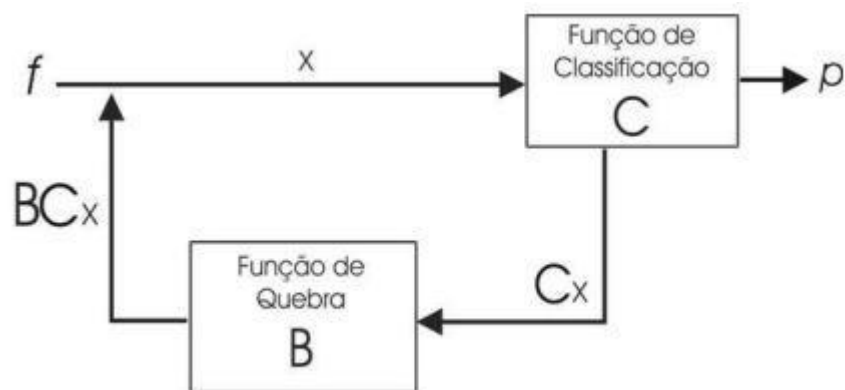


Figura 3.6-Diagrama esquemático do modelo de britagem desenvolvido por Whiten ( Adaptado de Napier-Munn et al, 1996)

A quebra e a classificação de partícula ocorrem através do movimento periódico de aproximação e afastamento entre o manto e o côncavo do equipamento, de tal maneira que, ao entrar na câmara de britagem, a partícula é selecionada pela função classificação  $C$  para ser submetida à quebra ou não. As partículas selecionadas para a quebra sofrem ação da função quebra, que descreverá a fragmentação desta população de partículas. Esse processo se repete até a total descarga do material da câmara de britagem.

A classificação de partículas reportadas para a quebra nos britadores é dependente principalmente do tamanho de partícula, com a probabilidade de quebra crescente em direção às maiores partículas, sendo igual a um para aquelas que são maiores que a posição de abertura aberta do britador (APA).

Whiten descreveu esta função da seguinte maneira:

$$C(x) = 0, \text{ se } x < K1 \quad 3.35$$

$$C(x) = 1 - \left( \frac{K2 - x}{K2 - K1} \right)^{K3}, \text{ se } K1 < x < K2 \quad 3.36$$

$$C(x) = 1, \text{ se } x > K2 \quad 3.37$$

Nas quais  $K1$  é interpretado como o tamanho tal que as partículas menores que  $K1$  são destinadas ao produto,  $K2$  é o tamanho a partir do qual todas as partículas são reportadas para a quebra e  $K3$  é usualmente constante e igual a 2.3.

Matricialmente o modelo de Whiten (1972) é:

$$p = (I - C) * (I - BC)^{-1} * p^F \quad 3.38$$

Na qual  $I$  é a matriz identidade,  $p^F$  é o vetor representando a quantidade de material em cada classe de tamanho alimentada ao britador e  $B$  é a função quebra, uma matriz triangular inferior que define a distribuição relativa de cada classe de tamanho após a quebra e  $p$  é o vetor de distribuição de tamanhos do produto. Os vetores  $p^F$  e  $p$  podem ser interpretados como a vazão mássica de material em cada classe de tamanho.

### 3.2.2 A função quebra



A função quebra  $B_q(xf:y)$  é definida como a proporção de partículas menores que o tamanho “ $xf$ ” resultantes da quebra de uma única partícula “ $y$ ” (KING, 2012). É uma função de grande importância nos processos de cominuição. Tal função foi proposta por AUSTIN et al. (1964), sendo descrita pela equação 3.39.

$$B_q(xf:y) = Kq \left(\frac{xf}{y}\right)^{n1} + (1 - Kq) \left(\frac{xf}{y}\right)^{n2} \quad 3.39$$

Na qual  $Kq$  representa a fração em massa das partículas finas resultantes da quebra e  $ni$  descreve o comportamento do material cominuído em função do tipo de tensão aplicada à fratura.

Tavares & Neves (2008) realizaram a caracterização de minérios de diversas pedreiras do Brasil, inclusive da Mineração Santa Luzia, utilizando técnicas microestruturais, teste de quebra de partículas individuais e um teste padrão de abrasividade. A Tabela 3.1 apresenta a composição química do minério da pedreira Santa Luzia resultante de um ensaio de espectrometria de fluorescência de raios-X.

Tabela 3.1-Composição química do minério de Santa Luzia por espectrometria de fluorescência de raios-X.  $Fe_2O_3$  é o total de óxidos de ferro da amostra e LOI é a perda por ignição (Adaptado de Tavares & Neves, 2008).

Pedreira	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI
Santa Luzia	56.26	1.04	15.82	6.66	0.10	3.45	5.42	3.17	3.04	0.26	1.00

### 3.2.3 Modelagem da Potência dos Britadores

O modelo de potência relaciona a potência requerida pelo britador com a potência requerida pelo dispositivo de quebra utilizado em escala de bancada para atingir a mesma redução de tamanho obtida no britador (Andersen e Napier-Munn,1988; Morell, Napier-Munn e Andersen 1992). O modelo tem a seguinte forma:

$$P_c = A * P_p + P_n \quad 3.40$$

na qual  $P_c$  é a potência requerida pelo britador enquanto opera em cheio (kW),  $P_p$  é o cálculo da potência do pêndulo (kW),  $P_n$  potência requerida pelo britador enquanto opera em vazio (kW) e  $A_p$  é um fator de escala adimensional, obtido por regressão, para um determinado britador.

A energia de cominuição específica,  $E_{cs_i}$ , apropriada para cada classe de tamanho de partícula  $i$ , pode ser obtida através da relação entre a energia específica e  $t_{10}$ , para cada tipo de minério. A potência pode então ser definida como:

$$P_p = \sum_{i=1}^j E_{cs_{t10i}} * C_i * x_i \quad 3.41$$

Na qual  $E_{cs_{t10i}}$  é a energia específica de cominuição, expressa em kWh/t, no valor relacionado de  $t_{10}$ , para cada classe de tamanho  $i$ ,  $j$  é o número de classes,  $C_i$  é a probabilidade de quebra do tamanho  $i$  e  $x_i$  é a vazão mássica da classe  $i$  no britador (t/h).

O uso de resultados obtidos a partir de ensaios de quebra, como o DWT (*drop weight test*), possibilitam que seja estabelecida relação no modelo entre a energia específica de cominuição ( $E_{cs}$ ) e a distribuição granulométrica do produto, ou seja, descreve qual é a energia necessária para que a partícula atinja uma certa intensidade de quebra. Essa intensidade de quebra pode ser representada pelo parâmetro  $t_{10}$  (equação 3.42):

$$t_{10} = A_{ore} [1 - e^{(-b_{ore} * E_{cs})}] \quad 3.42$$

### 3.3 Modelagem das pilhas-pulmão

Para simular a dinâmica das pilhas, Deliberato Neto(2007) utilizou um conjunto de camadas horizontais para representar a mudança rápida nas propriedades do material durante a condição de operação, um modelo *First-In-First-Out* (FIFO).

O termo FIFO é um termo da contabilidade, e é um método usualmente utilizado para estimar o valor de inventário ao final de um período contábil. Este método assume que os bens adquiridos ou produzidos primeiro são vendidos primeiro, enquanto os bens mais novos permanecem no estoque. Deste momento em diante, o termo é utilizado no

sentido de que as partículas que chegam primeiro na pilha se depositam no fundo e são as primeiras a sair. A Figura 3.7 apresenta uma foto de uma pilha pulmão.



Figura 3.7-Pilha pulmão

### 3.4 Modelagem das correias transportadoras

As correias transportadoras são responsáveis por transportar o material entre os equipamentos e pilhas das usinas de agregados. Apesar de ser um equipamento simples, a tarefa de erguer o material de um ponto mais baixo para um ponto mais alto ao longo da usina pode ser custosa, se não for bem planejada. A Figura 3.8 representa um modelo esquemático de uma correia transportadora e os parâmetros relevantes ao modelo de potência.

A equação utilizada para o cálculo da potência das correias transportadoras foi descrita por Hulthén e Evertsson (2014):

$$\dot{m} = \frac{P_{load} * \eta_{tot}}{ghc + v^2 + v\sqrt{2gh_{drop}} * \text{sen}(\alpha)} \quad 3.43$$

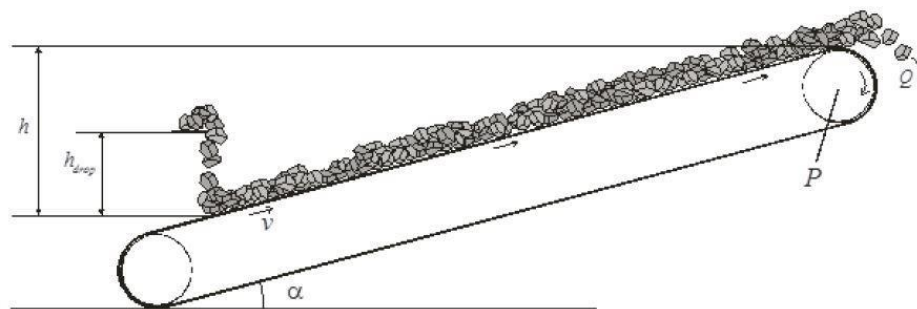


Figura 3.8 – Os princípios de uma correia transportando o material a uma altura  $hc$  (Adaptado de Asbjörnsson, 2014).

Na qual  $P_{load}$  é potência da correia transportadora (W),  $\eta_{tot}$  é a eficiência dos componentes da máquina,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $hc$  é a diferença de altura dentre as extremidades da correia,  $h_{drop}$  é a altura a partir da qual o material é despejado na correia,  $v$  é a velocidade da correia e  $\alpha$  é o ângulo de inclinação da correia.

Rearranjando a equação 3.43, a potência da correia pode ser estimada, dada uma vazão mássica  $\dot{m}$ . Quando não houver material sendo transportado pela correia, a potência será considerada nula.

### 3.5 Modelagem e Simulação de usina de agregados

Asbjörnsson (2013) e Deliberato Neto (2007) modelaram e simularam uma usina de agregados em plataforma Matlab/Simulink com diferentes configurações de vazão mássica e distribuição granulométrica da alimentação e diferentes aberturas em posição fechada (CSS) de britadores visando definir a condição de operação que implicaria no melhor desempenho da planta. Num trabalho anterior, Asbjörnsson (2012) também descreveu um modelo dinâmico para prever o comportamento das pilhas pulmão e simulou uma usina completa de agregados incluindo o comportamento dinâmico das pilhas.

Asbjörnsson et al. (2012) desenvolveram uma função capaz de prever o desgaste de peneiras e britadores em curto prazo em simulações dinâmicas de usinas de agregados, melhorando a predição da capacidade da usina e qualidade do produto final.

Miceli (2019) realizou a simulação dinâmica em plataforma MatLab/Simulink e através de tentativa e erro determinou uma condição de operação capaz de aumentar a produtividade da usina de agregados Santa Luzia sem alterar a qualidade dos produtos.

Entretanto o modelo de peneiramento utilizado não é sensível à mudança de vazão, não há um modelo de capacidade em função da APF para os britadores. Também não há modelo para as correias transportadoras; e um método de otimização para a determinação da condição ótima de operação também não foi utilizado

### **3.5.1 Usina de britagem de agregados**

A Mineração Santa Luzia, localizada no município de Itaguaí – Rio de Janeiro, é uma empresa responsável pela produção e comercialização de agregados para a construção civil. A empresa atua no setor desde 1946, tendo participado de grandes obras no Estado do Rio de Janeiro e se destacando como grande mineradora de agregados na região.

A usina de produção de agregados da Santa Luzia é composta de uma mina a céu aberto e uma usina de processamento. A unidade gera, como seus principais produtos, pó de pedra, brita 00, brita 0, brita 1, bica corrida e rachinha, além de produzir brita 2 e brita 3 por demanda. Esses produtos são consumidos nas unidades de concreto, argamassa e pavimentação do Grupo Santa Luzia, além de suprirem o mercado de construção civil da região. A Tabela 3-2 apresenta o preço típico dos produtos gerados na usina Santa Luzia.

Tabela 3.2-Preços dos produtos da usina Santa Luzia (comunicação pessoal)

<b>Produto</b>	<b>Preço (R\$/ton)</b>
<b>brita 0</b>	36
<b>brita 00</b>	17
<b>brita 1</b>	34
<b>brita 2</b>	34
<b>pó de pedra</b>	17

O mercado para esse tipo de produto é bastante oscilatório. Nos momentos de recessão ou recuperação econômica, esse tipo de usina funciona 8h a 10h por dia, enquanto nos momentos anteriores a grandes eventos, como foi o caso da Copa do Mundo e as Olimpíadas, por exemplo, ou quando o mercado da indústria civil está aquecido, essas usinas podem funcionar com cargas-horárias muito maiores (12 a 16h por dia).



O circuito de Santa Luzia utiliza quatro britadores para realizar a quebra de partículas: S4000, HP300, HP200 e o VSI. O S4000 é um britador giratório da fabricante Metso; HP200 e HP300 são britadores cônicos, também fabricados pela Metso e o VSI é um britador de impacto vertical modelo Barmac B7150SE

Miceli (2019) aplicou o modelo para o britador VSI de acordo com o trabalho publicado por Segura-Salazar et al. (2017). O artigo propõe algumas mudanças nas equações propostas por Napier-Munn et al. (1996), fazendo com que o parâmetro  $K1$  seja igual a 0, de forma que todas as partículas tenham chance de quebrar e o parâmetro  $K2$  é definido como o *top size* do produto da britagem. Os parâmetros  $K3$  e  $t10$  (a porcentagem passante na malha de 1/10 de tamanho inicial da partícula) são considerados como parâmetros de ajuste em função da frequência de operação (equações 3.44 e 3.45).

A Tabela 3.3 apresenta os valores utilizados para compor a função classificação para os britadores S4000, HP200 e HP300 e a Tabela 3.4 apresenta as APF para os britadores S4000, HP300 e HP200 e a frequência do britador VSI.

Tabela 3.3- Parâmetros utilizados na função classificação dos britadores (Miceli, 2019)

	<b>t10 (%)</b>	<b>K1 (mm)</b>	<b>K2 (mm)</b>	<b>K3</b>
<b>S4000</b>	10,89	92,72	123,44	2,3
<b>HP300</b>	18,8	41,05	81,65	2,3
<b>HP200</b>	17,7	16,93	32,74	2,3

$$K3 = 0,0219 * freq - 0,5218 \quad \text{Eq.3.44}$$

$$t10 = 0,175 * freq + 30,157 \quad \text{Eq.3.45}$$

Tabela 3.4- Parâmetros dos britadores (Miceli, 2019)

	<b>S4000</b>	<b>HP300</b>	<b>HP200</b>		<b>VSI</b>
<b>APF (mm)</b>	54	30	20	Frequência (Hz)	55

A Tabela 3.5 apresenta a *Appearance function* utilizada para compor a função a função quebra para os britadores.

Tabela 3.5 *Appearance function* utilizada para a definição da função quebra (Miceli, 2019).

T10	T1	T1.2	T1.5	T2	T4	T25	T50	T75
10	100	83,66	64,07	39,88	18,29	6,26	4,35	3,48
20	100	93,54	83,36	67,28	36,61	12,49	8,83	7,18
30	100	97,41	92,52	83,78	52,96	18,95	13,59	11,18
40	100	99,02	96,90	92,84	66,89	25,75	18,73	15,57
50	100	99,68	98,88	97,29	78,27	33,00	24,39	20,47
60	100	99,91	99,67	99,18	87,09	40,88	30,75	26,07
70	100	99,98	99,93	99,83	93,43	49,65	38,15	32,71
80	100	100	99,99	99,98	97,48	59,81	47,22	41,05
90	100	100	100	100	99,51	72,63	59,73	52,98

A Tabela 3.6 apresenta a potência dos motores acoplados a cada um dos britadores e a Tabela 3.7 exibe os parâmetros para o cálculo da potência dos britadores.

Tabela 3.6-Potência dos motores acoplados aos britadores utilizados na usina Santa Luzia. Cada britador contém apenas um motor, com exceção do VSI, que necessita de dois motores para operar.

	Motor	Potência em vazio (kW)
S4000	M1	68,4
HP300	M1	60,6
HP200	M1	41,9
VSI	M1	41,7
	M2	42,3

Tabela 3.7-Parâmetros para o modelo de potência dos britadores da usina Santa Luzia (Miceli, 2019)

Equipamento	Parâmetros	
	A	Pn (kW)
S4000	0,836	44
HP300	0,4282	60
HP200	1,2562	30
VSI	1,8103	29,42

Sabe-se que a capacidade de produção dos britadores é função da APF: aberturas maiores geram material mais grosso, porém apresentam maior capacidade e menor consumo energético; aberturas menores promovem quebra mais severa das partículas, porém apresentam menor capacidade e maior consumo energético.

Miceli (2019) propôs um modelo de capacidade, onde a capacidade dos britadores é uma função linear da APF. A equação 3.46 descreve a capacidade, em t/h, do britador



terciário HP300 e a equação 3.47 descreve a capacidade, em t/h, do britador quaternário HP200 e do VSI. A capacidade do britador S4000 não foi modelada, portanto, neste trabalho, a capacidade do S4000 será considerada constante e independente da APF.

$$y_{vsi} = 9.5 * APF + 30 \quad 3.46$$

$$y_{vsi} = 5.7 * APF + 40 \quad 3.47$$

Sendo APF dada em milímetros.

A Tabela 3.8 apresenta os parâmetros de quebra por impacto da rocha processada na usina de agregados Santa Luzia.

Tabela 3.8-Parâmetros da rocha processada na usina Santa Luzia

Parâmetros do minério	
<b>A ore</b>	65,09
<b>B ore</b>	1,2

### 3.5.4 Peneiramento

Miceli (2019) utilizou dados experimentais durante uma amostragem industrial na usina de agregados Santa Luzia e a partir desses dados, ajustou os parâmetros para o modelo de eficiência (Tabela 3.9). Apesar de apresentar vantagens, como o número reduzido de parâmetros a serem ajustados, o modelo de eficiência não é sensível a vazão, o que pode gerar resultados distantes da operação real nos casos em que há variação na vazão mássica.

Tabela 3.9- Parâmetros para o modelo de peneiramento (Miceli, 2019)

	PV8	PV3PV4		PV5PV6			PV7	
	Deque 1	Deque 1	Deque 2	Deque 1	Deque 2	Deque 3	Deque 1	Deque 2
<b>alfa</b>	93,67	11,1	7,6	9,9	13,9	3,3	2,3	6,7
<b>d50c (mm)</b>	3,43	38,5	21,2	18,8	9	2,4	2,8	2,2

### 3.5.5 Estratégia de controle

A estratégia de controle utilizada neste trabalho foi descrita por Miceli (2019). A dinâmica do circuito é governada pelos níveis de massa das pilhas que alimentam os britadores terciário e quaternários. Quando essas pilhas atingem determinados níveis, emitem sinais para os alimentadores dos britadores, de tal maneira que a alimentação destinada aos britadores seja interrompida. O controlador é do tipo ON/OFF, ou seja, o sinal 0 interrompe a alimentação, enquanto o sinal 1 reativa ou mantém a alimentação ligada. Os diversos cenários possíveis de ocorrer estão representados na Tabela 3.10. Os níveis mássicos das pilhas que alteram o sinal do controlador são 10, 20, 50 e 90%.

Tabela 3.10 – Diferentes lógicas possíveis de ocorrer durante a operação e as respectivas ações de controle a serem tomadas (Adaptado de Miceli, 2019).

Cenário	Nível da pilha do HP300	Nível da pilha do HP200 e VSI	Condição	Ação de controle
<b>A</b>	$\geq 90\%$	$\geq 50\%$	Esvaziar o circuito	Desligar S4000
<b>B</b>	$\geq 90\%$	$< 50\%$	Esvaziar a pilha do HP300 e encher a pilha HP200/VSI	Desligar S4000, HP200 e VSI
<b>C</b>	$\leq 10\%$	$\geq 20\%$	Operação completa	Tudo operando
<b>D</b>	$\leq 10\%$	$< 20\%$	Encher a pilha do HP300 e encher a pilha HP200/VSI	Desligar HP200 e VSI
<b>E</b>	$\geq 50\%$	$\geq 90\%$	Esvaziar o circuito	Desligar S4000
<b>F</b>	$< 50\%$	$\leq 90\%$	Operação completa	Tudo operando
<b>G</b>	$\geq 20\%$	$\leq 10\%$	Esvaziar a pilha do HP300 e encher a pilha HP200/VSI	Desligar S4000, HP200 e VSI
<b>H</b>	$< 20\%$	$\leq 10\%$	Encher a pilha do HP300 e encher a pilha HP200/VSI	Desligar HP200 e VSI

No cenário A, é necessário permitir que o material recircule para os britadores terciário e quaternários, sem que o nível da pilha do HP300 suba, por isso desliga-se a alimentação do S4000; no cenário B, é necessário esvaziar a pilha do HP300 enquanto a

pilha do HP200/VSI estiver enchendo, para isso desliga-se a alimentação do S4000, para evitar o transbordamento da pilha do HP300 e desligam-se os britadores quaternários para permitir que suas pilhas sejam preenchidas. No cenário C, pilha do HP300 deve ser preenchida, assim como a pilhas do HP200/VSI, portanto liga-se a alimentação do S4000 e permite-se que todos os britadores do circuito operem simultaneamente. O cenário D apresenta a situação em que ambas as pilhas estão na iminência de esvaziar. Para evitar esse cenário, liga-se o S4000 para encher a pilha do HP300 e desligam-se o HP200/VSI para permitir que sua pilha encha. O cenário E apresenta as mesma lógica e ação do caso A. No caso F, a pilha do HP300 precisa ser preenchida e a pilha do HP200/VSI está quase cheia. Portanto liga-se a alimentação do S4000 para encher a pilha do HP300 e ligam-se os britadores HP200/VSI para esvaziar a pilha que os alimenta. O caso G é semelhante ao caso B e o caso H é semelhante aso caso D.

A tabela 3.11 apresenta a granulometria da alimentação do britador S4000 para a simulação ótima realizada por Miceli (2019) e a figura 3.10 apresenta a dinâmica de pilhas ao longo de 12 horas de simulação.

Tabela 3.11-Granulometria da alimentação do S4000 para o caso base

<b>abertura (mm)</b>	<b>Passante acumulado</b>
<b>300</b>	100,00
<b>250</b>	95,49
<b>200</b>	83,49
<b>150</b>	65,20
<b>100</b>	50,97
<b>90</b>	48,05
<b>75</b>	41,90
<b>63</b>	35,71
<b>53</b>	30,34
<b>45</b>	25,84
<b>37,5</b>	21,07
<b>31,5</b>	16,08
<b>25,5</b>	11,04
<b>22,4</b>	7,50
<b>19,0</b>	5,58
<b>16,0</b>	4,45
<b>13,2</b>	3,66
<b>11,2</b>	3,22
<b>9,50</b>	2,93
<b>8,00</b>	2,72

---

6,70	2,56
5,60	2,43
4,75	2,34
4,00	2,26
3,35	2,20
2,80	2,14
2,36	2,08
1,70	1,99
1,18	1,90
0,85	1,79
0,60	1,64
0,43	1,47
0,30	1,22
0,21	0,92
0,15	0,70
0,02	0,54
0,08	0,42
0,05	0,32
0,04	0,25

---

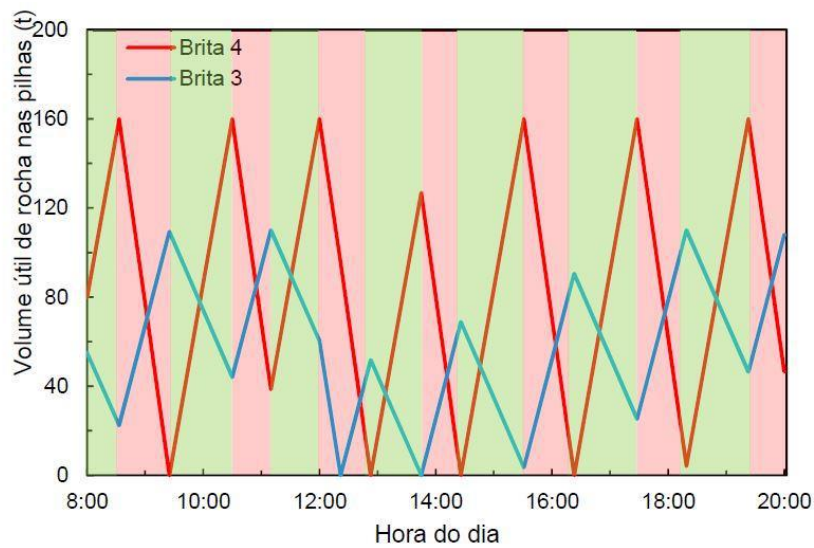


Figura 3.10-- Dinâmica de pilhas para o caso ótimo simulado, onde as faixas em verde indicam a operação do britador secundário e as faixas em vermelho representam os períodos no qual o mesmo se encontra ocioso (Adaptado de Miceli, 2019)

### 3.5.6 Preço da energia elétrica para a indústria no Brasil

A tarifa de energia elétrica para a indústria é modelada de acordo com a resolução ANEEL N° 2.523/19 de 26/03/2019. A grande maioria das indústrias (94,4%) estão alocadas no subgrupo A4 para o cálculo da tarifa de energia. A tarifa é calculada de acordo com as equações 3.10, 3.11 e 3.12.

$$t \text{ verde} = 0,092 (\text{TEVp} + \text{TUSD Vp}) + 0,908 (\text{TE VFp} + \text{TUSD VFp}) \quad 3.48$$

$$t \text{ azul} = 0,092 (\text{TE Ap} + \text{TUSD Ap}) + 0,908 (\text{TE Afp} + \text{TUSD Afp}) \quad 3.49$$

$$\begin{aligned} \text{C A4 dist} &= 0,793 t \text{ verde} && 3.50 \\ &+ 0,207 t \text{ azul} \end{aligned}$$

O significado de cada acrônimo está representado na Tabela 3.12.

Tabela 3.12-Significado de cada acrônimo para o cálculo do custo de energia (ANEEL, 2019)

<b>t verde, azul</b>	<b>tarifa média da modalidade verde ou azul</b>
<b>TEVp</b>	tarifa de energia da modalidade verde para o horário de ponta
<b>TEAp</b>	tarifa de energia da modalidade azul para o horário de ponta
<b>TEVFp</b>	tarifa de energia da modalidade verde para o horário fora de ponta
<b>TEAFp</b>	tarifa de energia da modalidade azul para o horário de ponta
<b>TUSD Vp</b>	tarifa de uso do sistema de distribuição da modalidade verde para horário de ponta
<b>TUSD Ap</b>	tarifa de uso do sistema de distribuição da modalidade azul para horário de ponta
<b>TUSD VFp</b>	tarifa de uso do sistema de distribuição da modalidade verde para horário fora de ponta
<b>TUSD AFp</b>	tarifa de uso do sistema de distribuição da modalidade azul para horário fora de ponta
<b>C A4 dist</b>	custo médio da energia elétrica para os consumidores A4

Os parâmetros necessários para o cálculo da energia média estão na Tabela 3.13.

Tabela 3.13-Parâmetros das modalidades verde e azul para o cálculo da tarifa de energia elétrica (ANEEL, 2019)

Nível de tensão	Consumo (R\$/mWh)							
	Verde				Azul			
	Ponta		Fora de ponta		Ponta		Fora de ponta	
	TUSD	TE	TUSD	TE	TUSD	TE	TUSD	TE
<b>A4 (2,3 a 25Kv)</b>	912,4	440,4	125,4	269,4	125,4	440,4	125,4	269,4
	7	8	4	2	4	8	4	2

### 3.5.7 Introdução de eventos estocásticos e paradas programadas

Todo processo industrial realiza paradas programadas periodicamente, seja para a manutenção ou instalação dos equipamentos ou para realizar mudanças no processo. Além disso, eventos não programados, que daí em diante serão chamados de eventos estocásticos, também podem acontecer.

No caso de uma usina de agregados, os eventos estocásticos são representados por um pedaço de metal identificado em uma das correias, por exemplo. Se este material chegar aos britadores, ele será responsável por danificar o revestimento dos britadores, comprometendo o desempenho do equipamento e reduzindo sua vida útil.

Portanto, ao se identificar metais nas correias, é necessário desligar a correia em questão e retirar o metal. Esta operação dura no máximo 15 minutos, mas pode alterar a dinâmica da usina. Este efeito será apresentado e discutido nas seções posteriores.

## 3.6 Métodos numéricos e otimização

Nesta seção será discutido um método numérico para determinar a condição ótima de operação do circuito estudado.

Os métodos numéricos discutidos neste trabalho objetivam a maximização ou minimização de funções. Desta forma, dada uma função  $f$  que depende de uma ou mais variáveis independentes, serão aplicados métodos numéricos para obter os valores dessas variáveis para que o valor da função  $f$  seja máximo ou mínimo. Tais métodos são conhecidos como métodos de otimização em alguns trabalhos da literatura. Os problemas de otimização podem ser restritos ou irrestritos, dependendo se há ou não restrições nos valores que as variáveis podem assumir.

Independente de qual seja a função a ser minimizada, ou seja, qualquer que seja o problema de otimização, deverá existir:

1. Uma função objetivo: a função a ser minimizada e que incorpora em si o critério de qualidade que permitirá avaliar quão bom foi o ajuste;
2. Um modelo de processo: a função ou conjunto de funções que contêm todas as restrições das variáveis do modelo e que exprimem o relacionamento entre as entradas e saídas do modelo.

De acordo com Edgar e Himmelblau (1988), existem seis passos que devem ser seguidos na solução de qualquer problema de otimização:

1. Analisar o processo como um todo e definir as variáveis do processo e suas características específicas, ou seja, fazer uma lista com todas as variáveis do problema.
2. Determinar o critério de otimização e definir a função objetivo de acordo com as variáveis definidas na etapa anterior.
3. Desenvolver um modelo válido de processo ou de equipamento, usando expressões matemáticas, que relacionem entradas e saídas do processo.
4. Simplificar a função objetivo e o modelo do processo. O modelo deve ser o mais simples possível e ainda assim fornecer previsões úteis. Esta etapa consiste na diminuição no número de variáveis e na simplificação das equações do modelo, se possível.
5. Utilizar a técnica de otimização escolhida e calcular a condição ótima do problema.
6. Fazer uma análise de sensibilidade dos resultados ao se alterar os coeficientes do problema e as premissas adotadas. Pode-se alterar a estimativa inicial dos valores dos parâmetros e utilizar outros algoritmos de otimização.

### **3.7 O método dos poliedros flexíveis**

O método dos poliedros flexíveis é um método de busca direta que não utiliza nenhuma derivada, seja numérica ou analítica. O método dos poliedros flexíveis é bastante adequado à minimização multidimensional, ou seja, quando há mais de um parâmetro do modelo que precisa ser estimado dispondo de dados experimentais.

Muitos algoritmos que se prestam à minimização multidimensional acabam por fazer uso de algum algoritmo de minimização unidimensional como parte de sua estratégia. Este não é o caso do método dos poliedros flexíveis. Desenvolvido por Nelder

e Mead (1965), trata-se de um método direto e elegante, apesar de não ser o mais eficiente do ponto de vista da quantidade de cálculos que precisa executar.

Em se tratando de minimização unidimensional, sempre é possível isolar o ponto de mínimo, o que implica na convergência garantida do algoritmo. Em espaços multidimensionais, entretanto, não é possível o isolamento de um ponto mínimo; o melhor que se pode fazer é entregar ao algoritmo uma estimativa inicial e a partir daí o algoritmo está por sua conta e risco para andar pela topografia complexa de um espaço  $N$ -dimensional até encontrar pelo menos um mínimo local (Deliberato Neto, 2007). O método dos poliedros flexíveis não recebe como estimativa inicial um ponto de  $N$  coordenadas, mas  $N+1$  pontos. Tais pontos, cada um com  $N$  coordenadas, definem uma figura geométrica chamada de *simplex* (por isso o nome do método em inglês: *downhill simplex method*). A cada iteração, para minimizar a função objetivo, a função é avaliada em cada um dos vértices do simplex. A direção da busca é então deslocada na direção oposta ao vértice que apresenta o maior valor da função objetivo através da face oposta do simplex, ou seja, na direção em que a função apresenta o menor valor. Ao fazer a direção da busca seccionar a linha entre os dois outros pontos do triângulo, a direção passa pelo centróide. Um novo ponto é então selecionado nesta direção refletida, preservando a forma geométrica. A função é então avaliada em um novo ponto, e uma nova busca é determinada. O método procede, rejeitando um vértice a cada iteração até que o simplex se aproxima do ótimo. Várias regras são usadas para prevenir repetições excessivas do mesmo ciclo ou simplexes. A Figura 3.11 mostra as possíveis configurações após uma etapa do método do caso tridimensional.



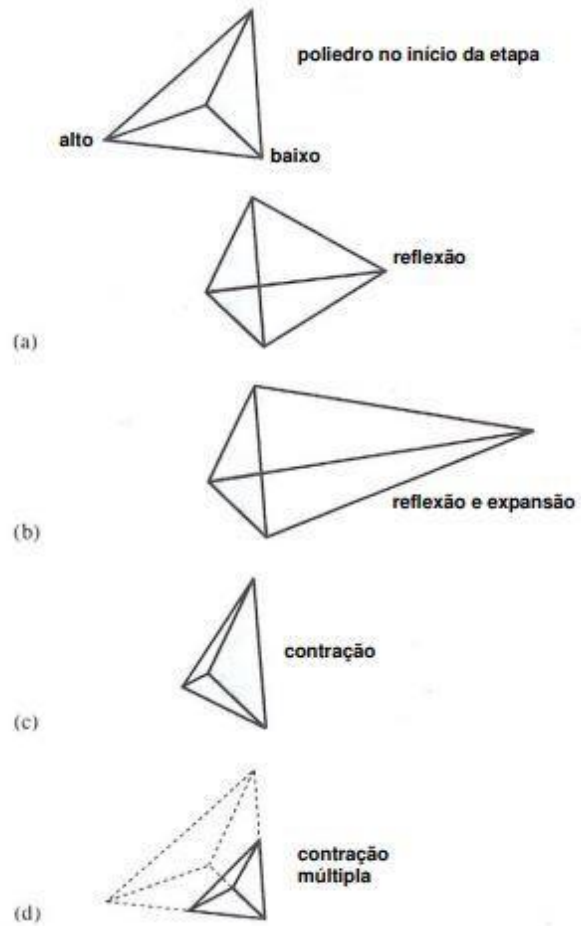


Figura 3.11-Possíveis configurações após uma etapa do método dos poliedros flexíveis para o caso tridimensional (Adaptado de Deliberato Neto, 2007)

## **4 Metodologia**

Esta seção irá detalhar os procedimentos realizados durante as etapas de modelagem dos equipamentos e a otimização da usina de agregados da Mineração Santa Luzia localizada no município de Itaguaí, Rio de Janeiro, RJ. A escolha desta usina se deve à disponibilidade de dados de operação e de equipamentos, que foram coletados durante uma amostragem industrial realizada em Fevereiro de 2018, pela equipe do Laboratório de Tecnologia Mineral (LTM/COPPE/UFRJ).

Neste capítulo, o ajuste de parâmetros do modelo de peneiramento de Karra em relação ao modelo de eficiência, será apresentado. De posse deste ajuste, realizou-se uma análise de sensibilidade da usina de agregados Santa Luzia com o objetivo de avaliar o comportamento da mesma frente às diferentes condições operacionais. Finalmente, uma otimização do circuito como um todo foi desenvolvida, com vistas de avaliar se o comportamento observado na análise de sensibilidade condiz com o resultado da otimização.

Além disso, o comportamento da usina de agregados frente a uma parada não programada foi simulado. Nos itens a seguir serão mostrados os métodos utilizados para alcançar tais objetivos.

### **4.1 Simulação do caso base da usina de agregados Santa Luzia**

#### **4.1.1 Integrador**

O integrador calcula o valor de determinada variável no passo de tempo seguinte em função do valor atual e da derivada atual da variável em questão. A derivada é calculada numericamente e a cada integrador disponível utiliza um método diferente para tal cálculo.

O integrador escolhido foi o ode3, pois as simulações realizadas neste trabalho são da ordem de horas e todas as dinâmicas observadas ocorrem em ordem de segundos, portanto, foi necessário escolher um integrador de passo fixo para que essas dinâmicas não fossem desprezadas. Os integradores de passo variável reduzem o passo consideravelmente para tentar captar as mudanças bruscas nas variáveis deste processo em específico, o que torna a simulação demasiadamente longa. Por esse motivo optou-se

por um integrador de passo fixo. O tempo de operação da usina simulado foi de 28800 segundos (8h).

O passo da simulação deve ser escolhido com duas informações em mente: o custo computacional e a dinâmica do processo. O passo não deve ser tão pequeno a ponto de requerer um grande tempo de simulação e alocar muita memória para armazenar as variáveis de interesse do processo, mas também não deve ser muito grande, o que poderia mascarar a dinâmica do processo, caso esta seja muito rápida. O passo de simulação ideal é aquele que concilia ambas as características citadas acima. Caso o sistema tenha atraso (no caso estudado, as correias são responsáveis por introduzir atrasos entre os vários equipamentos). O Simulink recomenda que o passo da simulação seja maior que o atraso máximo dentre os atrasos (<https://www.mathworks.com/help/simulink/ug/compare-solvers.html>).

A plataforma utilizada para a modelagem e simulação foi MatLab/Simulink (Mathworks, 2018). Os modelos de peneiramento e britagem descritos nos capítulos anteriores foram implementados no MatLab, em arquivos do tipo script (extensão .m), e são compiladas e executadas a cada passo da simulação implementada no Simulink. As configurações do computador utilizado para executar as simulações estão na Tabela 4.1.

Tabela 4.1-Especificações do computador utilizado para as simulações

Componente	Especificação
Sistema operacional	Windows 10
Processador	Intel®Core™ I5-3330 CPU @3.00GHz
Memória RAM	20 GB DDR4 3200MHz

#### 4.1.2 Função quebra

Neste trabalho, a função quebra foi definida a partir da *appearance function* do material britado na usina da Mineração Santa Luzia. A *appearance function* (Tabela 3.5) é obtida através do ensaio de queda de peso, ou *Drop Weight Test*, em inglês.

De posse da *appearance function*, é possível interpolar os valores da função quebra para as classes de tamanho estudadas. A figura 4.1 representa as curvas típicas de *tns* versus *t10*.

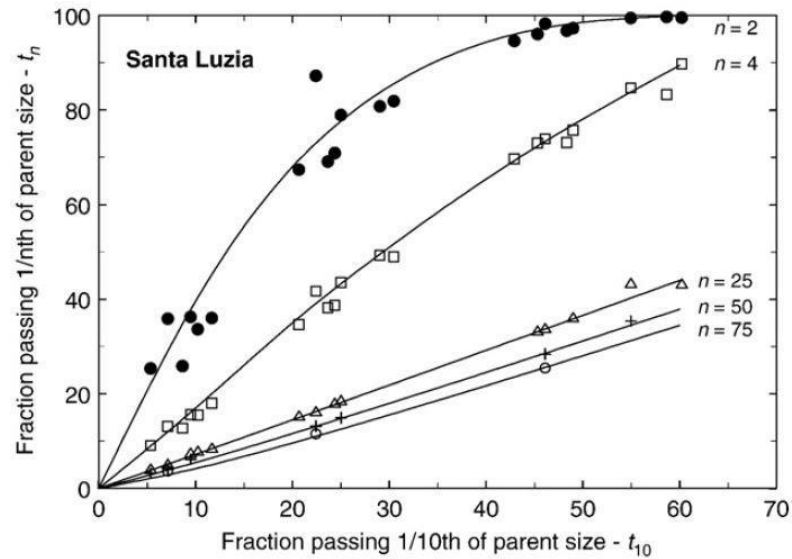


Figura 4.1-Relação entre  $t_{10}$  e vários  $t_n$ s para reconstrução da granulometria completa para a quebra de partículas individuais (Tavares & Neves, 2008).

### 4.1.3 Pilha pulmão

Os modelos para as pilhas de alimentação consistem de integradores simples, que ponderam e introduzem um atraso nos sinais de entrada de granulometria, densidade e outras propriedades da corrente material. O modelo usado foi descrito por Deliberato Neto (2009), como foi mencionado na seção 3.3. A estrutura de blocos implementada no Simulink está representada na Figura 4.2. A Tabela 4.2 apresenta as variáveis de entrada e saída do modelo implementado no Simulink.

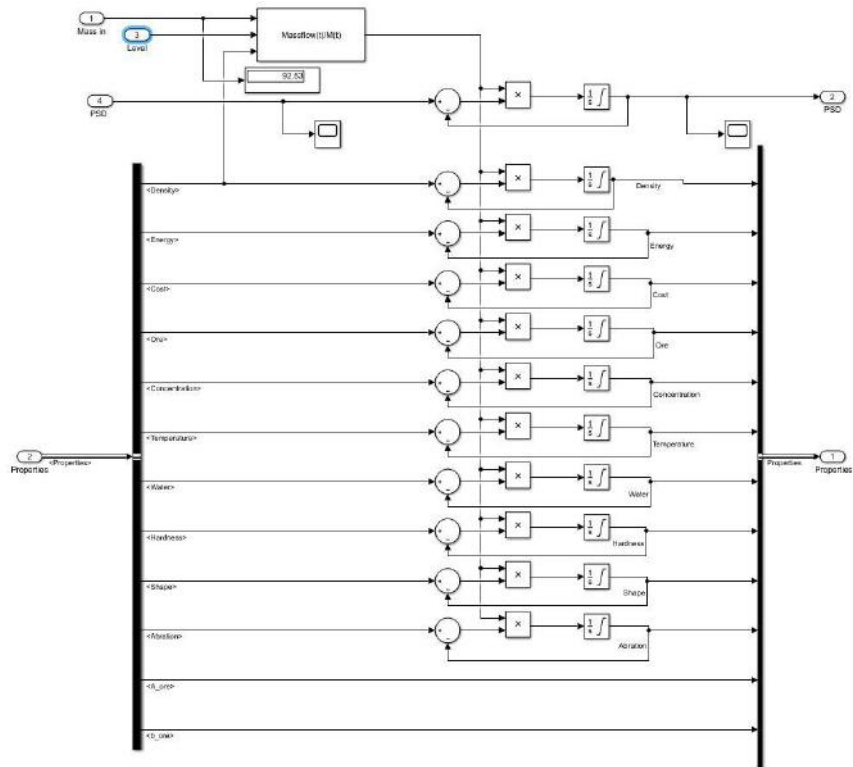


Figura 4.2-Modelagem das pilhas-pulmão (Interface Matlab/Simulink)

Tabela 4.2-Entradas e saídas do modelo da pilha pulmão

Pilha pulmão			
<b>Entradas</b>	APF	m in	PSD in
<b>Saídas</b>	m out	PSD out	-

#### 4.1.4 Britadores

Os parâmetros utilizados para a modelagem dos britadores estão representados na Tabela 3.4. As tabelas 4.4 e 4.5 apresentam as variáveis de entrada e saída para os modelos de potência e britagem dos britadores. O britador

Tabela 4.3-Entradas e saídas do modelo de potência dos britadores

Potência	Entradas	m in	PSD in	K1	K2	K3	A ore	b ore	A Pn
	Saídas		Pow						

Tabela 4.4-Entradas e saídas do modelo de britagem

Britagem	Entradas	m in	PSD in	K1	K2	K3
	Saídas	m out	PSD out	-	-	-

#### 4.1.5 Peneiramento

Os parâmetros utilizados para a modelagem das peneiras PV3PV4, PV5PV6 e PV7 utilizando o modelo de Karra são apresentados na tabela 4.5. Tais dados foram adquiridos durante a amostragem industrial realizada na Mineração Santa Luzia.

O modelo de eficiência foi utilizado para a modelagem da peneira PV8, pois esta peneira não experimenta variação de vazão mássica ao longo da simulação. Portanto, os parâmetros da Tabela 3.9 foram utilizadas no caso base para a peneira PV8.

Tabela 4.5-Parâmetros das peneiras vibratórias

	PV3PV4	PV5PV6	PV7
h1 (mm)	50	23	8
h2 (mm)	24	12	3,2
h3 (mm)	-	4	-
dw1 (mm)	24	10	3
dw2 (mm)	10	6	3
dw3 (mm)	-	4	-
ângulo (graus)	20	20	20
sl (m)	2	6	4
sw (m)	8	2,4	1,5

#### 4.1.6 Correias Transportadoras

Na simulação, as correias transportadoras introduzem um atraso aos sinais recebidos. O atraso é calculado de acordo com o comprimento e a velocidade das correias.

A Figura 4.3 ilustra a correia TC-16 da usina de britagem Santa Luzia.



Figura 4.3- Correia TC-16 da usina de agregados Santa Luzia

#### **4.1.7 Estudo de caso**

Nesta seção será mostrado o caso base da simulação da usina de agregados da Mineração Santa Luzia. A simulação reproduzirá 8 horas de operação da usina. Os parâmetros dos britadores e peneiras para o caso base são apresentados nas Tabelas 3.3, 3.4 e 4.6. A alimentação do britador S4000 no início da simulação é de 536,5 t/h e a granulometria desta corrente está apresentada na Tabela 3.11.

#### **4.2 Introdução de eventos estocásticos e paradas programadas**

Para representar eventos estocásticos ou paradas programadas, foi introduzida uma lógica para desligar e religar as correias sempre que necessário. Foi utilizado um condicional para os sinais de vazão e de granulometria em um instante de tempo escolhido, responsável por desligar ambos os sinais na ocorrência de um evento estocástico (a detecção de um metal em uma das correias, por exemplo). O condicional (representado pelo bloco “switch”) determina que os sinais de granulometria e vazão sejam iguais a zero, caso a soma dos degraus seja zero; e sejam iguais ao próprio sinal, caso a soma dos degraus seja maior ou igual a um.

Realizou-se uma simulação supondo que um pedaço de metal fosse detectado na correia TC-05 durante a operação da usina. A retirada do metal dura em torno de 15 minutos, que representa o tempo de parada da correia em questão e dos britadores a jusante desta correia. A Figura 4.4 representa a interface do Simulink para a mudança de sinal.

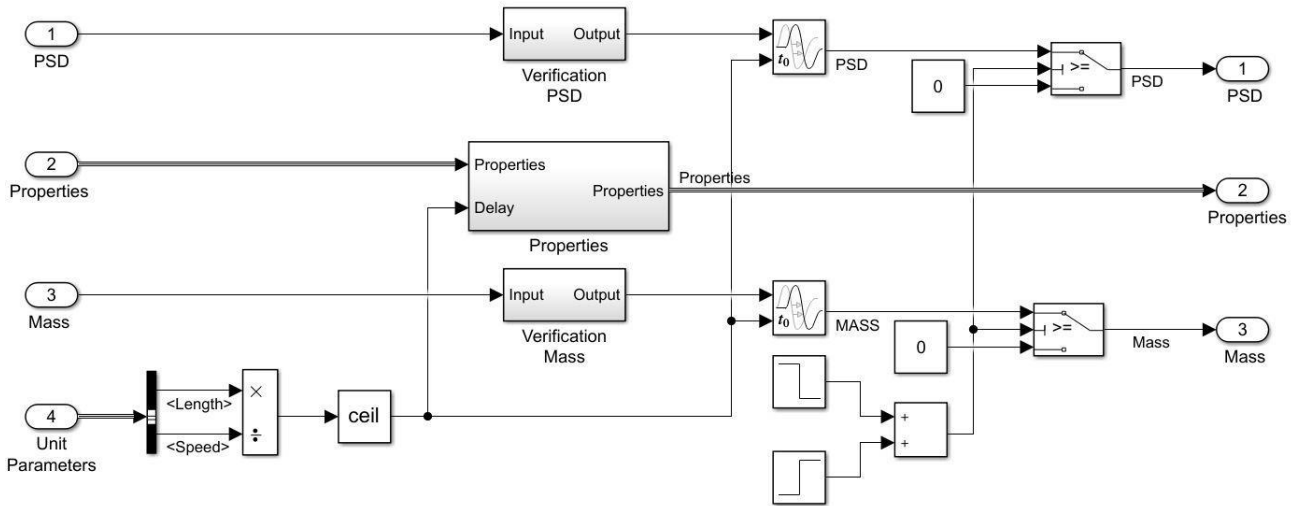


Figura 4.4-Lógica para a parada das correias utilizando o diagrama de blocos do Simulink.

É necessário frisar que, ao desligar uma correia que alimenta um dos britadores, desliga-se também o alimentador da pilha pulmão a montante responsável por alimentar a correia em questão. Desta maneira, a pilha deixa de enviar material à correia, e esta interrompe a alimentação do britador, evitando assim que a correia sobrecarregue com o material advindo da pilha pulmão, caso esta continuasse a enviar material para a correia. Para tal, uma lógica idêntica à lógica da correia foi implementada também à pilha pulmão a montante.

### 4.3 Ajuste dos parâmetros do modelo de Karra

Os parâmetros  $d50$  e  $\lambda$  foram ajustados com o objetivo de minimizar uma função de mínimos quadrados que relaciona a curva de partição do modelo citado com a curva de partição do modelo de eficiência de Whiten. O método utilizado foi o gradiente reduzido generalizado (Generalized reduced Gradient ou GRG nonlinear).



No trabalho de Miceli, (2019) é mostrado que o modelo de eficiência de Whiten para o peneiramento ajustou com sucesso os dados experimentais da usina Santa Luzia, portanto ajustar os parâmetros do modelo de Karra em função do modelo de Whiten garante que o modelo de Karra reproduzirá os dados experimentais.

$$fobj = (c_{dpKarra} - c_{dpEff})^2 \quad 4.1$$

Na qual  $c_{dpKarra}$  e  $c_{dpEff}$  são as curvas de partição do modelo de Karra e do modelo de eficiência, respectivamente. A Tabela 4.2 apresenta os parâmetros ajustados do modelo de Karra.

Tabela 4.6-Parâmetros ajustados do modelo de Karra

		<b>d50</b>	<b><math>\Lambda</math></b>
<b>PV3PV4</b>	deque 1	38,7	7,62
	deque 2	24,2	5,18
<b>PV5PV6</b>	deque 1	16,3	6,84
	deque 2	7,46	9,61
	deque 3	1,73	2,24
<b>PV7</b>	deque 1	1,21	1,69
	deque 2	1,76	4,56

#### 4.4 Análise de sensibilidade

Realizaram-se diversas simulações variando-se a APF dos britadores e a vazão de alimentação do britador S4000, com o intuito de observar o comportamento do sistema em diferentes condições de operação. A Tabela 4-3 apresenta o caso base e os demais casos onde uma das variáveis foi alterada, assim como os resultados para a simulação onde ocorre a parada não programada e a simulação otimizada.

Tabela 4.7-Casos avaliados na análise de sensibilidade

<b>Caso A</b>	Caso base
<b>Caso B</b>	Acréscimo de 10% na vazão mássica do S4000
<b>Caso C</b>	Decréscimo de 10% na vazão mássica do S4000
<b>Caso D</b>	Acréscimo de 10% no APF do S4000
<b>Caso E</b>	Decréscimo de 10% no APF do S4000
<b>Caso F</b>	Acréscimo de 10% no APF do HP300
<b>Caso G</b>	Decréscimo de 10% no APF do HP300
<b>Caso H</b>	Acréscimo de 10% no APF do HP200
<b>Caso I</b>	Decréscimo de 10% no APF do HP200
<b>Caso J</b>	Parada não programada
<b>Caso K</b>	Caso otimizado

#### 4.5 Otimização da usina de agregados

Para a otimização da usina de agregados, definiu-se a função objetivo como a receita líquida ao fim de 8h de operação, ou seja, o somatório de todos os produtos multiplicados pelo seu preço de mercado menos os custos de operação da usina de britagem, que neste trabalho, consistem no consumo energético demandado para a operação das correias, britadores e peneiras. A função objetivo, assim como suas restrições, está representada na equação 4.2.

$$fob2 = - \left( \sum_{i=1}^5 pdt_i * prt_i - \sum_{i=1}^n pow_i * cst \right) \quad 4.2$$

$$49 \leq APF_{S4000} \leq 59$$

$$27 \leq APF_{HP300} \leq 33$$

$$18 \leq APF_{HP200} \leq 22$$

Na qual  $pdt_i$  é a produção de cada um dos produtos finais da usina ao fim de 8h de operação, em toneladas;  $pvt_i$  é o preço de cada um dos produtos,  $pow_i$  é a energia consumida, em kWh, de cada equipamento e correia transportadora e  $cst$  é o preço médio da energia elétrica para a indústria no estado do Rio de Janeiro, definido na seção 3.2.2.

A estimativa inicial para o método dos poliedros flexíveis será a condição do caso base, que foi utilizada no trabalho de Miceli (2019) e foi avaliada como a melhor condição dentre os cenários estudados naquele trabalho.

## 5 Resultados e Discussões

Nesta seção, os resultados dos ajustes de parâmetros do modelo de Karra e da otimização da planta serão apresentados.

### 5.1 Ajuste de parâmetros do modelo de Karra

As Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 apresentam as curvas de partição dos modelos de Karra e de Eficiência para as peneiras PV3PV4, PV5PV6 e PV7.

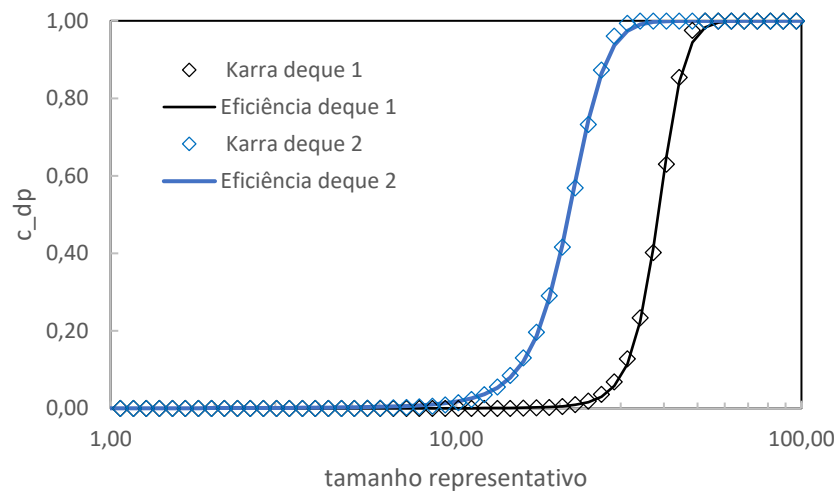


Figura 5.1-Curva de partição para o modelo de eficiência e modelo de Karra para o primeiro e segundo deques da peneira PV3PV4

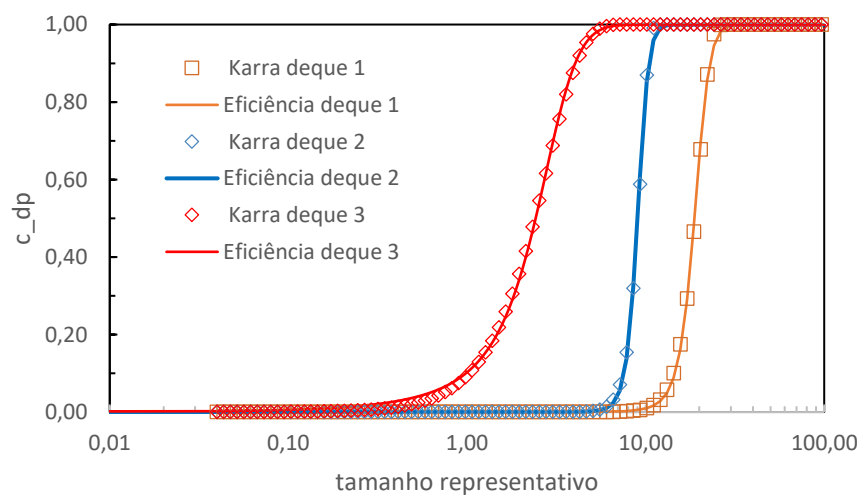


Figura 5.2-Curva de partição para o modelo de eficiência e modelo de Karra para o primeiro e segundo e terceiro deques da peneira PV5PV6

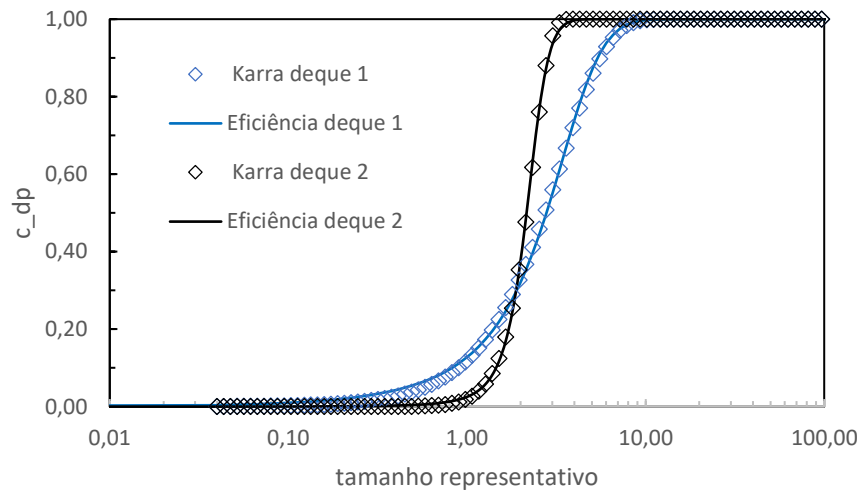


Figura 5.3-Curva de partição para o modelo de eficiência e modelo de Karra para o primeiro e segundo deques da peneira PV7

Após o ajuste dos parâmetros do modelo de Karra, nota-se que o modelo apresenta comportamento praticamente idêntico ao modelo de eficiência, com a vantagem de ser sensível a mudanças na vazão mássica de alimentação, o que torna o modelo de Karra capaz de reproduzir com maior fidelidade o peneiramento do processo real e, por conseguinte, a dinâmica do processo.

## 5.2 Fluxograma e caso base da usina Santa Luzia

O fluxograma da usina Santa Luzia está representado em interface MatLab/Simulink na Figura 5.4.

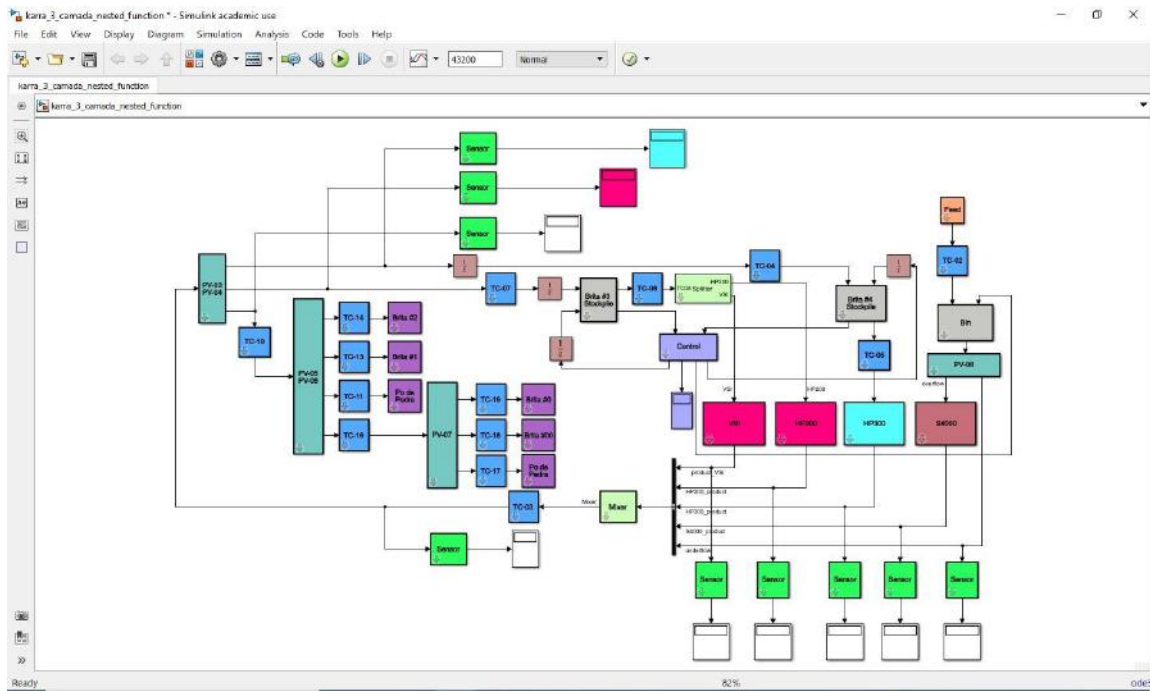


Figura 5.4-Fluxograma da usina Santa Luzia em interface MatLab/Simulink. Os blocos azuis representam as correias transportadoras; os blocos cinzas representam as pilhas-pulmão, os blocos verde-escuros representam as peneiras, os blocos verde-claros são sensores responsáveis por exibir informações durante a simulação e os blocos marrom, verde-água e magenta representam os britadores S4000, HP300 e HP200/VSI, respectivamente.

Os resultados que serão apresentados correspondem à dinâmica de pilhas 3 e 4 e à dinâmica do P80 (P80 refere-se a um tamanho de partícula, tal que 80% da distribuição granulométrica acumulada da corrente é menor ou igual a este tamanho) dos produtos das peneiras PV5PV6 e PV7, assim como a energia consumida de todos os equipamentos do circuito, a disponibilidade dos britadores (a porcentagem do tempo em que os britadores estão processando material) e a potência acumulada ao longo do tempo de cada um dos britadores. As Figuras 5.5 e 5.6 ilustram a dinâmica das pilhas pulmão e do P80, respectivamente, enquanto a Figura 5.7 apresenta o consumo energético acumulado dos britadores da usina de agregados Santa Luzia.

Nota-se que a dinâmica de pilhas apresenta comportamento semelhante à Figura 3.10, já que as condições que definem as ações de controle são as mesmas. O P80 sofre mudanças bruscas toda vez que o sistema sofre uma ação de controle, o que indica uma dinâmica muito rápida para esta variável. Nos intervalos de tempo em que não há desligamento ou religamento de britadores, o P80 é praticamente constante.

Para o consumo acumulado dos britadores, percebe-se que o HP300 apresenta uma linha reta na Figura 5.7, comportamento esperado já que HP 300 é o único britador que está operando durante todo o tempo da simulação. Para os demais britadores, notam-se mudanças na inclinação das curvas, o que é um reflexo dos desligamentos e religamentos ao longo da operação.

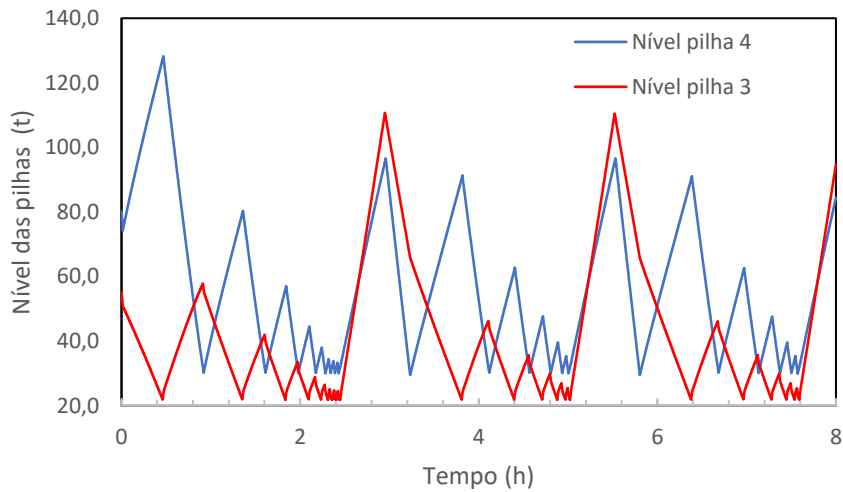


Figura 5.5-Dinâmica do nível das pilhas do caso base

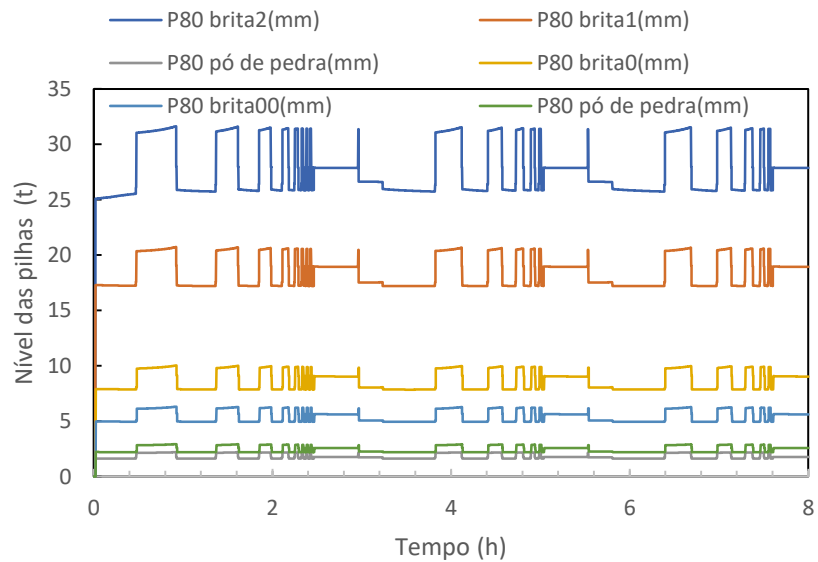


Figura 5.6-Dinâmica do P80 dos produtos das peneiras PV5, PV6 e PV7 do caso base

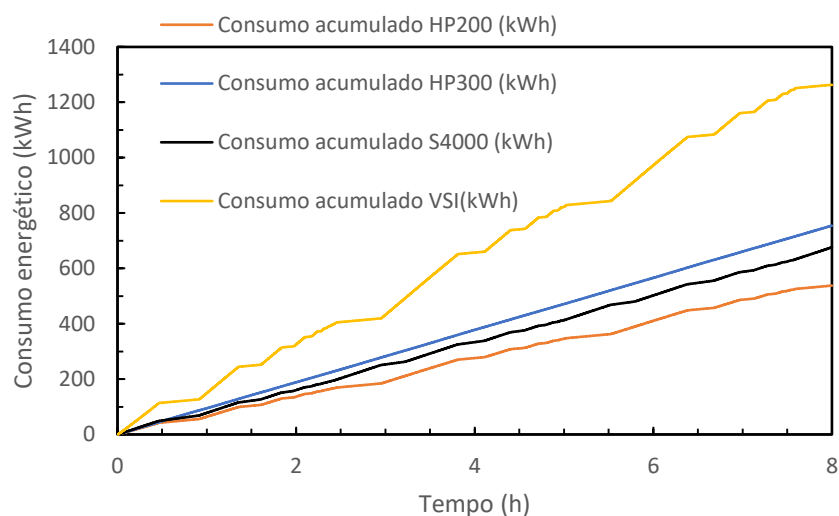


Figura 5.7-Consumo energético acumulado dos britadores no caso base

### 5.3 Análise de sensibilidade

Os resultados da análise de sensibilidade (casos B a I) são mostrados na Tabela 5.1, 5.2 e 5.3. Nota-se que o caso G, onde a abertura do HP300 é reduzida, apresenta a maior produtividade em relação aos produtos quando comparado ao caso base (28% de aumento na produção de brita 00, 23% de aumento na produção de brita 0, etc), com exceção da brita 1, que sofre redução de 2%. Isto ocorre porque a redução da APF do HP300, gera maior quantidade de material próximo à granulometria dos produtos finais, auxiliando na quebra final realizada pelos britadores quaternários (HP200/VSI). Entretanto, o consumo energético da usina como um todo aumenta.

O caso B mostra que o aumento na vazão de alimentação do S4000 sobrecarrega a peneira PV3PV4, impedindo a passagem dos finos para as peneiras subsequentes. O material, portanto, é recirculado na usina, impedindo que os níveis das pilhas atinjam uma das condições para religar a alimentação do S4000, trazendo material novo e grosso para o circuito. Por este motivo, a produção de brita 00 sofre redução de cerca 80%, a brita 0 tem redução de 76%, enquanto os demais produtos sofrem reduções significativas também.

O caso C apresenta números de produtividade semelhantes ao caso B, entretanto, a diminuição da alimentação do S4000 não é o único motivo para tal resultado. A lógica



de controle não é adequada para este caso, já que as pilhas-pulmão atingem uma condição de estabilidade tal que o britador S4000 não é religado após o primeiro desligamento, o que impede a entrada de material grosso na usina.

Os casos D e E mostram que alterar somente a APF do S4000 não é suficiente para otimizar a produtividade da usina. Isso ocorre porque o S4000 tem disponibilidade de 66%, ou seja, o britador S4000 passa 34% do tempo de operação desligado.

O caso F mostra que abrir o britador HP300 não contribui para o aumento de produtividade da usina como um todo. O caso G mostrou que fechar o britador HP300 surte o efeito contrário, o que indica que a ação de fechar o HP300 é a ação correta a ser tomada no sentido de aumentar a produtividade da usina.

O caso H mostra que abrir o britador HP200 aumenta em 7,7% a produção de brita 2, o que indica que, caso a demanda deste produto aumente, o caso H apresenta uma condição operacional adequada para suprir tal necessidade. O caso I demonstra que fechar o britador HP200 aumenta em 4,3% a produção de brita 0, o que é uma solução caso a demanda por esse produto aumente.

Tabela 5.1-Resultados para a análise de sensibilidade, parada não programada e caso otimizado

Produção (t)	Estudo de caso										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
<b>brita 00</b>	108	22	22	110	108	22	136	111	112	107	138
<b>brita 0</b>	533	110	110	542	533	110	653	540	556	523	659
<b>brita 1</b>	797	162	162	810	798	162	989	780	820	784	972
<b>brita 2</b>	482	90	90	482	482	90	583	522	446	478	616
<b>pó de pedra</b>	768	151	151	779	768	151	945	785	785	756	959
<b>pó de pedra</b>	46	10	10	47	46	10	56	47	47	45	57

Tabela 5.2- Disponibilidade dos britadores para a análise de sensibilidade, parada não programada e caso otimizado

Disponibilidade (%)	Estudo de caso										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
<b>S4000</b>	65	11	11	63	65	11	80	64	63	66	78
<b>HP300</b>	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
<b>HP200</b>	54	10	10	57	54	10	68	57	58	79	72
<b>VSI</b>	54	10	10	57	54	10	68	57	58	79	72

Tabela 5.3-Consumo energético dos equipamentos para a análise de sensibilidade, parada não programada e caso otimizado

Consumo (kWh)	Estudo de caso										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
<b>S4000</b>	676	406	406	638	706	406	750	669	666	681	740
<b>HP300</b>	755	544	544	768	739	544	820	754	753	748	817
<b>HP200</b>	538	289	289	553	538	289	607	524	581	531	597
<b>VSI</b>	1263	408	408	1315	1263	408	1509	1384	1278	1240	1627
<b>PV3PV4</b>	370	370	370	370	370	370	370	370	370	370	370
<b>PV5PV6</b>	290	290	290	290	290	290	290	290	290	290	290
<b>PV7</b>	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51
<b>PV8</b>	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
<b>TC02</b>	708	778	636	708	708	708	708	708	708	708	708
<b>TC03</b>	883	459	459	881	882	459	983	900	871	875	998
<b>TC04</b>	336	359	359	330	335	359	304	331	329	336	300
<b>TC05</b>	335	366	366	335	335	366	305	335	335	335	307
<b>TC07</b>	183	27	27	182	182	27	230	199	173	179	244
<b>TC08</b>	177	31	31	186	178	31	223	202	177	174	248
<b>TC10</b>	364	72	72	369	364	72	448	371	369	359	453
<b>TC11</b>	102	20	20	104	102	20	126	104	104	101	128
<b>TC13</b>	106	22	22	108	106	22	132	104	109	104	129
<b>TC14</b>	64	12	12	64	64	12	78	70	60	64	82
<b>TC16</b>	91	19	19	93	92	19	113	93	95	90	114
<b>TC17</b>	6	1	1	6	6	1	8	6	6	6	8
<b>TC18</b>	14	3	3	15	14	3	18	15	15	14	18
<b>TC19</b>	71	15	15	72	71	15	87	72	74	70	88

Tabela 5.4- Energia específica, em kWh/t, para os casos estudados

	Estudo de caso										
Energia Específica (kWh/t)	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
	2,73	8,47	8,21	2,71	2,73	8,34	2,45	2,74	2,71	2,75	2,47

#### 5.4 Otimização da usina de agregados

Os valores da função objetivo a cada iteração assim como o valor final de cada função objetivo estão representados na Figura 5.8. A Tabela 5.5 apresenta os valores das variáveis independentes ao fim da otimização da função objetivo, assim como a estimativa inicial.

O resultado apresentado pelo otimizador está alinhado com os resultados apresentados na análise de sensibilidade. O fechamento do britador HP300, juntamente com a abertura do britador HP200 aumenta a produção de brita 00 em 28%, de brita 0 em 24%, de brita 1 em 22%, de brita 2 em 28% e de pó de pedra em 25%, enquanto a redução da energia específica (kWh/t) é de 10%.

Tabela 5.5 -Estimativas iniciais e valores finais após a convergência do método dos poliedros flexíveis

	APF S4000 (mm)	APF HP300 (mm)	APF HP200 (mm)
<b>Estimativa inicial</b>	54,0	30,0	20,0
<b>Valor final</b>	57,3	27,2	21,5

Além disso, o britador HP300 apresenta disponibilidade de 100%, ou seja, ele se mantém ligado durante toda a operação, o que indica que a diminuição de sua abertura, apesar de reduzir sua capacidade de produção, impacta positivamente na produção da

planta, devido à maior quantidade de finos produzida pelo britador e que é enviada para os britadores quaternários.

Este resultado demonstra que o método dos poliedros flexíveis foi adequado para otimizar a usina de agregados de Santa Luzia, aumentando a produtividade da usina ao mesmo tempo que o consumo energético sofreu pequeno acréscimo.

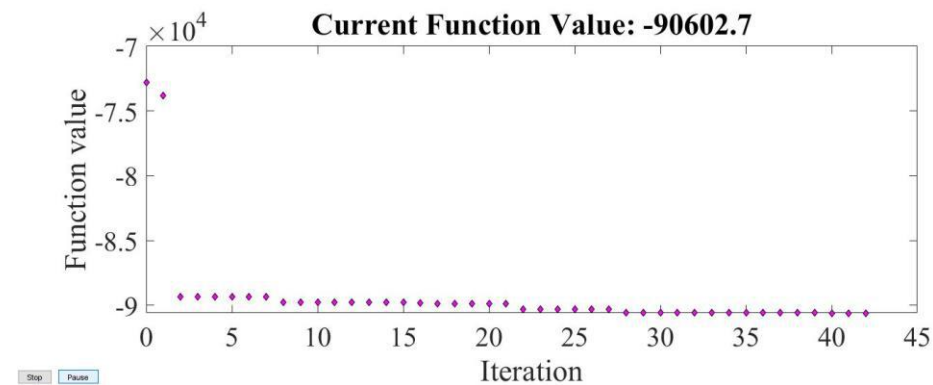


Figura 5.8 – Desenvolvimento da função objetivo ao longo das iterações

## 5.5 Introdução de eventos estocásticos

A dinâmica de pilhas na simulação onde o metal é detectado na TC-05 é representado na Figura 5.9. Para efeito de comparação, também está representada a dinâmica de pilhas o caso base (Figura 5.10). As Tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 apresentam a capacidade da usina e o consumo energético de todos os britadores, além da energia específica de cada caso.

Percebe-se que a parada da correia TC-05 influencia a dinâmica de pilhas do processo, assim como reduz a produtividade da usina e o consumo energético dos britadores. Este resultado era esperado, já que o desligamento da correia interrompe a vazão de material para o britador HP300, o que reduz a produtividade do britador e o seu consumo energético.

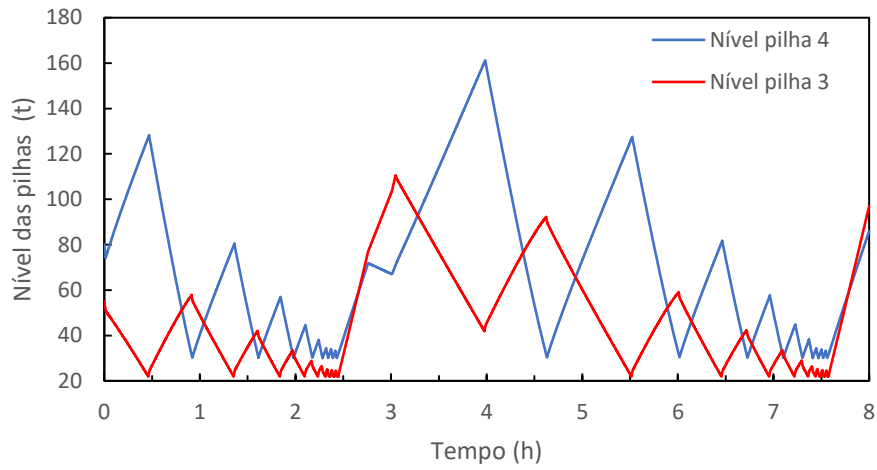


Figura 5.9-Dinâmica de pilhas para o caso em que é detectado metal na TC-05 durante a operação da usina.

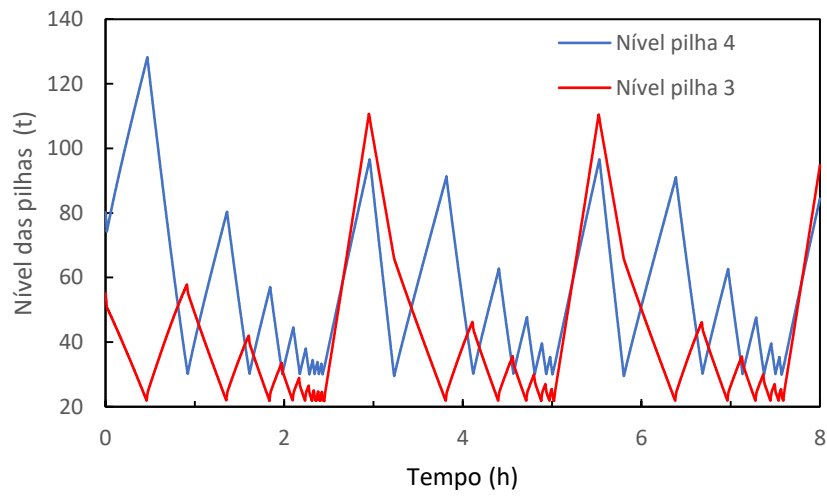


Figura 5.10- Dinâmica de pilhas para uma operação usual, sem eventos estocásticos ou paradas programadas.

## 6 Conclusões

O ajuste de parâmetros para o modelo de Karra, mostrou-se adequado. O fato de o modelo ser sensível à vazão representa de maneira mais realista a operação da usina estudada que o modelo de eficiência de classificação.

O método de otimização dos poliedros flexíveis minimizou a função objetivo com êxito. Houve um aumento de 22,3%, em média, na produtividade da usina, com diminuição de 10% na energia específica da usina (kWh/t).

A introdução de eventos estocásticos implementada na simulação foi alcançada. Os resultados apresentados demonstram que a simulação é sensível a eventos estocásticos e paradas programadas.

## **7. Sugestões para trabalhos futuros**

Investigar outras possibilidades para a função objetivo, priorizando também a vida útil dos equipamentos, questões associadas ao desgaste, além da produtividade. Além disso, recomenda-se a realização de simulações que prevejam outros tipos de dinâmicas, como a variação da APF dos britadores em função do desgaste, bem como a introdução de sistemas de controle automático de processo

## 7 Bibliografia

- Asbjörnsson, G., Hulthén, E., & Evertsson, M. (2012). Modelling and dynamic simulation of gradual performance deterioration of a crushing circuit—Including time dependence and wear. *Minerals Engineering*, 33, 13-19.
- Asbjörnsson, Gauti; Hulthén, Erik; Evertsson, Carl Magnus. (2014) Implementation of Dynamic Simulation at Anglo Platinum. In: 9th International Comminution Symposium 2014.
- Asbjörnsson, Gauti; Hulthén, Erik; Evertsson, Carl Magnus. (2012) Modelling dynamic behaviour of storage bins for material handling in dynamic simulations. In: XXVI International Mineral Processing Congress (IMPC 2012: Innovative Processing for Sustainable Growth; New Delhi; India; 24 September 2012 through 28 September 2012). p. 258-267.
- Asbjörnsson, Gauti; Hulthén, Erik; Evertsson, Magnus. (2013) Modelling and simulation of dynamic crushing plant behavior with MATLAB/Simulink. *Minerals Engineering*, v. 43, p. 112-120.
- Asbjörnsson, Gauti; Hulthén, Erik; Evertsson, Magnus. (2012) Modelling and dynamic simulation of gradual performance deterioration of a crushing circuit—Including time dependence and wear. *Minerals Engineering*, v. 33, p. 13-19.
- Atta, K. T., Johansson, A., & Gustafsson, T. (2013). On-line optimization of cone crushers using Extremum-Seeking Control. In 2013 IEEE International Conference on Control Applications (CCA) (pp. 1054-1060). IEEE.
- Austin, L. G.; Klimpel, R. R. (1964). The theory of grinding operations. *Industrial & Engineering Chemistry*, v. 56, n. 11, p. 18-29.
- Bengtsson, M., Asbjörnsson, G., Hulthén, E., & Evertsson, M. (2017). Towards dynamical profit optimization of comminution circuits. *Minerals Engineering*, 103, 14-24.
- Bengtsson, M., Svedensten, P., & Evertsson, C. M. (2009). Improving yield and shape in a crushing plant. *Minerals Engineering*, 22(7-8), 618-624.
- Concha, F. A., 1995, "Value of first principles and phenomenological modeling in mineral processing". In: XIX International Mineral Processing Congress, pp. 9 15, Littleton, Setembro.
- Edgar, T.F; Himmelblau, D.M. (1988) Optimization of Chemical Processes. New York: McGraw-Hill.



Evertsson, C. M. (1999). Modelling of flow in cone crushers. *Minerals engineering*, 12(12), 1479-1499.

Firjan, Ambiente de Negócios; Quanto custa a energia elétrica para a indústria no Brasil?, 2016

Fuerstenau, D.W., de, A., Kapur, P.C., 2004, Linear and Nonlinear Particle Breakage Processes In Comminution Systems, *International Journal of Mineral Processing*, 74, 317- 327.

Herbst Ja, Bascur Oa, 1983, Mineral Processing Control In The 1980s - Realities and Dreams, *Journal of Metals*, 35 (12), 60-60.

Herbst, J.A., Rajamani, K., 1982, The Application of Modern Control Theory to Mineral Processing Operations, *Anais do 12th CMMI Congress*, 1982.

<http://www.light.com.br/para-residencias/Sua-Conta/composicao-da-tarifa.aspx>, acessado em 15/01/2020, às 14:32.

<https://www.mathworks.com/help/simulink/ug/compare-solvers.html>, acessado em 03/02/2020, às 08:45.

Johansson, M., & Evertsson, C. M. (2018). Applying linear model predictive control to crushing circuit simulations. In XXIX International Mineral Processing Congress.

Karra, V. K. (1979.) Development of a model for predicting the screening performance of a vibrating screen. *CIM bulletin*, v. 72, n. 804, p. 167-171.

King, R. P. (2012). *Modeling and simulation of mineral processing systems*. Elsevier, 2012.

King, R. P., (1990), "Simulation - the modern cost-effective way to solve crusher circuit processing problems". *International Journal of Mineral Processing*, v. 29, pp. 249 265.

King, R. P., Schneider, C. L., 2004. "Simulação de usinas de beneficiamento: princípios básicos". *Tratamento de Minérios*. 4a edição. Rio de Janeiro: pp. 721 781.

Lagarias, J. C., Reeds, J. A., Wright, M. H., & Wright, P. E. (1998). Convergence properties of the Nelder--Mead simplex method in low dimensions. *SIAM Journal on optimization*, 9(1), 112-147.

Lepore, R., A. Vande Wouwer and M. Remy, (2003), Nonlinear Model Predictive Control of Cement Grinding Circuits., *Anais do ADCHEM 2003*. Liu, Y., Spencer, S., 2004, Dynamic Simulation of Grinding Circuits, *Minerals Engineering*, 17, 1189-1198

Miceli, Hayla., (2019), Simulação em regime estacionário e dinâmico como ferramenta para otimização de uma usina de britagem de agregados. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Napier-Munn, T. J., & Lynch, A. J. (1992). The modelling and computer simulation of mineral treatment processes—current status and future trends. *Minerals Engineering*, 5(2), 143-167.

Napier-Munn, Timothy J. et al. (1996) Mineral comminution circuits: their operation and optimisation.

Napier-Munn, Timothy J.; Lynch, A. J. (1992) The modelling and computer simulation of mineral treatment processes—current status and future trends. *Minerals Engineering*, v. 5, n. 2, p. 143-167.

Nelder, J.A., Mead, R., (1965) *Computer Journal*. Vol. 7. p. 308 a 313.

Neto, O. D., (2007), Sistema para Simulação Dinâmica de Circuitos de Britagem. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Paulo.

Ogunnaike, B. A., Ray, W. H, (1994), *Process Dynamics, Modeling and Control*, Oxford University Press, New York

Resolução ANEEL Nº 2.523/19 de 26/03/2019.

Seborg, D.E, Edgar, T.F.; Mellichamp, D.A. (1989) *Process dynamics and Control*. New York: John Wiley and Sons, 234 p.

Segura-Salazar, J; L. Barrios, G.P; Rodriguez, V; et al., (2017), “Mathematical modeling of a vertical shaft impact crusher using the Whiten model”, *Minerals Engineering*, v. 111, pp. 222-228.

Souza, V. C. G., (2002). *Modelagem Matemática E Simulação do Circuito de Moagem de Cimento*, Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS.

Tavares, L. M.; das Neves, Patrícia B. (2008) Microstructure of quarry rocks and relationships to particle breakage and crushing. *International Journal of Mineral Processing*, v. 87, n. 1-2, p. 28-41.

Tavares, L.M., (2005), *Operações Unitárias em Processamento Mineral*, Apostila do curso de Processamento de Recursos Minerais I do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Tavares, L.M., (2007), Breakage of Single Particles: Quasi-static. In: *Handbook of Powder Technology: Particle Breakage* (A.D. Salman, M. Ghadiri, M.J. Hounslow, Eds.), Elsevier, 12, 3-68.

Vale, J. M. De C., (2017), Controle Preditivo Aplicado Na Otimização De Um Processo De Concentração Típico De Flotação Em Coluna Para Aproveitamento De Minérios. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São João del Rei.

Whiten, W. J. (1972). The simulation of crushing plants with models developed using multiple spline regression. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 72(10), 257-264.

Whiten, W. J., (1972a), "A model for simulating crushing plants". *J. South African Inst. Min. Metall*, v. 72, pp. 257 264.

Whiten, W. J., White, M. E., (1979), "Modeling and simulation of high tonnage crushing plants". In: 12th International Mineral Processing Congress, pp. 148 158, São Paulo, Setembro.

Wills, B. A., Napier-Munn, T. J., (2006), *Mineral Processing Technology: An Introduction to the Pratical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. 7 ed. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre